



1 BETON YOLLAR Kongresi ve Sergisi

13-14 Kasım 2019
KGM Halil Rifat Paşa Konferans Salonu, Ankara

BİLDİRİLER KİTABI
PROCEEDINGS

ISBN: 978-975-8136-32-2

Tasarım ve Hazırlık
Gizem Buzacı, TÇMB

Baskı
Fersa Matbaacılık Paz.San.Tic.Ltd.Şti
www.fersaofset.com

DÜZENLEME KURULU

ORGANIZING COMMITTEE

Başkan (Chair)

Abdulkadir URALOĞLU (KGM)

Üyeler (Members)

Mehmet TUTAŞ (KGM)

Mücahit ARMAN (KGM)

Şenol ALTIOK (KGM)

Sina KİZİROĞLU (KGM)

İsmail BULUT (TÇMB)

Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN (ODTÜ-TÇMB)

Prof. Dr. M. Vefa AKPINAR (KTÜ)

Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN (İTÜ)

Luc RENS (EUPAVE)

YÜRÜTME KURULU (STEERING COMMITTEE)

Başkan (Chair)

Mehmet TUTAŞ (KGM)

Üyeler (Members)

Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN (ODTÜ-TÇMB)

Şenol ALTIOK (KGM)

Sina KİZİROĞLU (KGM)

Gençağa KARAKAŞ (KGM)

Ahmet SAĞLAM (KGM)

Muhammet KOMUT (KGM)

Ahmet SAĞLIK (KGM)

Sabit USLU (TÇMB)

Barişcan AKBELEN (TÇMB)

BİLİM KURULU (SCIENTIFIC COMMITTEE)

Dr. Yavuz ABUT (Kocaeli B.B.)

Prof. Dr. Emine AĞAR (E-İTÜ)

Prof. Dr. M. Vefa AKPINAR (KTÜ)

Dr. Öğretim Üyesi Can Baran AKTAŞ (TEDÜ)

Şenol ALTIOK (KGM)

Prof. Dr. Ali Osman ATAHAN (İTÜ)

Dr. Anne BEELDENS (KU Leuven - Belçika)

Dr. Muhammet ÇELİK (AFAD)

Prof. Dr. Halil CEYLAN (Iowa University - ABD)

Prof. Dr. İlhami DEMİR (KÜ)

Doç. Dr. Kemal ERDEM (İYTE)

Prof. Dr. Murat GÜLER (ODTÜ)

Nilgün GÜNGÖR (KGM)

Prof. Dr. Soner HALDENBİLEN (PAÜ)

Gençağa KARAKAŞ (KGM)

Prof. Dr. Mustafa KARASHAHİN (İGÜ)

Serdar KAŞAK (KGM)

Dr. Öğretim Üyesi Süleyman Bahadır KESKİN (MSKÜ)

Sina KİZİROĞLU (KGM)

Muhammet KOMUT (KGM)

Wim KRAMER (Cem. & Conc. Centrum - Hollanda)

Dr. James MACK (CEMEX - ABD)

Dr. Öğretim Üyesi Hande Işık ÖZTÜRK (ODTÜ)

Luc RENS (EUPAVE)

Ahmet SAĞLIK (KGM)

Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN (HÜ)

Dr. Shiraz TAYABJI (ACPC - ABD)

Dr. Peter TAYLOR (CP Tech Center - ABD)

Dr. E. Nazan ÜNAL (KGM)

Ali ÜNSAL (KGM)

Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN (ODTÜ)

DÜZENLEYEN KURULUŞLAR

ORGANIZED BY



Destekleyen Kuruluşlar

Supported By



Güran Makina Ticaret



KATKI ÜRETİCİLERİ BİRLİĞİ



WIRTGEN
GROUP



Önsöz

Dünyanın en gelişmiş yirmi ekonomisi içerisinde bulunan ülkemiz, özellikle son yıllarda yapmış olduğu büyük altyapı projeleri ile dikkatleri üzerine çekmektedir. Bununla birlikte, ülke adına planlanan ve gerçekleştirilen her yeni proje aynı zamanda daha fazla trafik yükünü de beraberinde getirmektedir. Her geçen gün artan bu trafik yüklerinin güvenle taşınarak, daha uzun ömürlü, daha az bakım gerektiren ve aynı zamanda kullanıcılara daha iyi performans sağlayan yollar için üstyapı tipinin seçimi oldukça önemlidir.

Trafik yüklerini güvenle taşıyarak taban zeminine aktarılmasını sağlayan yol üstyapıları, aynı zamanda sağlamış olduğu kayma direnci güvenliği, sürüş konforu ve düşük gürültü seviyesi sayesinde yol performansında da önemli bir etkiye sahiptir. Tüm dünyada genel olarak yol üstyapıları iki ana kısma ayrılmıştır: 1) Bağlayıcı malzemesi bitüm esaslı olan esnek (asfalt) üstyapılar ve 2) Bağlayıcı malzemesi hidrolik esaslı çimento olan rijit (beton) üstyapılar. Bunların yanısıra her iki üstyapının birlikte kullanıldığı üçüncü bir tip ise kompozit üstyapılar olarak adlandırılmaktadır.

Rijit üstyapılar veya daha bilinen adıyla beton yollar, hidrolik çimento esaslı bağlayıcı malzemesi ile yüksek mukavemete, taşıma gücüne ve eğilme dayanımına sahiptirler. Beton yollar derz durumlarına ve içerisinde donatı içerip içermemesine göre farklı şekillerde uygulanmaktadır. Bunlar arasında derzli donatısız beton yollar (JPCP), derzli donatılı beton yollar (JRCP), sürekli donatılı (CRCP) beton yollar ve silindire sıkıştırılmış beton yollar (SSB) sayılabilir. Maruz kaldığı trafik yüklerine, çevre koşullarına, uygulanabilirliğine ve ekonomik koşullara göre birbirlerine kıyasla avantajlı konuma gelebilen bu üstyapı tiplerinin iyi bir şekilde tanınması özellikle tek bir üstyapı tipinin hâkim olduğu ülkelerde diğer teknolojiden de faydalanmak adına büyük önem arz etmektedir.

Ülkemizde 1 Ocak 2019 tarihi itibarıyla KGM sorumluluğu altında bulunan ve otoyol, devlet yolu ve il yolu olmak üzere sınıflandırılan toplam 67,333 km yol bulunmaktadır. Bu yol ağının yaklaşık %36'sı BSK, %58'i ise sathi kaplama olup kalanı stabilize, parke ve toprak yollardan oluşmaktadır. KGM sorumluluğu altındaki yollar içinde ülkemizdeki ilk beton yol uygulaması KGM ile TÇMB arasında yapılan protokoller çerçevesinde 2004 yılında Afyon Emirdağ ayırım yolunda 2 km'lik tek yönde, 2006 yılında Hasdal Kavşağı Kemerburgaz yolunda 3.5 km'lik tek yönde deneme kesimleri olarak gerçekleştirilmiştir. Bunların dışında yine KGM bünyesinde Ordu Ulubey arasında ve Karamürsel şehir geçişinde 2007 ve 2010 yıllarında iki pilot uygulama yapılmıştır.

Öte yandan, 2017 yılında ihale edilen ve toplam uzunluğu 21 km'yi aşan "Kemaliye-Dutluca Tünelleri ve Bağlantı Yolları ile Kemaliye ve Kozlupınar Viyadüğü" işi yol üstyapısı rijit olarak projelendirilmiş bulunmaktadır. Dolayısıyla, yurtiçi ve yurtdışındaki gelişmeler ışığında KGM beton yollar konusundaki çalışmalarına hız vermiş ve 2016 yılında Beton Yollar

Teknik Şartnamesini çıkarmıştır. Halen Rijit Üstyapılar Projelendirme Rehberi üzerindeki çalışmalara ise devam edilmektedir.

Öte yandan, ülkemizde KGM'nin sorumluluk alanı dışındaki yollar Büyükşehir Belediyeleri ve İl Özel İdareleri sorumluluğuna girmektedir. Bu yolların uzunluğu ve üstyapı dağılımı tam olarak bilinmemekle birlikte toplam uzunluğunun 350,000 km'nin üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bu yollarda da farklı tiplerde beton yol uygulamaları bulunmaktadır.

Ulaştırma ve Alt Yapı Bakanlığı himayelerinde, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) ile Avrupa Beton Kaplamalar Birliği'nin (EUPAVE) teknik desteği ile gerçekleştirilecek olan "1. Beton Yollar Kongre ve Sergisi" ile sektörün ilgili paydaşlarının bir araya getirilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilecek bu kongrenin amacı, Ülkemizin rekabet gücüne ve toplumun hayat kalitesinin yükseltilmesine katkı veren; güvenli, erişilebilir, ekonomik, konforlu, hızlı, çevreye duyarlı, kesintisiz, dengeli, çağdaş hizmetlerin sunulduğu sürdürülebilir bir ulaştırma sistemi oluşturulmasına katkı sağlamaktır. Bunun yanısıra ülkemiz karayollarında şimdiye kadar pek tercih edilmese de, uzun ömürlü, ekonomik, konforlu ve güvenli olmaları sebebiyle gerek Avrupa gerekse ABD'de olmak üzere Dünya'nın her yerinde beton yolların bir alternatif olarak kullanıldığını göstermek ve Ülkemizdeki Beton Yollar konusunda şimdiye kadar yapılan çalışmalar ile teknolojik gelişmeler doğrultusunda beton yolların her yönüyle değerlendirilmesini sağlamak amaçlanmaktadır.

Yukarıda belirtilen amaç ve hedeflerle düzenlemiş olduğumuz 1. Beton Yollar Kongre ve Sergisine yurtiçi ve yurtdışından ilgili tüm kamu kuruluşları, belediyeler ve il özel idareleri yöneticileri ve teknik yetkililerinden, akademisyenlerden ve özel sektör temsilcilerinden oldukça yüksek düzeyde bir katılım olmuş; 700'ün üzerinde kayıt yaptırılmış, 20'nin üzerinde firma stant almak üzere başvuruda bulunmuş ve 40'ın üzerinde bildiri sözlü sunum yapmak üzere Bilim Kurulumuza iletilmiştir. Kongremiz sadece iki gün için planlandığından bütün bildirilerin kongrede sözlü sunumu maalesef mümkün olmamış ve Bilim Kurulumuzca seçilen toplam 24 bildiri sunum programına alınmış ve toplam 13 stant ilgili kuruluşlara tahsis edilmiştir. Bilim Kurulumuzca kabul edilen diğer bütün bildirimler ise bu kitapta toplanarak konuyla ilgilenen herkesin kullanımına sunulmuştur. ABD'den Almanya'ya, Belçika'dan Şili'ye, Polonya'dan Fransa'ya uzanan bir coğrafyada gerek Avrupa gerekse Amerika kıtasından katılımcıların kendi ülkelerindeki beton yol uygulamalarını anlatacakları bu kongrenin, tema olarak belirlenen "Toplum Yararı için Üstyapı Çözümleri" sunarak Ülkemizde de beton yolların bir alternatif olarak değerlendirilmesi yönünde bir adım olmasını ümit ediyoruz.

KONGRE DÜZENLEME KURULU

İçindekiler

Table of contents

The Benefits of Industry Competition in the Pavement Market: And How Agencies Can Use it to Lower their Pavement Costs <i>James W Mack , USA</i>	1
Quality Assurance and Quality Control in Concrete Pavement Construction <i>Luc Rens, Belgium</i>	19
Ülkemiz Karayolları İçin Beton Yol Projelendirme Rehberi Çalışmaları ve Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlıkları Serdar Kaşak, Muhammet Komut, Şenol Altıok	29
Keys for Successful Construction and Use of PCC Overlays <i>Mark B. Snyder, USA</i>	41
Yansıma Çatlağı Oluşumu Açısından Kompozit Bir Üstyapının Performansının Belirlenmesi Dr. Yavuz Abut	53
Recent Advances and Uses Of Roller Compacted Concrete for Pavement Construction in the United States <i>Corey Zollinger, USA</i>	63
T.C. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı Beton Yol Uygulamaları Soner Özkan, Sertaç Engin Ünverdi, Osen Didem Tiryaki	79
Polish Experience in the Concrete Roads Construction <i>Jan Deja, Piotr Kijowski, Poland</i>	97
50 Years of Concrete Road Experience in Wallonia <i>Pierre Nigro, Belgium</i>	109
Karayolları Genel Müdürlüğü Ağındaki Beton Deneme Yolların Performans Değerlendirmesi Muhammet Komut, E. Nazan Ünal, Şenol Altıok	119

Concrete Pavements in Tunnels: Benefits, Design and Construction Guidelines Based on Some Belgian Case-Studies <i>Prof. Anne Beeldens, PhD, Eng., Belgium</i>	133
Maintenance of concrete pavements according to German regulations – ZTV BEB-StB 15 <i>Dipl.-Ing Tim Alte-Teigeler, Germany</i>	147
Slipform Paving - Two Lift Concrete Pavement Construction <i>Bernacchia Alessandro, Italy</i>	159
Sürdürülebilir Karayolu Üstyapı Kaplamaları İçin Çatlaksız, Dayanıklı ve Sünek Beton Tasarımı <i>Prof. Dr. Mustafa Şahmaran</i>	173
Concrete Road Safety Barriers: A Flexible Solution for Safer Roads <i>Martin Page, France</i>	193
New Jersey Tipi Beton Bariyerlerin Tasarımında Çarpma Şiddetini (ASI) Etkileyen Şekil Faktörlerinin Tespit Edilmesi <i>Dr. Sedat Özcanan, Prof. Dr. Ali Osman Atahan</i>	203
Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Geçirimli Beton Uygulaması: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesi Uygulaması <i>Barişcan Akbelen, Mustafa Uslu, İsmail Özgür Yaman</i>	217
Doğu Karadeniz Bölgesindeki Beton Yollarının Düşey Deplasmanlarının Hızlandırılmış Yol Testinde İncelenmesi <i>Dr. Muhammet Çelik, Dr. Mehmet Tevfik Seferoğlu, Prof. Dr. M.Vefa Akpınar</i>	229
Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi <i>Ayhan Cömert, Elif Bayrak, Ali Ünsal, Nilgün Güngör</i>	241
Beton Yol İmalatında Kimyasal Katkıların Rolü ve Etkileri <i>Alev Çankayalı, Emrah Karataş, Osman Tezel, Serhat Sarıkaya</i>	253

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) ve Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Yolların Teknik ve Ekonomik Analizi Barışcan Akbelen, İsmail Özgür Yaman	261
Uçucu Kül ve Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Beton Yol Karışımlarının Basınç Dayanımı ve Durabilitesine Olan Etkilerinin Araştırılması Fatih Acıkök, Orhan Canpolat, Mücteba Uysal, Yurdakul Aygörmez	275
Driving Comfort on Concrete Pavements <i>Erwin Kohler, Chile</i>	287
Calcium Aluminate Cement Base Concrete Road Application Metehan Severoğlu, Melike Sucu, Tuğhan Delibaş	299
Doğal Koşullarda, Atık Lastik Eklenmiş Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yolların Performanslarının, Geleneksel Beton Yolların Performanslarıyla Karşılaştırılması Hasan Çağdaş Taşkınısı, M. Karacasu	309
Baraj Yapımında Kullanılan Silindirle Sıkıştırılmış Betondan, PCA Yöntemiyle, SSB Yol Tasarımı Yapılması Hasan Çağdaş Taşkınısı, M. Karacasu	321
Alternatif Beton Yol Kesit Önerisi Erhan Burak Pancar	335
Hızlandırılmış Yol Testleriyle Uzun Dönemli Beton Yol Kaplama Performanslarının (LTPP) araştırılması: KTÜ Örneği Dr. Muhammet Çelik, Dr. Mehmet Tevfik Seferoğlu, Prof. Dr. M. Vefa Akpınar	349
İki Farklı Teknik ile Beton Yol Uygulamaları, Manisa Örneği Eray Özkan, Serdinç Bulut, Kurtuluş Kuruçay	363
New Jersey Tipi Beton Bariyerler İçin Yaralanma Şiddetinin (ASI) Optimal Ağırlıklı Noktasal Birlik Metamodeller ile İyileştirilmesi Dr. Sedat Özcanan, Prof. Dr. Ali Osman Atahan	377

Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Su/Çimento Oranı Değişiminin Dayanım, Ultrases Geçiş Hızı ve Elastisite Modülü Üzerindeki Etkileri İsmail Kılıç, Saadet Gökçe Gök, Ahmet Okan Savaş	395
Prekast Beton Yol Uygulamaları Murat Mazman, Selahattin Düzbasan, Erol Yakıt	405
Trafik Güvenliği için Beton Bariyerler Fatih Özalp, Fatih Pilis, H. Dilşad Yılmaz, Şenol Yaşar, Ali Osman Atahan	419
Yol Üstyapı Tipinin Seçimi Zeliha Temren	429

BİLDİRİLER
PAPERS

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

The Benefits of Industry Competition in the Pavement Market: And How Agencies Can Use it to Lower their Pavement Costs

James W Mack

CEMEX USA, 10100 Katy Freeway, Suite 300, Houston, Texas 77043, USA

Abstract

In 2016, the U.S. spent an estimated \$175 billion on its highways and roadways, with the vast majority of funding coming from state and local governments (~\$128B from states and local governments vs ~\$ 47B from the Federal Government). (Urban Institute, n.d.) Despite this enormous outlay of funds, the U.S. highway infrastructure needs are at an all-time high. The road system earned a D grade from the American Society of Civil Engineers (ASCE) on their 2017 report card, which was the same grade received on the 2013 Report card. Nearly one-fourth of U.S. roadways are in a poor/deficient condition and there is about a \$420 billion backlog of highway repair projects. In addition, more than two out of every five miles of America's urban interstates are congested, with traffic delays costing the country an additional \$160 billion in wasted time and fuel. (ASCE, 2017)

Improvement of the system is needed and the primary approach to address this challenge to date has been to increase funding. While more funding is needed, agencies also need to find ways to be more efficient within their constrained budgets in order to get more out of their roadway and pavement investments. This paper will show how competition in the pavement bidding process and across paving industries can bring value to Transportation Agencies by lowering pavement unit costs.

Keywords: *Competition, Life Cycle Cost Analysis, Alternate Pavement Bidding, Concrete*

1 Introduction

In 2009, the United States cement and concrete industries established the Concrete Sustainability Hub (CSHub) at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) to carry out a multi-

year research program to evaluate and improve the environmental and economic impact of concrete in pavements and buildings. The goal of the effort is to develop breakthroughs that will lead to more sustainable and durable pavement infrastructure and buildings by (1) providing a scientific basis for informed decisions; (2) demonstrating the benefits of a life-cycle view; and (3) transferring research into practice.

With respect to pavements, one area of focus has been on improving the economic analysis practices to better reflect the most likely expenditures for each pavement alternative over its life time. For example, MIT determined that paving materials (asphalt and concrete) inflate at different rates and by not taking this into account, agencies could inadvertently bias the results and make inefficient choices in their pavement selection. (Swei, Gregory, & Kirchain, 2017) MIT also determined that sustained and viable competition between paving industries can be an opportunity to lower bid costs. (MIT CSub, 2017) The goal of this paper is to summarize the relevant MIT and other pavement competition research to date, and give an overview of practices that Transportation Agencies (TA's) can implement to increase competition.

2 How Inter Industry Competition Impacts Pavement Unit Costs

A basic tenant of economic theory is that when sustained competition exists in a market, the cost for similar goods is expected to go down. However, when discussing competition in the roadway pavement context, it is generally believed that as long as there are multiple contractors bidding, sufficient competition exists. However, it is important to recognize that there are actually two forms of competition in the paving marketplace: (Swei, Miller, Akbarian, & Kirchain)

1. Intra-Industry Competition: Competition between firms that pave with the same material
1. Inter-Industry Competition: Competition between firms that pave with material substitutes

In the majority of the U.S. pavement market (and probably most countries) there is essentially only Intra-Industry competition and very little inter-industry competition. In an analysis of Bid Data from 2009-2014, it was found that well over 90% of all paving projects are bid with only one material (Oman). MIT also found that while the amount spent on concrete and asphalt paving materials varied greatly from state-to-state; no State Department of Transportation (DOT) spent less than 70% of their paving budget on asphalt pavements and that there are several states where virtually no competition exists between these two paving industries (Figure 1).

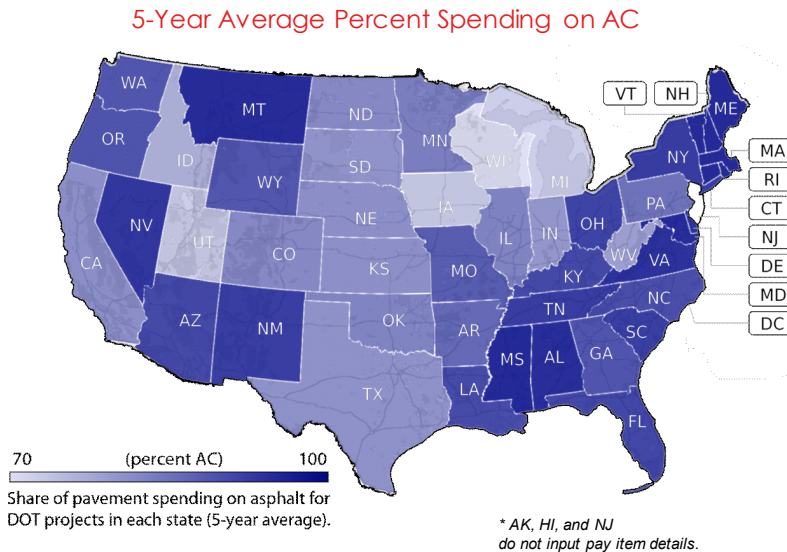


Figure 1: Share of pavement spending on asphalt for DOT projects in each state (5-year average). Alaska, Hawaii, & New Jersey do not report pay items (MIT CSub, 2017)

Based on this basic economic theory (sustained competition lowers the cost for similar goods) and the fact that there is little inter-industry competition, it has been theorised that increasing competition between industries in the pavement-construction marketplace could lower costs and bring a higher return on investment of taxpayer dollars by bringing additional contractors and suppliers to the market. (Figure 2) That is, while competition among contractors that construct a single pavement type does provide some of these benefits; competition between pavement industries brings a second level of competition to the supply chain that would not otherwise occur.

To test if this idea applies in today's highway and pavement sectors, Figure 3 was developed using publicly available highway agency bid information from Oman Systems. Oman Systems provides construction cost data from web-posting of bids submitted on state DOT highway construction contracts. The database contains historical bid tabulation data for 47 states starting from the mid-1990's to 2000's with the exact start date varying from state to state and is updated each month as new data becomes available (Oman). Figure 3 shows the average five-year state unit cost for asphalt and concrete pavements vs the share of market spending of asphalt, which is used as a proxy for competition. The dotted lines represent the 5th and 95th confidence interval of the unit cost for the various competition levels.

The primary item to note is that when competition between pavement industries increases (as indicated by a decreasing asphalt pavement market share), the average unit costs for both concrete and asphalt pavements drop. Several other things can also be concluded. First, asphalt is the dominant pavement material used by all states and the majority of states spend more than 85% of their paving dollars on asphalt pavement. In fact, several states spend virtually all of their pavement dollars on asphalt pavements, meaning that there is no diversification in their pavement investment portfolio (an effective pavement-type monopoly). Secondly, there is a clear trend toward lower unit costs for both asphalt and concrete pavement when the share of pavement spending for asphalt versus concrete decreases from 100% to 60%. In addition, the variability in the unit costs for both materials decreases with increasing levels of competition. Finally, and most importantly, the average five-year state cost data confirms that states that use both pavement types (asphalt and concrete) get a bigger “bang for the buck” than states that use primarily one pavement type. It is also important to note that the States with higher levels of competition tend to be states with a stable and predictable paving program. This implies that sustained programs, for both concrete and asphalt, are important in maintaining predictable and low unit costs. (Mack, Wathne, & Mu, 2016)

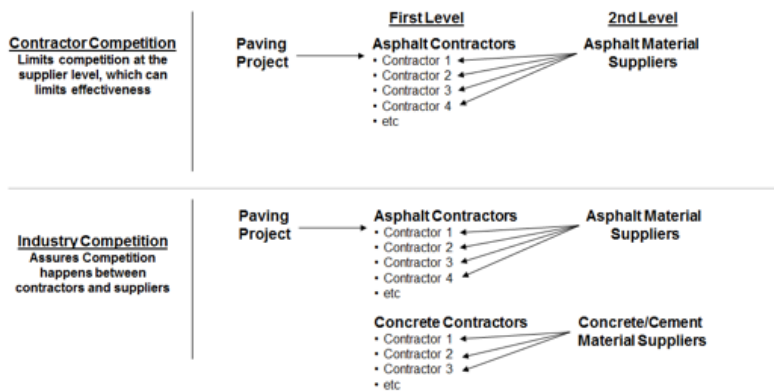
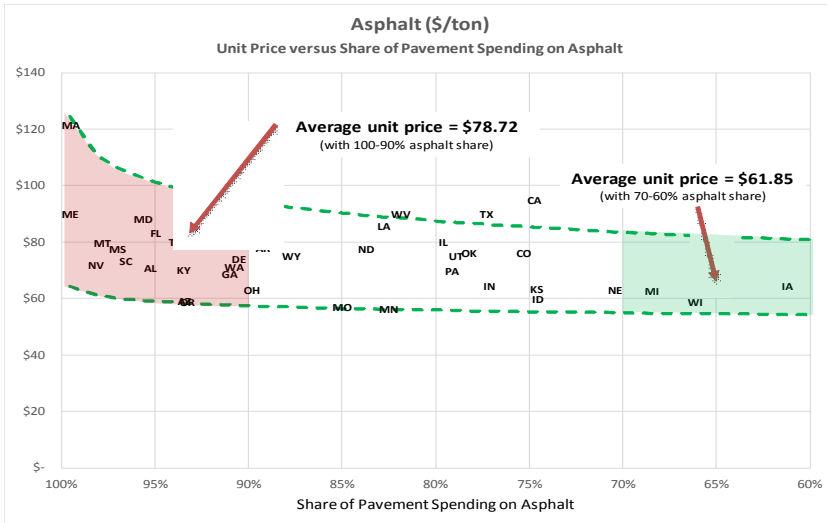
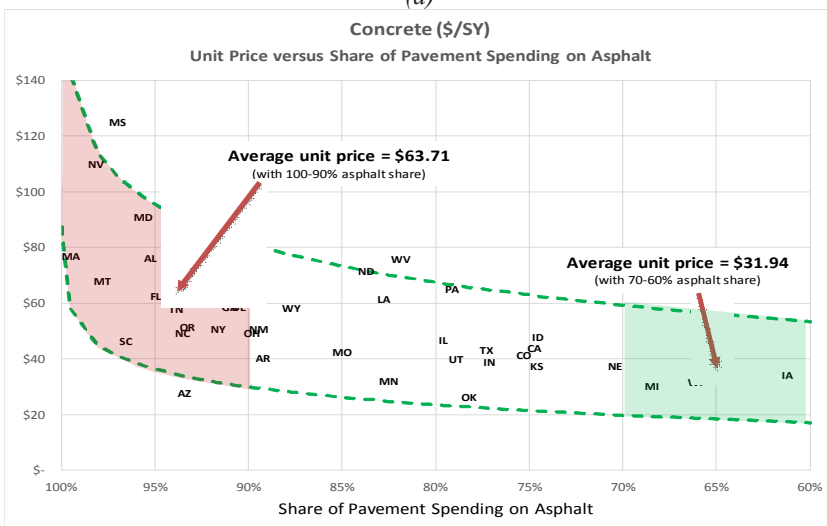


Figure 2. How competition between paving industries adds another level of competition that is not achieved where only one pavement material is used

While the above analysis is insightful regarding the potential benefits, it does not consider other explanatory items that could be influencing costs (such as market size, number of bidders per job; project size, etc.) or provide an indication to what extent or how much increased competition could lower paving material unit costs. To address these issues, MIT initiated a research project to find out which factors have the most influence on pavement unit costs by statistically analyzing historical pavement construction data in the U.S. It was theorized that if inter-industry competition between pavement industries does lower the average unit cost for both asphalt and concrete pavements, then agencies could purposely use and bid both concrete and asphalt on their pavement projects to create competition across paving industries as well as among contractors to lower costs and bring significant savings to the transportation agencies and the taxpayers. (Miller, Kirchain, & Gregory, 2016; MIT CSub, 2017; Swei, Miller, Akbarian, & Kirchain)



(a)



(b)

Figure 3. 2013 weighted unit costs vs. five-year average balance of DOT pavement type usage for asphalt (a) and concrete (b) pavements respectively.

To determine which factors had the most influence on pavement costs, MIT statistically analyzed 10 years (2005-2014) of pavement construction bid and materials pricing data in the U.S. using the Oman BidTabs database. This data represented approximately 298,000 pay items from 164,000 jobs. These items were then filtered to include only asphalt or concrete material pay items and exclude activities that were not representative of legitimate asphalt and

concrete paving items (e.g., curbs, drainage, etc.). For the years 2005 to 2014, this pay item screening process retained 73% of the asphalt pay items representing 94% of the asphalt payment spending, and 57% of the concrete pay items representing 88% of the concrete spending (Miller, Kirchain, & Gregory, 2016).

Next, statistical models were developed to determine what factors have a statistically significant influence on paving material costs, including items like the amount of paving material used in a job, the number of bidders on a job (a metric of intra-industry competition), and the average share of spending in a state on concrete (a metric of inter-industry competition). Finally, bid costs were adjusted to account for year-to-year cost change.

Figure 4 shows the factors that MIT determined had the most influence on paving material unit costs. For asphalt paving materials, the most influential factors impacting unit costs are market size, followed by inter-industry competition, project size, intra-industry competition, and the presence of price-adjustment clauses, which are used primarily for asphalt paving costs. For concrete paving materials, the most influential factors driving unit costs are project size, followed by inter-industry competition, market size, and intra-industry competition. The key thing to note is that for both asphalt and concrete, inter-industry competition that is the second most important factor for lowering both concrete and asphalt pavement unit costs.

Once MIT determined the key factors, they used statistical modelling to estimate the impact that increasing inter-industry competition would have on paving costs. Figure 5 the shows the estimated decrease in paving material unit costs as inter-industry competition increases. Overall, MIT found that States with highest 25% of competition between the asphalt and concrete industries pay 14% less than states with the lowest 25% of competition. As a comparison, increasing intra-industry (same material) competition from the lowest 25% of competition to the highest 25% of competition only reduces costs for an “average” project by 3%. (Swei, Miller, Akbarian, & Kirchain)

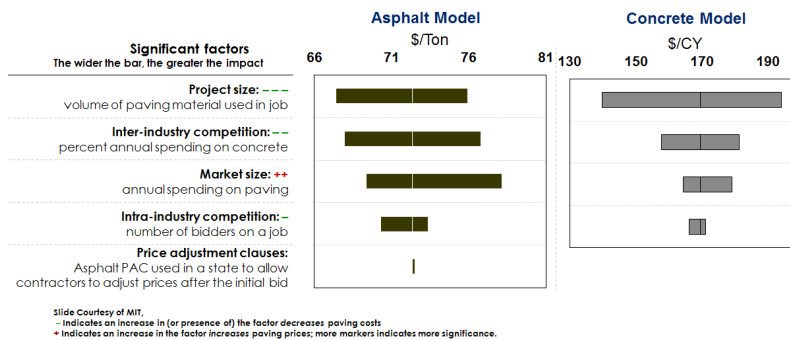


Figure 4: Statistical analysis results showing factors impacting asphalt and concrete initial bid costs

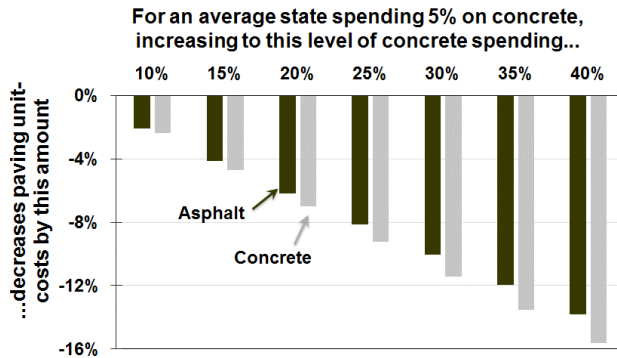


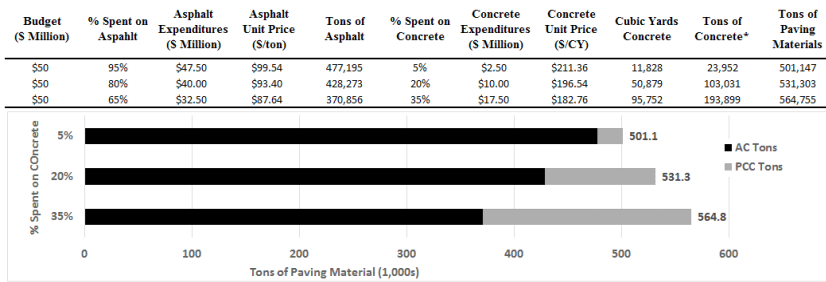
Figure 5: Estimated impact of increased inter-industry competition on asphalt and concrete paving costs

These results thus suggest that policies that increase market diversity (i.e. more balanced paving market share) are more effective in reducing unit costs than simply increasing the number of bidders in the competitive bidding process. That is, agencies that purposely invest in both concrete and asphalt paving over an extended time period will likely pay significantly less for both paving materials and therefore should proactively pursue policies that increase market diversity.

As an example of the tremendous opportunity that purposely increasing competition can have on a TA's purchasing power for paving materials, Figure 6 is a break-even analysis on how different levels of concrete and asphalt pavement usage can impact the amount of total pavement materials that can be purchased for a \$50 million/year pavement investment. In this example, assume an agency spends 95% of the \$50 million/year pavement expenditures on asphalt (line 1 in table 1). At this level, with virtually no industry competition, the asphalt unit cost would be roughly \$99.54/ton and the concrete unit cost would be roughly \$215/CY¹. This buys 477,195 tons of asphalt and 11,828 cubic yards of concrete. If one converts the concrete cubic yards to tons so that the material volumes can be added, it means this \$50 million investment buys 501,147 tons of paving material.

Now suppose the agency instills more competition by introducing a larger portion of concrete pavement into its program (via alternate bidding, programmatic selection or some other means). Assume the state spends the same \$50 million, but this time, only 65% of its budget is spent on asphalt pavement (i.e. less asphalt market dominance). In this case, with industry competition, the asphalt unit cost is \$87.64/ton and the concrete unit cost is \$182.75/cubic yard (based on unit cost decrease in Figure 5). For the same \$50 million budget, the state gets an additional 63,600 tons of pavement material.

¹ Asphalt and concrete prices based on average 2019 CALTRANS Bid Prices for volumes over 1000 tons / 1000 CY thru September 2019. Bid Items 401050 (concrete) and 390132 (asphalt). See <https://sv08data.dot.ca.gov/contractcost/>, accessed Oct 10, 2019



*Assumed unit weight of concrete = 150 lbs/ft³= 2 402.77 kg/m³

Figure 6: Increased Paving Material Volume due to inter-industry competition

Based on the information presented here, it is difficult to argue that instilling competition is not a better business practice that roadway agencies should be using. There are no downsides to fostering two healthy industries to compete for highway projects. In areas where both pavement types are specified on a regular basis, healthy industries with skilled personnel develop; construction quality improves; and risks decline, bringing about more cost-efficient pavement construction and significant savings.

3. Setting Up a Competitive Concrete Paving Program

Transportation Agencies responsible for pavement construction/maintenance have the unique opportunity to influence market dynamics and pricing of pavement materials. Because TA's are the primary purchaser of a major "commodity" (pavement), they can leverage their power on the free market to create inter-industry competition that results in long term bid-pricing changes. The challenge is *how* to set up a program that will instill competition.

One method often tried is the use of Life Cycle Cost Analysis. Life Cycle Cost Analysis (LCCA) is an economic procedure used to compare competing pavement designs, over a defined analysis period, considering all significant costs expressed in equivalent present value dollars. Since alternate pavement designs vary in terms of initial cost and future maintenance requirements, LCCA quantifies the total "costs of ownership" over the pavement life. While LCCA can and should be an essential tool for every TA's in selecting pavement designs that provide the best value; TA's also need to be aware of some of its limitations. First, in a region or state that has had little competition, using LCCA on a small number of projects will not create a competitive environment because the non-dominant (emerging or re-emerging) concrete paving industry is not going to invest resources (equipment, training, education, etc.) unless there is some certainty that the TA is going to let concrete paving jobs in the future. Secondly, in those areas that have no competition, it is extremely difficult to know what the realistic

costs for concrete are. That is, without consistent projects being bid, engineers cannot make reasonable cost estimates for either asphalt or concrete.

An example of this can be seen with a recent concrete project let in Kentucky, USA. The Pennyrite Parkway is a 13.3 mile (21.4 km) long project consisting of a 9-inch (228 mm) thick unbonded concrete overlay on an existing 4-lane concrete pavement plus shoulders. The total concrete pavement area was 595,000 SY (497,495 SM). The project was bid on December 8, 2017 and the Engineer's Estimate was \$52.0M. The winning bid was \$43.2M or 16.9% below the engineer's estimate. If the Kentucky DOT had used the engineer's estimate in a LCCA to determine to do asphalt or concrete, they would have over-estimated its initial cost by almost 17%, which would have made concrete uncompetitive. (KYTC, 2017) This clearly shows why TA's need to bid concrete on a consistent basis – so they have a better idea of what the true costs of concrete pavements are.

Another method often tried is Alternate Pavement Bidding (aka Alternate Design / Alternate Bid). Alternate Pavement Bidding (APB) is a bidding process where two equivalent pavement designs are developed for a given project and the contractor then chooses on which pavement to submit for his bid. The owner then evaluates the proposals using LCCA and the alternative with lowest total "costs of ownership" wins. The advantage of APB is that it is a good, short-term strategy to drive down costs on individual projects by allowing more paving contractors from both industries to participate on that project. Table 1 shows how this practice can lead to lower cost by when used on a system wide basis.

One of the disadvantages of APB is that it requires a second pavement design and set of plans to be developed and as such, the TA has to balance additional plan development costs with potential initial cost savings due to additional competition. Typically, that cost depends on when and how the additional plan set is developed. The Louisiana Department of Transportation and Development (LaDOTD) has been using APB since 1998 and they develop both sets of plans in house, from the very beginning of the project. In doing it this way, LaDOTD has found that the second set of plans cost, on average, an additional 11% (approximately \$2000, which includes an extra 96 hours of design work) per project. However, they have also found that for every \$1 spent on plan development, they save a \$1,000 in construction costs, which is an overall Benefit/Cost (B/C) Ratio cost savings of 1000/1. (Temple, 2010). The Indiana DOT (InDOT) also tracked development cost on one of their projects. In this project, the consultant cost to develop the second plan set was \$32,030, but the estimated construction cost savings was \$325,518 (B/C \approx 10/1) (Duncan & Holtz, 2013). Though not described in the reference, a potential reason for the higher cost was "when" the plans were developed. As stated, LaDOTD does their plan development in house and as part of their normal project development. For this specific project, InDOT had the second set of plans developed later in the design process and by a consultant after the original plans were developed.

Table 1. Documented Savings from State DOT Alternate Pavement Bidding (APB) Practices

Agency Savings from Competition due to LCCA and Alternate Pavement Bidding (APB)	
Indiana (Duncan & Holtz, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Used on 64 projects • On 26 projects evaluated between 2009 and 2011, APB saved the state \$13M in initial costs and an estimated \$93.4M in Life Cycle Costs
Kentucky (Looney, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Used on 44 projects, with a documented savings of \$148M • 32 of the 44 projects had both asphalt and concrete bidders, with only two being awarded to concrete - highlighting the incredible savings potential of increased competition
Louisiana (Temple, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Used APB on 47 projects between 2001 and 2009. Cost savings on these 47 projects is \$120M
Missouri (Ahlvers, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Used on 124 projects through July 2009. APB yielded a 10% decrease in unit costs for both asphalt and concrete
Ohio (Faulkner, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Used on more than 10 projects. An industry study of five projects let in 2009 documented a savings of \$58M.
West Virginia (Hall, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> • WV has used AD/AB on 13 projects. On their 6 of those projects, the state has documented a savings of \$16.4M
New York (Bid results, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Used on first project in in December 2013. The cost savings was between \$1.3 to \$2.6M vs. costs on Non-APB projects
Michigan (MDOT, 2001)	<ul style="list-style-type: none"> • On Michigan's first APB project, the low bid was nearly \$3M less than the engineer's estimate. After considering costs incurred in developing and implementing the APB process for the first time, the net savings was over \$2M
Ontario (Fung, 2006; OMOT, 2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Used on 6 projects between 2000-2006. Total savings were \$28.5M when comparing the lowest concrete vs. the lowest asphalt bids

Another challenge with APB is that if there is no local concrete pavement industry, healthy and spirited competition among the industries cannot take place. Much like this issue in LCCA, no industry is going to invest their resources in buying equipment and training of personnel without some assurances that the TA will be constructing concrete paving jobs in the future. In such cases, other programmatic processes must be used to develop the local capabilities so that future competition can take place.

Finally, it is important to note that the States that have had success with their APB process have involved both the asphalt and concrete paving industries in the development of the process; used appropriate treatments and structurally equivalent concrete and asphalt sections in their designs; compared the bids objectively by using life cycle cost analysis; and adjusted

their bidding and payment practices so that the material quantity risk between asphalt and concrete projects are treated similarly. States that have not had competitive APB processes typically have not due to one of two reasons. The first is that they have not addressed one of the above issues (e.g. equivalent structures) adequately, which demonstrates that the development of guidelines is very important to the process. The second is that there is no local concrete pavement industry and competition among the industries cannot take place. In such cases, other programmatic processes must be used to develop the local capabilities so that future competition can take place. For additional information about developing APB guidelines, see References (FHWA, 2012) and (Hallin, et al., 2011).

The key item to recognize with using either LCCA and APB to obtain the competition savings found by MIT is that these savings can only be obtained once an agency has instilled regular, long term competition into their pavement type selection process and it has become standard practice. It is not possible to have such significant economic savings if competition between industries only occurs on a limited basis.

The likely reason for this is illustrated in Figure 7, which is a modification of from Michael Porter's *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. (Porter, 1980). On the left side of this figure, the emerging/re-emerging industry's (concrete) unit costs drop rapidly as a TA starts to use the new product and its market share rises; however, the dominant industry (asphalt) does not respond and its unit costs continue to grow because it does not feel threatened. Once the emerging industry has captured a noticeable portion of the market share and becomes cost-competitive; the dominant industry perceives the emerging industry as a threat and must either invest to reduce its unit cost or continue to let its costs rise and become un-affordable. As this is unlikely, the net result is that the two industries compete and drive each other's costs down.

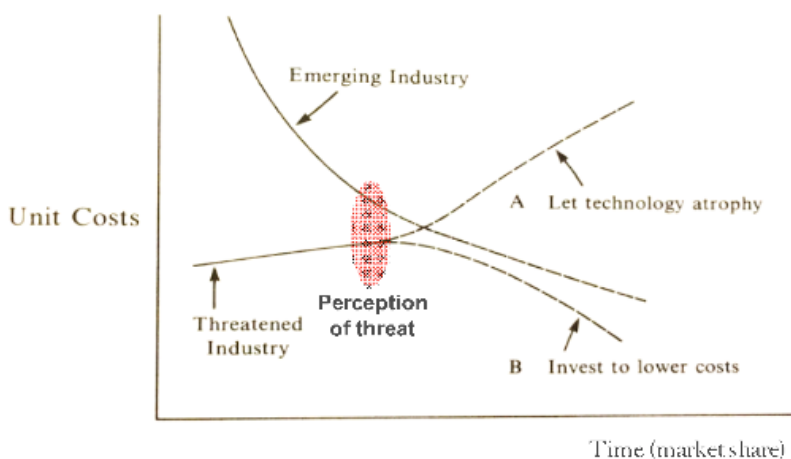


Figure 7. Competitive Strategy and Response in Emerging Industries

That is, without the perception of a threat, the dominant industry is unlikely to compete on price and lower its unit cost until it sees the dominant industry capture a given portion of the market. Similarly, if the emerging (or re-emerging) industry does not foresee that it will be able to capture a significant portion of the market, it is unlikely to invest to become cost-competitive.

One question that remains unanswered at this point is at what market share does the dominant industry start to recognize the emerging or re-emerging industry as a threat. While this has not been answered definitively, one can see in Figure 3 that it occurs somewhere between 10% and 30% of concrete market share (70% to 90% asphalt share). Still, one can look outside the paving industry to how innovations are adopted to get some insight. Figure 8 is adapted from Everett Rogers' Diffusion of Innovations and it shows how innovations and new technology generally get adopted (Rogers, 2003). In this figure, there is a tipping point (shown in pink) at which enough successive groups of users have adopted the new technology (shown in blue) so that its use (shown in yellow) takes off and the innovation becomes part of the accepted, standard practice. This typically around 15-18% market penetration.

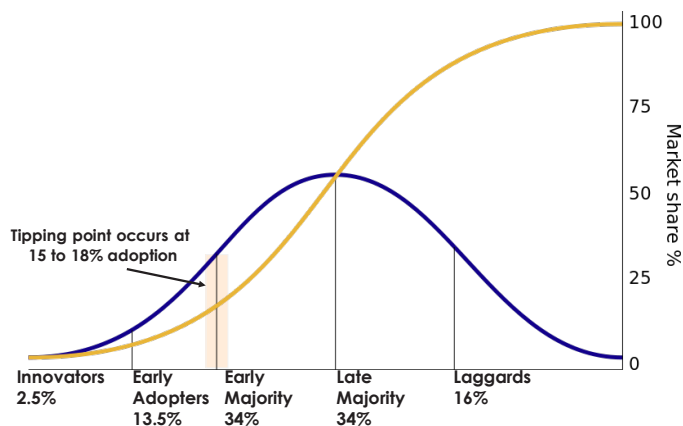


Figure 8: Adoption Curve for Innovations. When the number of adopters reach the tipping point, the innovation is self-sustaining

As such, to capture the benefits of competition, TA's must signal to both the concrete and asphalt paving industries that they are serious about spurring competition between industries by committing to a process that gets both industries involved in the program at approximately 15 to 18% market share for both. Such actions will incentivize both industries to innovate and develop the spirited competition that will lead to lower paving material costs.

3.1 Steps to Setting up a Competitive Paving Program

The following steps can be used to clearly signal that the agency is serious about creating competition between the asphalt and concrete industry paving industries so that they and the stakeholders with TA itself take the necessary steps and make the necessary investments to be competitive.

1) Transportation Agency announces their intention to have a concrete paving program:

TA leadership announces to both industries, designers, consultants, and agency staff that they are committed to having both industries participate in the program. This signals to all stakeholders that the TA is serious and committed to getting the benefits that long-term competition can bring. Without it, projects that could be concrete will not be brought forward during the development stage.

2) TA adopts and uses all cement based / concrete solutions in multiple market applications

TA's often think concrete is a viable option only for new construction or reconstruction of high-volume urban expressways. Concrete has many solutions that can be used in many applications (interstates, state highways, county roads, local streets and roads, arterials, intersections, parking lots, industrial yards, etc.) and all should be used and applied when appropriate (Figure 9).

Finding multiple project types in multiple applications spreads out the market and creates more opportunities for contractors of all sizes. During the announcement of the development a competitive paving program, it is best if the agency publicly states that they will be using multiple solutions in multiple markets to reinforce the idea that there are many options where concrete and cement based solutions can be used. This is also the first signal to the contractors that they should start investing in equipment and training as there will be multiple, new opportunities.

3) TA develops Technical Task Forces to address issues with specifications, design procedures, and other policy / design / construction issues.

Developing task forces with designers, contractors, and agency personnel increases the "buy-in" of the program and further shows that the TA is committed to having both industries participate in the program. These groups should meet several times a year (e.g. quarterly) to work out the details in implementing multiple concrete options and should address all the technical and administrative issues needed to get good concrete pavements. The importance of this step cannot be over-emphasized. Good policies, specifications, and practices lead to good unit costs and good construction; and ensures that the TA gets a pavement that will last and serve them cost effectively. Bad policies, specifications, and practices can mean poor construction and poor performance, which will end up costing more in the long run.

Treatments for Concrete Pavements

Category	Treatment Techniques	Materl. Used	Perform Period*
Maintenance	Crack/joint sealing	AC	5-10
Preservation	Partial / full-depth repair and Slab replacement	PCC	5-15
	Concrete patch using asphalt	AC	1-3
	Joint LTE restoration	-	5-15
Repair	Diamond grinding & grooving	-	10-15
	Open gradation friction course	AC	5-10
	Thin asphalt overlay (2-4")	AC	5-15
	Bonded concrete overlay (2-4")	PCC	10-20
	Thin concrete overlay (4-8")	PCC	10-20+
Rehabilitation	RCC overlay (4-8")	RCC	10-20+
	Asphalt overlay (4-8")	AC	5-20
	Asphalt overlay (>8")	AC	10-20
	Concrete overlay (8-12")	PCC	20-35+
Replacement	RCC overlay (>8")	RCC	15-25+
	New asphalt	AC	10-20
	New concrete	PCC	25-35+
	New Roller Compacted Concrete	RCC	15-30+

Treatments for Asphalt & Composite Pavements

Category	Treatment Techniques	Materl. Used	Perform Period*
Maintenance	Seals (chip/fog/slurry/micro-)	AC	1-5
	Asphalt Rejuvenation	AC	1-5
Preservation	Asphalt Patching/Pothole filling	AC	1-5
Repair	Asphalt cold/hot in place recycling	AC	5-10
	Open gradation friction course	AC	5-10
	Full Depth Reclamation w/ cement	AC	10-20
	Mill / Thin Asphalt overlay (2-4")	AC	5-15
	Thin asphalt overlay (2-4")	AC	8-15
	Ultrathin concrete overlay (2-4")	PCC	8-15
Rehabilitation	Thin concrete overlay (4-8")	PCC	10-20+
	RCC overlay (4-8")	RCC	10-20+
	Asphalt overlay (4-8")	AC	5-20
	Asphalt overlay (>8")	AC	10-20
Replacement	Concrete overlay (8-12")	PCC	20-35+
	RCC overlay (>8")	RCC	15-25+
	New asphalt	AC	10-20
	New concrete	PCC	25-35+
	New Roller Compacted Concrete	RCC	15-30+

Figure 9: Cement / Concrete Based Paving Solutions

4) TA purposely lets a given number of concrete projects each year and develops a Project Pipeline that covers several years

Just as agencies let projects that are only asphalt; TA's must also let some projects that are only concrete. Letting concrete projects shows the local asphalt, earthwork, bridge and other contractors that they need to invest in new equipment and training for the new

business opportunities. Furthermore, letting concrete only bids also gives the TA's a better idea of what the true costs of concrete pavements are. As described above in the Kentucky example without consistent projects being bid, engineers cannot make reasonable cost estimates for concrete pavements.

At this point, it can be advantageous to cultivate both local and out-of-area contractors as check against each other. That is, the outreach to the out of area contractors ensures that there are bidders for the projects and the projects get done. At the same time, it pushes the local contractors to gear up and start bidding because they will not want the work to go the new contractors from out of area.

Developing a project pipeline shows timing of projects and helps contractor plan for their investment and training needs. In developing this pipeline, there are several policies that a TA can use to develop a split between concrete and asphalt projects. Some that have been used in the U.S. are:

- a) Designate a given percentage of projects will be Concrete. This is the process followed by the Florida DOT and they do at least 10% (~40 miles) of concrete pavement per year.
- b) Programmatically balance the market based on some metric such as volumes. The Wisconsin DOT balances their program each year so that Tons of asphalt and square yards of concrete pavement are about the same volume year over year.
- c) Use Traffic or road classifications to designate specific markets for each product. Up until the Mid 1990's, the Minnesota DOT had an ESAL (Equivalent Single Axle Load²) Rule. If a road had less than 1 Million ESALs, it was asphalt and if it had more than 7 Million ESALs it was concrete. Roads with ESALs between 1 and 7 Million went thru an LCCA process.

When announcing their project pipeline, it is important that the TA not only announces the first set or year's projects, but they continually (every year) announce projects for several years out (e.g. 3 to 5 years in advance). This again indicates to the contractors that there is a pipeline of projects and they need to continue buy equipment; train their workers; and be prepared for the concrete pavement program. In addition, publishing the plan lets contractors see what projects will be coming up for bidding so they can plan more effectively.

Finally, this is often the time when a TA will say that they do not have enough money to do concrete because they feel it is too expensive. This is not true. Transportation agencies have money; however, they may be reluctant to allocate money to concrete because they think they will not be able to do as much work. However, as shown in Figure 6, this is a false choice. Purposely investing in both concrete and asphalt paving will significantly lower costs for both paving materials and thus enable the TA to do more. As such, this is

² ESAL is a unit often used by Pavement Design Engineers to describe the number of trucks that a given pavement section must carry. Heavy duty, high volume roadways will have more trucks and therefore more ESALs than lower volume roadways

not an argument of having or not having enough money, it's about how the money should be allocated and it needs to be allocated to increase competition.

5) *Use Life Cycle Cost Analysis and Alternate Pavement Bidding on Specific Pavement Projects*

Once the TA has established and let projects in both concrete and asphalt solutions, and both the concrete and asphalt industries are participating in the program, the TA can use LCCA and APB on specific projects to further drive down costs for that project. At this point, the market has been developed so that effective intra-industry competition can take place.

To instill an Alternate Pavement Bidding proper program, TA's should follow the process outlined by FHWA in their Guidance on Alternate Pavement Bidding (see <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/t504039.cfm>). (FHWA, 2012)

4 Summary

Now more than ever, given the significant economic restraints, growing infrastructure needs, highly uncertain future, and increased public scrutiny; Transportation Agencies need to find effective methods to maximize performance of pavement segments and make their limited infrastructure dollars go farther. As this paper highlights, one very high potential opportunity that should be pursued is increasing inter-industry competition (competition between firms that pave with material substitutes). While competition among contractors that construct a single pavement type does provide some competition benefits; competition between pavement industries brings additional contractors from another industry, and another level of competition to the supply chain that does not occur where only one pavement material is used regularly or exclusively. Furthermore, in an environment where effectively only one industry participates (i.e. one industry essentially guaranteed to get the jobs), the system is much more vulnerable to innovation stagnation and quality challenges (as there is little incentive to invest in either).

Research by Massachusetts Institute of Technology Concrete Sustainability Hub shows that U.S. States with highest 25% of competition between the asphalt and concrete industries pay 14% less than states with the lowest 25% of competition. As a comparison, increasing intra-industry (same material) competition from the lowest 25% of competition to the highest 25% of competition only reduces costs for an “average” project by 3%.

Based on these findings, transportation agencies should proactively pursue policies that increase inter-industry competition as they will over time significantly lower unit cost for both paving materials. Such efforts will help assure the highest return on investment of taxpayer dollars by driving down costs and fostering innovation for the driving public.

5 Acknowledgments:

I would like to thank Dr. Jeremy Gregory, Dr. Randy Kirchain, Dr. Omar Swei and Reed Miller, from the MIT CSHub, and Mr. Leif Wathne from the American Concrete Pavement Association for their work, consultation and guidance on this topic. Their patience, insights and long hours of discussion have greatly influenced my thoughts and ideas on this subject. Likewise, I would like to thank the Portland Cement Association and the Ready Mixed Concrete (RMC) Research & Education Foundation for their continued support of the MIT CSHub. Finally, I wish to thank CEMEX for the opportunity to participate with the MIT CSHub.

6 References

- Ahlvers, D. (2009). MODOT Alternate Pavement Approach., *Presentation to the 2009 AASHTO Subcommittee on Construction*. Chicago, IL.
- ASCE. (2017). *American Society of Civil Engineers*. Retrieved from 2017 ASCE Infrastructure Report Card: <https://www.infrastructurereportcard.org/>
- Bid results. (2013). *Bid results for Project No.D262425, I-86; Exit 20 to the Eastern Project Limit (Bid December 5, 2013). Cost Savings based on comparisons to Project No. D261909 bid May 17, 2012 (this project connected into the ADAB project) and the Weighted Average Item*.
- Duncan, T. L., & Holtz, D. B. (2013, March). *Alternate Bidding History and Requirements*. Retrieved from [http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1231&context=roadschool&sei-redir=1&referer=http%3A%2F%2Fwww.bing.com%2Fsearch%3Fq%3D4.%2509Alternate%2BBidding%2BHistory%2Band%2BRequirements.%2BThomas%2BL.%2BDuncan%252C%2BPE%2B%2528F-HWA%2529%2Band%](http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1231&context=roadschool&sei-redir=1&referer=http%3A%2F%2Fwww.bing.com%2Fsearch%3Fq%3D4.%2509Alternate%2BBidding%2BHistory%2Band%2BRequirements.%2BThomas%2BL.%2BDuncan%252C%2BPE%2B%2528F-HWA%2529%2Band%2B)
- Faulkner, R. (2010, December). New ODOT Policy on Alternate Bids. . *Director of Engineering & Promotion, Ohio Concrete*.
- FHWA. (2012, December 22). *Federal Highway Administration Technical Advisory on Use Alternate Bidding for Pavement Type*. U.S. Department of Transportation. Retrieved from <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/081113.cfm>
- Fung, T. S. (2006). Review of Alternate Bid Tenders for Canadian Highway Construction Projects with Life Cycle Cost Component. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*.
- Hall, J. H. (2010, December). Alternate Design Alternate Bid of Pavements in West Virginia, West Virginia Department of Transportation. *Presentation at the 2010 TxDOT/CCT Concrete Conference*. Austin.
- Hallin, J., Mallela, J., Sadasivam, S., Hein, D., Darter, M., & Von Quintus, H. L. (2011). *Guide for Pavement-Type Selection*. Transportation Research Board. National Cooperative Highway Research Program.
- KYTC. (2017, 12 15). Kentucky Transportation Cabinet, Letting Bid Results. *PENNY-RILE PARKWAY (EB 9004 IN CHRISTIAN & HOPKINS COUNTIES), Project 121GR17D060*. Retrieved from <https://transportation.ky.gov/Construction-Procurement/Pages/Letting-Bids.aspx?letting=12/8/2017&contractId=171260>

- Looney, P. (2013). KYTC Division of Highway Design Pavement Branch. *KYTC Alternate Bid Pavement Projects 2006-2012*.
- Mack, J., Wathne, L., & Mu, F. (2016). Improving Network Investment Results by Implementing Competition and Asset Management in the Pavement Type Selection Process. *Proceedings of the 11th International Conference on Concrete Pavements, Aug 28-Sept 1, 2016*. San Antonio, TX.
- MDOT. (2001, August). *Michigan Department of Transportation-Final Report on the Alternate Bidding of Pavements on the M-6 Southbelt Project*. Retrieved from <http://www.fhwa.dot.gov/programadmin/contracts/sep14mi2001.cfm>
- Miller, T. R., Kirchain, R., & Gregory, J. (2016). *Presence of Competition between Paving Material Substitutes and Impact on Material Costs*. San Antonio, TX: 11th International Conference on Concrete Pavements.
- MIT CSub. (2017, November 27). *Measuring the Impact of Competition on Paving Material Prices*. Retrieved from MIT CSHub: <https://cshub.mit.edu/news/research-summary-measuring-impact-competition-paving-material-prices>
- Oman. (n.d.). Oman Systems, Inc Bid Tabulation Data. Retrieved from <http://www.omansystems.com>
- OMOT. (2012, April). *Ontario Ministry of Transportation. Ontario Ministry of Transportation Direction to Extend Alternative Bid Tendering to Arterial Roads Applauded*. Retrieved from <http://www.cement.ca/en/News-Releases/Ontario-Ministry-of-Transportation-Direction-to-Extend-Alternative-Bid-Tendering-to-Arterial-Roads-Aplauded.html>
- Porter, M. E. (1980). *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. New York: Free Press.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations, Fifth Edition*. London, NY, USA: Free Press.
- Swei, O., Gregory, J., & Kirchain, a. R. (2017). *Probabilistic Approach for Long-Run Price Projections: Case Study of Concrete and Asphalt*. American Society of Civil Engineers, Journal of Construction Engineering Management. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001211
- Swei, O., Miller, T., Akbarian, M. G., & Kirchain, R. (n.d.). Effects of Industry Competition in the Paving Sector. *Under Review*.
- Temple, B. (2010). *Alternate Design Alternate Bid - ADAB - Using Life Cycle Analysis (Former Chief Engineer, LA DOTD)*.
- Urban Institute. (n.d.). *Highway and Road Expenditures*. Retrieved Sept 30, 2019, from State and Local Finance Initiative: <https://www.urban.org/policy-centers/cross-center-initiatives/state-and-local-finance-initiative/state-and-local-backgrounders/highway-and-road-expenditures#Question3Highway>

Quality Assurance and Quality Control in Concrete Pavement Construction

Luc Rens

FEBELCEM/EUPAVE, Brussels, Belgium

Abstract

Concrete roads are well-known for their longevity and durability. However this is only true if the pavement has been properly designed and built in a correct way, using a high quality pavement concrete and other appropriate materials and equipment. The overall performance on the short and/or long term is governed by the weakest link in the system. Therefore it is key to ensure the quality of the finished product through an appropriate system of quality assurance (QA) and quality control (QC). QA focuses on defect prevention while QC focuses on defect identification and taking the necessary steps to improve the process. For a concrete paving project, the QA/QC approach should be applied for the selection of the materials, the production of the concrete mix, the design phase and finally for the construction phase, including all necessary machines and equipment. A good quality management process leads to a finished concrete pavement that meets the expectations of the owner, of the road users and of society. It leads to a longer service life and consequently to a better result in a life-cycle assessment or cost analysis. The benefits outweigh easily the costs related to the QA/QC.

***Keywords:** concrete pavement, design, construction, quality assurance, quality control*

1 Introduction

Concrete roads are well-known for their longevity and durability. However this is only true if the pavement has been properly designed and built in a correct way, using a high quality pavement concrete and other appropriate materials and equipment. The overall performance on the short and/or long term is governed by the weakest link in the system. Therefore it is key to ensure the quality of the finished product through an appropriate system of quality assurance (QA) and quality control (QC). QA is provided by organization management and focuses on preventing defect. It aims at a correct implementation of the approaches, techniques, methods

and processes that are used during the design and construction phase of the concrete paving project. While QA is prevention in nature, QC is a reactive process and is detection in nature. It consists of verifying that the results meet the defined quality standards. Obviously QA and QC, which are both part of a quality management system, are closely linked and related to each other. QA makes sure you are doing the right things, e.g. using the right concrete mix, and QC makes sure that the results of what you've done are what you expected, e.g. the mechanical strength of the concrete and its resistance to de-icing salts.

The benefits of a good quality management programme far outweigh the costs for both the agency and contractors. Indeed, money can be saved by a longer service life and by not needing to replace or repair mistakes or premature failures. In addition it leads to a better result in a life-cycle assessment or cost analysis.

In this paper the QA/QC approach will be presented for different aspects and stages of a concrete road construction project: the materials and the concrete mix, the design phase, the construction phase including all necessary machines and equipment.

2 QA/QC – Materials

Materials selection is critical to the development of a concrete mixture so it will not only meet the project requirements but also positively affect the construction process. Manufacturing concrete with constant composition and characteristics is a prerequisite for constructing a high quality concrete pavement. The nature and characteristics of the constituents of the concrete will affect the mechanical strength and durability of the concrete and will also have an influence on surface characteristics such as evenness, skid resistance and roll-tyre noise production.

In the first place all materials used should conform with the relevant standards applicable in the place of use (ISO, EN, ASTM,...) and/or specific technical prescriptions of the road authorities or owner. Ideally the materials benefit from a quality certification process and associated quality label. But even then it is necessary to check if the certified material or label corresponds to the right domain of application and the right class or category for a specific characteristic.

2.1 Constituents and concrete mix

The use of particles with a high flakiness index should be avoided or limited, as they tend to reduce workability. A general requirement for the flakiness index is not to exceed 20 (FI20 according to European Standard EN 12620) for aggregates with a maximum size $D \geq 16$ mm.

Sand is an important component in the composition of a concrete, because of its influence on mortar quality and on workability. The use of natural rounded sand is recommended, as it benefits workability and generally contains fewer fines ($\leq 63\mu\text{m}$) than crushed sand. On the other hand, a certain amount of fines is required for the cohesiveness of the mortar, to allow the laying and finishing of the concrete.

Precautions should be adopted when the fine aggregate used includes crushed limestone sand with a high percentage of material passing the 500 μm , 250 μm , and 125 μm sieves. In these cases, the concrete can become sticky and in addition, on some occasions an excessive swelling of concrete immediately behind the paving machine has been observed, resulting in an inadequate evenness. Moreover, a certain proportion of siliceous sand (over 30 %) is needed when vehicles circulate directly on top of the concrete mortar (i. e., when coarse aggregates are not exposed) to obtain a surface resistant to abrasion.

The concrete mixture should be proportioned to assure proper compaction without excessive vibration. This is achieved through optimization techniques that develop mixtures containing well-graded aggregates. These mixtures are not harsh and unworkable, flow easily when vibrated and consolidate well around embedded fixtures and reinforcement.

If an exposed aggregate finish is selected, mainly for reasons of noise reduction, it is frequent to prescribe a gap-graded concrete mix in order to facilitate aggregate exposure. In this regard, it should be mentioned that in Austria and Germany, two-layer construction is compulsory for concrete pavements in motorways and expressways. Maximum aggregate size in the upper layer (with a thickness usually between 5 and 8 cm) is limited to 8 or 11 mm.

The water-cement ratio and any admixtures play an important role in the strength and durability of the concrete but also have a direct influence on the consistency of the wet concrete. Care should therefore be taken to keep up a constant moisture content of the mix, by making allowance for the random variations in moisture contents of the constituents. As for admixtures, it will be obvious that their proportioning and introduction in the mix require the greatest possible accuracy to ensure uniform production and constant workability.

Some undesirable characteristics may be caused by incompatibilities among the constituents. Measures to minimize incompatibility problems include the following:

- All admixtures used on the project need to be from the same manufacturer to ensure compatibility among them. Recommended dosages should not be exceeded;
- If Portland cement is blended at the mixing plant with other cementitious materials, e.g. fly ash, all of them should meet the requirements of appropriate standards.

Some incompatibility problems can be exacerbated with increasing temperatures. Therefore, testing the mixture at the expected temperature at the job site is strongly recommended. It is also advisable to have hot and cool weather mixture designs in locations where seasonal differences in temperature are significant.

It is indispensable to subject the concrete mix composition to a preliminary study in order to demonstrate the appropriate characteristics by testing the fresh and hardened concrete such as: workability (measured by slump with the Abrams cone, flow or VeBe time), wet density, air content, water content, concrete strength (compressive strength – flexural strength – splitting tensile strength), water absorption, resistance to alkali-aggregate-reaction, resistance to freeze/thaw and de-icing salts... These laboratory tests on the design mixture are part of the QA and give a good indication on what can be expected during the construction phase.

The same tests (not necessarily all of them) can be done, during the construction phase, on the fresh concrete delivered on site and, after construction, on cores extracted from the concrete pavement. Those tests are then part of the QC. One very important measurement is that of the air content of the fresh concrete on site. Indeed, this content can substantially differ from the one measured in the preliminary study, even if the same amount of air entraining agent was used, due to transport of the concrete mix.

2.2 Other materials

Conformity with applicable standards is also valid for all other materials used on the worksite such as dowels, dowel baskets, tie-bars, chemical adhesive, steel or other type of reinforcement, geotextiles, curing compound, surface setting retarder, joint sealing materials, impregnation product... Special attention should be paid to the efficiency of the curing compound since this will later have a great influence on the strength development of the concrete surface, the behaviour and durability of the pavement, including the risk of plastic shrinkage cracking.

3 QA/QC - Design

Also in the design phase a quality management approach should be followed. The determination of the thickness of the concrete pavement is an essential part of the design. This can be done by calculation, using analytical or finite elements methods, or by standardised design structures in a pavement catalogue. A double check is necessary in order to ensure that the right design input data have been used: bearing capacity of the soil, thickness and characteristics of the subbase and base layer, traffic characteristics (Annual average daily traffic – spectrum of the traffic – spectrum of the tyres...), concrete strength, geometric design of the pavement, expected service life, climatic conditions...

Another important aspect in design, particularly for JPCP (jointed plain concrete pavements) is the drawing of the joint- and reinforcement lay-out. One could think that this is solely a construction issue, but that is not true. During design it is easier to have an overall view of the geometric constraints, to see where transverse and longitudinal joints need to match or not, etc. However it is still possible that this first design plan needs to be adjusted according to modifications during construction, e.g. due to different positions of manholes or a changed phasing of the concreting works, possibly resulting in a different position of construction joints.

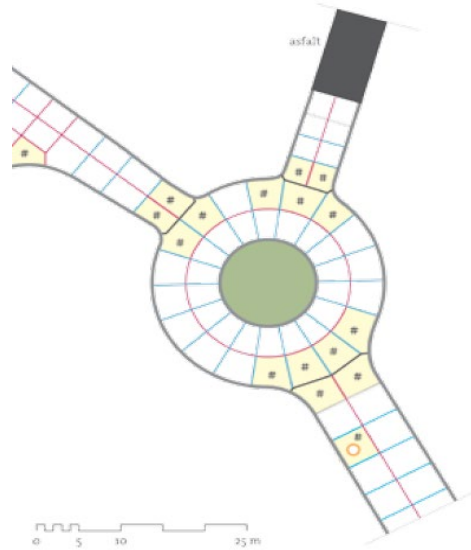


Figure 1. Example of a joint- and reinforcement lay-out.

4 QA/QC - Construction

During the construction phase, QA is often done by following a checklist for the different aspects: machines and equipment, the construction platform (subbase, base, intermediate layer, geotextile), transport and supply of the concrete, reinforcement, progress of the slipform paver, surface finishing, curing and protection, geometry of the finished pavement, joints. The following subsections will be presented under the form of such a non-exhaustive checklist.

4.1 Machines and equipment

- Is the inspection material available?
 - o Straight edge of 3m length
 - o Metallic pin to measure the thickness of the concrete
 - o Topographic equipment
 - o Surveyor's wheel
 - o Concrete testing equipment (Abrams cone, air meter, vibrating table,...)
- Are the trucks and machines available, ready and reliable?
 - o Lorries or truckmixers for the transport of the concrete
 - Are enough vehicles available to ensure a continuous supply of the concrete?
 - Are the lorries equipped with a tarpaulin?

- Wheel crane for spreading of the concrete
- Slipform paver
 - Do all the vibrators function properly?
 - Are spare vibrators available?
- Vibrating screed
- Curing and texturing machine
 - Do all the sprayers function properly?

4.2 Construction platform

- Is the base layer clean? (remove loose stones, mud, leaves, water,...)
- Has the base layer been finished evenly? (check with straightedge)
- In case of warm weather or an absorbing surface of the platform (e.g. unbound aggregate base): is water available to moisten the surface?
- In case of a geotextile: has it been installed correctly? (fixing to the surface, overlapping of strips)

4.3 Reinforcement

- Are the dowel baskets firmly positioned on the platform?
- Are the dowels and or tie-bars correctly positioned on the baskets? (transverse spacing, height, parallel to the road axis)
- Are the places marked where, according to the position of the dowels, joints will need to be sawcut?
- In case of CRCP: is the position of the reinforcement correct? (transverse spacing, height, splicing, connections,...)

4.4 Progress of the slipform paver

- Is there enough space available for the rolling paths of the tracks of the slipform paver?
- Do the rolling paths have the right bearing capacity, surface friction, evenness and width?
- Are the stakes of the guiding stringline stable and at the right spacing (closer in curbs); are the stringlines on the right tension and installed at the correct height?
- If an averaging ski is used, is the surface clean and without obstacles?
- Is the slipform paver moving steadily forward with minimum interruption?



Figure 2. Rolling path of the tracks on an asphalt sandwich layer.

4.5 Surface finishing

- Is a long handled float available for possible final finishing of the surface after the slip-form paver?
- Is the surface finished without adding water?
- In case of finishing by (transverse) brushing: is the texture homogeneous?
- In case of exposed aggregate concrete finish: is the spraying of the setting retarder done in a homogeneous way, in the right quantity, covering the whole surface?

4.6 Curing and protection

- Is the spraying of the curing compound done in a homogeneous way, in the right quantity, covering the whole surface (including the vertical edges) and immediately after concreting?
- In case of exposed aggregate concrete finish: is the curing compound sprayed after the washing out of the concrete?
- If a plastic sheet is used for protection (case of exposed aggregate concrete): is it ballasted on the sides?
- Are plastic sheets available for protecting the fresh concrete in case of rain?
- In case of risk for frost: are insulating panels available for covering the surface?



Figure 3. Protection of the concrete with a curing compound.

4.8 Geometry of the finished pavement

- Is the right thickness achieved? (to be checked every 10 m in the middle of the pavement and at the edges)
- Are the edges stable, sharply aligned and vertical?
- Is there no unevenness (bump, sag), measured with the straightedge? (to be corrected immediately if possible)

4.9 Joints

- If provided, are dowels and/or tie-bars placed in the joints?
- Is there an extra compaction with a poker vibrator along the longitudinal joint?
- Is there an extra compaction with a poker vibrator along the transverse construction joint? (at the end and at the beginning of the work)
- In case of CRCP: are panels in place at the transverse construction joint, to capture the abundant concrete?
- Is the depth of the sawcut sufficient? (at least 1/3 of the concrete thickness)
- Are the joints cut at the right distance, at the right place? (according to the joint- and reinforcement lay-out)
- Are the dimensions of the sawcut, the groove and the chamfer correct?
- Is the timing of sawcutting correct? (not too early to avoid extraction of small aggregates at the joint edge, not too late to cause internal stresses and spontaneous cracking)
- Is the groove clean and dry before applying the sealant?
- If necessary, is the joint varnish applied?
- Is the joint filler placed?
- Is the sealant placed at the right height?

5 Conclusion

Modern concrete roads can be safe, smooth, comfortable and low-noise throughout a very long service life. In addition they are environmentally friendly and economically advantageous. However this is only possible if the pavement has been designed and built in a correct way. In order to achieve this, a quality management plan, consisting of QA and QC, needs to be installed and followed during the whole process. The quality of the finished road will further depend on a good job organisation, efficient concrete manufacture and laying, the use of reliable and well maintained equipment and last but not least the commitment of a qualified team of personnel.

References

- EUPAVE (2017). Achieving and maintaining the evenness of concrete pavements.
- FEBELCEM. Checklist voor de dagelijkse opvolging van de uitvoering van verhardingen in cementbeton (Checklist for the daily follow-up of construction of concrete pavements)
- Federal Highway Administration (2016). Effective quality assurance for concrete paving operations. Best practices for concrete pavements. Tech Brief FHWA-HIF-16-002

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Ülkemiz Karayolları İçin Beton Yol Projelendirme Rehberi Çalışmaları ve Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlıkları

Serdar Kaşak, Muhammet Komut, Şenol Altıok

Karayolları Genel Müdürlüğü, AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Özet

Karayolları Genel Müdürlüğü, 1962 yılında, “Beton Yollar için Teknik Şartname” yayımlamış fakat beton yol çalışma ve uygulamalarında deneme kesimleri hariç geniş bir uygulama alanı sağlanamamıştır. Beton yolda kullanılan malzemeler, ülkemiz kaynaklarından sağlanmakta, hidrolik bağlayıcı olan çimento yurt geneline dağılmış geniş bir üretim potansiyeli olan çimento fabrikalarında üretilmektedir. Ayrıca hazır beton teknolojilerindeki gelişmeler betonun uygulama alanlarında hız, kalite, çeşitlilik, imalat kolaylıkları getirmektedir. Ülkemizin hızlı bir şekilde gelişmesi, ihtiyaçlarının çeşitlilik içermesi, projelerde ülke kaynaklarının kullanılması oldukça büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, ülkemiz karayolu ağında beton yol üst-yapılarında ve projelendirme konusunda destek olması amacıyla AASHTO 93 projelendirme kriterleri esas alınarak “Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi” hazırlanması amaçlanmıştır. Bu bildiride ülkemiz şartlarına uygun projelendirme kriterleri belirlenerek hazırlanan beton yol projelendirme rehberinden alıntılar yapılarak beton sınıfına bağlı olarak beton plak kalınlıklarındaki değişim irdelenmiştir. Ayrıca projelendirme rehberi hazırlanmasındaki amaç ileriki zamanlarda üstyapı mühendislerinin üreteceği projeler için yardımcı olacak başvuru kaynaklarından biri olması hedeflenmiştir.

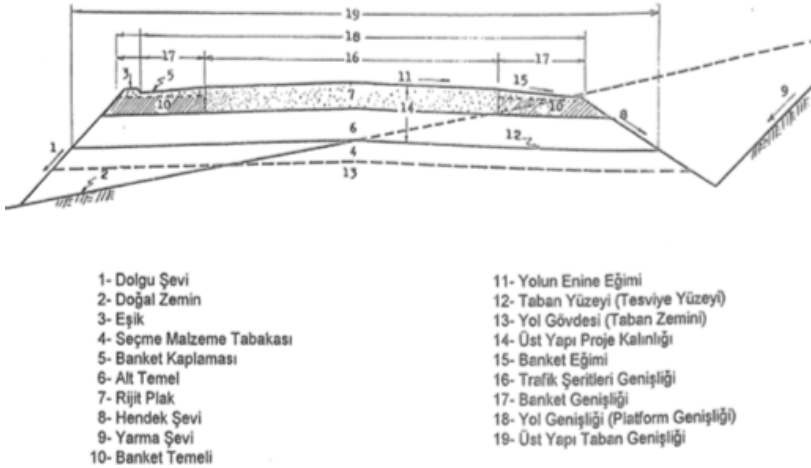
Anahtar Kelimeler: AASHTO 93, Beton Yol, Yatak Katsayısı, Beton Sınıfı, Donatı.

1. Giriş

Yol üstyapısı, kendisini destekleyen yol altyapısından ve trafik yükleri ile birlikte çevresel etkilere maruz kalan üstyapı tabakalarından (esnek, rijit) oluşur.

Hidrolik bağlayıcı olan çimento ile yapılan kaplamaya genel bir tanımlama olarak ve basit bir ifade ile “Beton Yol” diyebiliriz. Beton kaplamanın görevi, trafikten gelen yükleri tabana iletmek ayrıca kendi üzerinde ve tabanda deformasyon oluşmamasını sağlamaya çalışmaktır. Beton yollar genel olarak üstyapı taban zemini üzerine yapılan beton plaktan oluşur. Genel olarak beton kaplama ile üstyapı taban zemini arasına temel/alttemel/seçme malzeme tabakaları konur.

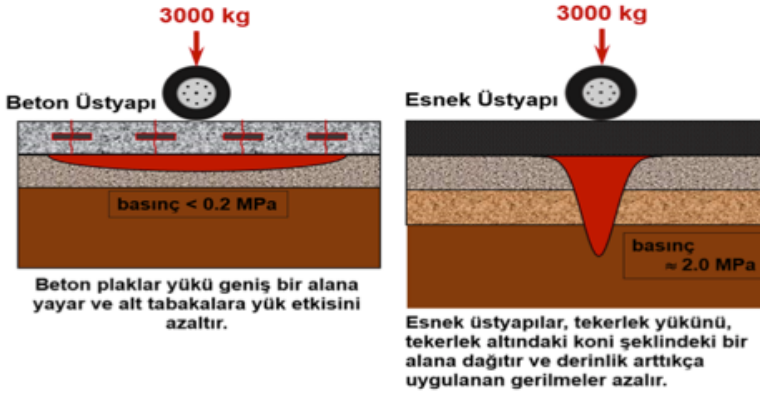
Beton yolların projelendirilmesinde hedef olarak, düşünülen analiz süresi boyunca, üzerinden geçen trafiği büyük miktarda deformasyonlara, çatlamalara çok fazla izin vermeden, güvenli bir şekilde taşıyabilecek beton plağın ve diğer üstyapı tabakaların belirtilmesi ve üstyapıda kullanılacak malzemelerin özelliklerinin belirlenmesidir. Burada beton plağın görevi, trafikten gelen yükleri tabanın deforme olmayacağı bir değere azaltarak tabana iletmektir. Bu betonun sağladığı rijit davranıştan sağlanarak gerçekleştirilir.



Şekil 1. Beton yol üstyapı enkesiti.

Alttemel, temel ve kaplama tabakalarından meydana gelen esnek üstyapılar, trafik etkisinden gelen yükleri taban zeminine iletirken gösterdiği davranış şu şekildedir. Tekerek yükleri etkisinde esnek üstyapı deforme olmakta ve her tabaka, üzerine gelen yükü bir alt tabakaya yayarak iletmektedir. Böylece, taban zeminine iletilen yük kısmen daha büyük bir alana yayılmaktadır. Esnek üstyapıda oluşan gerilmelerin değeri, yolun en üst tabakasından alt tabakalara doğru inildikçe düşmektedir. Bundan dolayı kullanılacak malzeme kalitesi, bağlayıcı malzemenin içeriği de tabakalara göre seçilmektedir.

Beton üstyapılar ise, taban zemini üzerine yapılan beton plaktan meydana gelmektedir. Pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı ve don olaylarının zararlı etkilerini azaltmak için taban zemini ile beton plak arasında alttemel/temel tabakası yapılmaktadır. Beton plağın elastisite modülü taban zemininin elastisite modülünden çok fazladır. Beton plak, taban zeminine oturan bir kiriş gibi çalışır ve trafik yüklerini, esnek üstyapıya göre daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletmektedir. (Şekil 2. beton ve esnek üstyapı yük dağılımı)



Şekil 2. Beton ve Esnek yol üstyapılarda yük dağılımı

2. Beton Yol Üstyapılarının Projelendirilmesi

Hazırlanan projelendirme rehberinde AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials) tarafından geliştirilmiş olan projelendirme yöntemi esas alınmıştır. AASHTO tarafından Amerika Birleşik Devletlerinin Illinois eyaletinin Ottawa şehrinde 1956-1958 yılları arasında inşa edilen deneme yolu üzerinde yapılan çalışmalar projelendirilmeye esas verileri oluşturmuştur. AASHTO Projelendirme Geçici Rehberi 1961'de yayımlanmış, 1972'de ikinci baskı, 1986'da yeniliklerle üçüncü baskı, 1993'te de dördüncü baskı gerçekleştirilmiştir.

2.1 AASHTO 93 Projelendirme Yöntemi

Bu yöntem, analitik-ampirik bir yöntemdir. Analitik olarak modellenemeyen bazı faktörlerin üstyapı performansına etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Bu bakımdan analitik modellerin, performans gözlemleri ve ampirik bağıntılarla kalibrasyonu gereklidir. Bu zorunluluk, analitik-ampirik yöntemleri ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak, analitik-ampirik yöntemler gerçeğe daha yakın, daha başarılı yöntemler olarak ortaya çıkmaktadır. AASHTO 93 projelendirme yönteminde, yük nakli, drenaj katsayısı, elastisite modülleri kullanılarak rijit (beton yol) üstyapıda kullanılan malzemeler elastik modül ile temsil edilebilmiştir. AASHTO 93 Projelendirmesine göre beton yol üstyapı hesabında kullanılan denklem aşağıdaki gibidir.

AASHTO 93 Projelendirme Yöntemi

$$\log_{10}(T_{8,2}) = Z_R \cdot S_o + 7,35 \cdot \log_{10}(d + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \cdot 10^{-7}}{(d + 1)^{0,46}}} + (4,22 - 0,32 \cdot p_i) \cdot \log_{10} \left[\frac{S'_c \cdot C_d \cdot (d^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \left[\frac{d^{0,75} \cdot 18,42}{(E_c/k)^{0,25}} \right]} \right]$$

Şekil 3. AASHTO 93 Projelendirmesi Hesap Formülü

Bu denklemde;

$T_{8,2}$: 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (Proje trafiği)

Z_R : Standart sapma

S_o : Toplam standart sapma

d : Kaplama plağının kalınlığı (inç)

ΔPSI : Başlangıçtaki tasarım servis yeteneği indeksi (p_o) ile son servis yeteneği indeksi (p_i) arasındaki fark

S'_c : Portland çimentolu betonun kopma modülü (psi)

E_c : Portland çimentolu betonun elastisite modülü (psi)

J : Yük transfer (nakil) katsayısı

C_d : Drenaj katsayısı

k : Taban reaksiyon modülü (pci) dür.

2.2 AASHTO 93 Projelendirme Yöntemi Hesap Parametreleri

$T_{8,2}$: 8,2 ton eşdeğer standart tek dingil yükü tekerrür sayısı (Proje trafiği) hesaplarında performans periyodu ve analiz periyodu seçimi önemlidir. Performans periyodu olarak genel beklenti başlangıçtan itibaren 15 yıl içinde iyileştirme/onarım/yüzey yenilemesi/takviye gerektirdiği şeklindedir. Analiz periyodu ise performans periyotlarının toplamı olarak ifade edilebilir. Amerika Birleşik Devletlerinde geçmiş uygulamalarda analiz periyodu genellikle 20 yıl seçilmekteydi. Zamanla elde edilen deneyimlerden yola çıkılarak analiz periyotları sürelerinin artırıldığı görülmüştür. Projelendirme rehberimizde analiz periyotlarının, otoyol, devlet yolları ve il yolları için 30 yıl seçilmesi ve proje trafiğinin buna göre hesaplanması yerinde olacağı belirtilmiştir.

Z_R : Standart Normal Sapma (Z_R), Güvenilirlik Oranları (R)% ve Toplam Standart Sapma (S_o) değerleri; Güvenilirlik, projelendirmesi yapılan üstyapıya ait proje kriterlerinin, belirlenen proje süresi boyunca, hâkim trafik ve çevre koşulları altında, yoldan beklenen projelendirme şartlarını karşılama olasılığı olup, geleceğe yönelik kabul edilen trafik tahminleri ve servis yeteneği indeksindeki sapmaların belirli bir sınır içerisinde tutulabilmesi için güvenilirliğin belirlenmesi gerekmektedir. Projelendirme rehberimizde devlet ve otoyollar için Güvenilirlik oranı (R) % 95, Standart Normal Sapma (Z_R) -1,645 seçilmiştir. İl yolları için Güvenilirlik oranı (R) % 85, Standart Normal Sapma (Z_R) -1,037 seçilmiştir.

S_o : Toplam standart sapma değeri beton üstyapılar için ortalama 0,35 alınır.

d : Kaplama plağının kalınlığı inç olarak bulunur ve cm ye çevrilir.

Δ PSI: Üstyapı mühendisliği konularında deneyimi olan uzmanlardan oluşan bir kurulun, karayolundan yararlanan kimseler sıfatı ile yola verdikleri notların ortalamasıdır. Sıfır (0) ile beş (5) arasında değişen bir ölçek belirlenmiştir. Beş (5) en yüksek, sıfır (0) ise en düşük servis yeteneği derecesini ifade etmektedir. Başlangıç servis yeteneği indeksi (p_o), son servis yeteneği indeksi (p_i) olarak gösterilir. p_o değeri zamanla, trafik yükleri ve çevresel etkilerin altında kabul edilebilir bir p_i değerine doğru düşüş içindedir. AASHTO deneme yolundan p_o değerleri beton üstyapılar için 4,5 olmuştur. Rehberimizde p_i Otoyol, Devlet Yolları için 2,5, İl yolları için ise 2,0 olarak seçilmiştir.

S'_c : Portland Çimentolu Betonun Kopma Modülü (Eğilmede Çekme Dayanımı), beton yol üstyapıların projelendirmesinde kullanılmaktadır. Kopma modülü veya eğilmede çekme dayanımı (S'_c); 'kırılma sırasında erişilen en büyük eğilme-çekme gerilmesi' olarak da tanımlanabilir.

E_c : Portland çimentolu betonun elastisite modülü (psi), (1 Mpa=145,0377 psi)

Rehberimizde Beton Sınıflarına Bağlı S'_c hesabı için AASHTO ve TS 500 e göre hesaplamalar yapılarak ortalama S'_c değeri alınmış ve E_c değerleri ile verilmiştir.

Tablo 1. Beton Sınıflarına Bağlı S'_c ve E_c değerleri

Beton Sınıfı	Karakteristik Silindir basınç dayanımı, (f_{ck}), (MPa)	Karakteristik Küp basınç dayanımı, (f_{ck}) (MPa)	TS 500 eğilmede çekme dayanımı (MPa)	Ortalama S'_c (psi)	E_c (MPa)	E_c (psi)
C 30/37	30	37	3,83	622	32 000	4 641 206
C 35/45	35	45	4,20	660	33 000	4 786 244
C 40/50	40	50	4,43	687	34 000	4 931 281

J: Yük transfer (nakil) katsayısı (J) derzlerde beton üstyapının yük nakletme yeteneğinin, beton üstyapı projelendirilmesinde dikkate alınmasını sağlar. Değişik Projelendirme Koşulları İçin Yük Nakil Katsayıları aşağıdaki tablodan seçilir.

Tablo 2. Yük transfer (nakil) katsayısı

Banket	Asfalt		Beton	
	Var	Yok	Var	Yok
Yük Nakil Elemanı				
Kaplama Tipi				
1) Derzli ve Donatılı Derzli	3,2	3,8 - 4,4	2,5-3,1	3,6 - 4,2
2) Sürekli Donatılı Betonarme	2,9 - 3,2	-	2,3 - 2,9	-

C_d : Drenaj katsayısı, Beton Üstyapılar İçin Drenaj Katsayısı (C_d) değerleri Tablo 3. den seçilebilir. Hesaplamalarda aksi belirtilmedikçe $C_d=1$ alınmalıdır.

Tablo 3. Drenaj Katsayısı

Drenaj Kalitesi	Kaplama Yapısının Doygunluğa Yaklaşan Nem Düzeylerine Maruz Kaldığı Zamanın Yüzdesi			
	<%1	%1-5	%5-25	>%25
Çok İyi	1,25 - 1,20	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10
İyi	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00
Orta	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90
Kötü	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80
Çok Kötü	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80 - 0,70	0,70

k: Taban zemini efektif reaksiyon modülü (yatak katsayısı), taban zemininin yük-defleksiyon ilişkisi lineer olmamaktadır. Taban zemini efektif reaksiyon modülü, plaka yükleme deneyi ile bulunmaktadır. Bu deney uzun zaman almakta olup, özel durumlar haricinde karayolu üstyapı tasarımlarında nadiren gerçekleştirilmektedir. k için tipik değerler Tablo 4. de verilmiştir.

Tablo 4. k, Yatak Katsayısı Değerleri

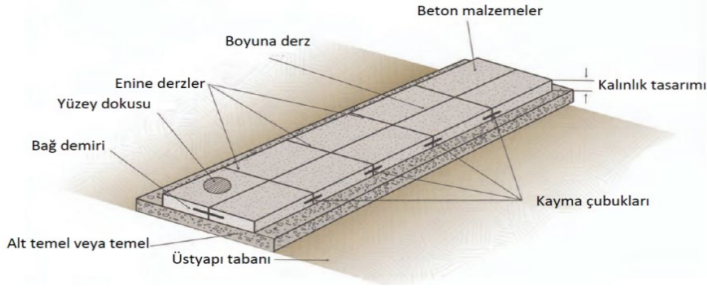
ZEMİN TİPİ	k (pci)
Plastik kil	50-100
Silt ve Siltli kil,	100-200
Kum, killi çakıl	200-300
Çakıl	300-350
Kırmaş (Alttemel/Temel)	350-450

3. Beton Yol Üstyapı Tipleri

- Derzli donatısız beton kaplama, (JPCP) Jointed Plain Concrete Pavement
- Derzli donatılı beton kaplama, (JRCP) Jointed Reinforced Concrete Pavement
- Derzsiz donatılı beton kaplama, (CRCP) Continuously Reinforced Concrete Pavement

Bu çalışmada kullanımı daha yaygın olan ve ülkemiz ekonomik koşullarına daha uygun olduğu düşünülen Derzli Donatısız Beton Kaplamalar (JPCP) üzerinde durulmuştur.

Derzli Donatısız Beton Kaplama, doğal çatlakları kontrol altına almak amacıyla birbirine kayma ve bağ demirleri ile bağlanmış genellikle kare ölçülere yakın anolardan meydana gelen kaplama türüdür. Derzli donatısız beton kaplamalar, trafik yüklerini alt temele aktarabilmek için enine derzler boyunca kayma demiri, boyuna derzler boyunca ise bağ demiri içerirler. Derzli donatısız beton kaplama, kayma demiri veya bağ demiri dışında herhangi bir donatı kullanılmaması nedeniyle maliyet açısından daha uygundur.

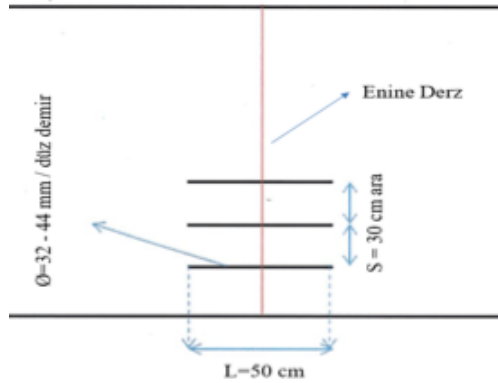


Şekil 4. Derzli Donatısız Beton Kaplamalar (JPCP)

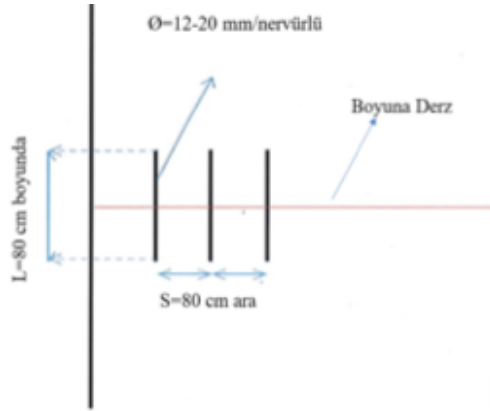
3.1. Derzli Donatısız Beton Kaplamalar (JPCP) İçin Donatı

Kayma demirleri; anti korozyon boya ile boyanmış/yağlanmış düz demir olmalıdır. Genel kullanım 45-50 cm (18-20 inç) uzunluğunda ve 32-38 mm (1,25-1,5 inç) çapında kullanımı yönündedir. Beton plaklar arasında yatay ve düşey yük aktarımını sağlayarak, görelî hareket ve farklı deformasyonları engelleyen bağlantı elemanlarıdır.

Bağ demirleri ise 80 cm (31,5 inç) uzunluğunda ve 12-14 mm (0,5 inç) çapında nervürlü demir kullanımı yönündedir. Bağ demirleri arası mesafe 80 cm tercih edilmektedir. Bağlantı demirleri (nervürlü demirler) boyuna derzler boyunca, plakaların birbirinden ayrılmasını önlemek ve döşemeler arasında yük aktarımına yardımcı olmaktadır.



Şekil 5. Kayma Demirleri Kullanımı



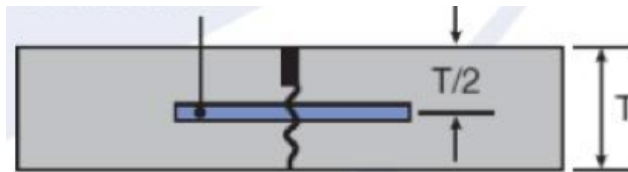
Şekil 6. Bağlantı Demirleri Kullanımı

3.2. Derzli Donatısız Beton Kaplamalar (JPCP) İçin Donatı Yerleşimi

Kayma demiri yatay olarak genellikle beton plağın tam ortasına yerleştirilir.



Şekil 7. Örnek kayma demiri yerleşimi



RŞekil 8. Kayma demiri kaplama kalınlığı ortasına yerleşim kesiti

Kayma demirleri, beton dökümü sırasında hareket etmeyecek şekilde sabitlenmeli ve gerekli bölgelere yerleştirilmelidir. Kayma çubukları özel ekipmanlar yardımıyla beton dökümünden sonra da yerleştirilebilir. Kayma demirlerinin yerleştirilmesinde kullanılan iki yöntem aşağıda verilmektedir.

Beton Dökümünden Önce Yerleştirme: Derzlerin merkez çizgisine dik ve sehpa hizasından doğrudan kesilebilmesi için, sehpaların yerleştirilmesi sırasında özenli davranılmalıdır. Büzülme derzlerinin kesiminde sonradan referans olması açısından, kayma demiri sehpalarının yerini gösteren kalıcı işaretlerin koyulması gereklidir. Sehpalar alttemele beton dökümü esnasında hareket etmeyecek şekilde sabitlenmelidir.



Şekil 9. Beton dökümünden önce kayma demiri sabitlenmesi

Otomatik Kayma Demiri Yerleştirilmesi:Kayma demirlerinin sehpalar üzerinde beton dökümü öncesinde yerleştirilmesine alternatif olarak otomatik kayma demiri yerleştirilmesi yöntemi de tercih edilebilir. Bu yöntem için özel olarak tasarlanan otomatik kayma demiri yerleştirici araçlar kullanılmaktadır. Otomatik kayma demiri yerleştirilmesine örnek fotoğraf aşağıda verilmektedir.



Şekil 10. Otomatik kayma demiri yerleştirilmesi

4. Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlığı

Şekil 3.'de verilen AASHTO 93 Projelendirme hesap formülü kullanılarak Devlet ve Otoyollar için beton plak kalınlıkları bulunmuştur. Hesaplamalarda beton sınıfına bağlı olarak; S'_c : Portland çimentolu betonun kopma modülü (psi), E_c : Portland çimentolu betonun elastisite modülü (psi), değerleri Tablo 1.'den seçilmiştir. Formülde kullanılan diğer parametreler Tablo 5.'in altında verilmiştir.

Tablo 5. Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlıkları Tablosu

Beton Plak Kalınlığı (cm)	Beton Sınıfı C 30/37 Trafik Kategorileri $T_{8,2}$ (Milyon)	Beton Sınıfı C 35/45 Trafik Kategorileri $T_{8,2}$ (Milyon)	Beton Sınıfı C 40/50 Trafik Kategorileri $T_{8,2}$ (Milyon)
20	0 – 3,5	0 - 4	0 - 5
21	3,5 – 4,5	4 - 5,5	5 - 6,5
22	4,5 – 6,0	5,5 - 7,5	6,5 - 8,5
23	6,0 – 7,5	7,5 - 9,5	8,5 - 10,5
24	7,5 – 10	9,5 - 12	10,5 - 13,5
25	10 - 13	12 - 15,5	13,5 - 18
26	13 – 16,5	15,5 - 20	18 - 22,5
27	16,5 - 20,5	20 - 25	22,5 - 28,5
28	20,5 – 26	25 - 31,5	28,5 - 36
29	26 – 32,5	31,5 - 39,5	36 - 45
30	32,5 - 40	39,5 - 49	45 - 56
31	40 - 50	49 - 60	56 - 68,5
32	50 - 61	60 -74	68,5 - 84
33	61 – 74	74 - 90	84 - 103
34	74 – 90	90 - 110	103 - 125
35	90 – 109	110 - 132	125 - 151
36	109 - 131	132 - 159	151 - 181

$$R = \% 95$$

$$Z_R = -1,645$$

$$P_0 = 4,5 \quad P_t = 2,5$$

$$\Delta PSI = P_0 - P_t = 2,0$$

$$S_0 = 0,35$$

$$J = 2,7$$

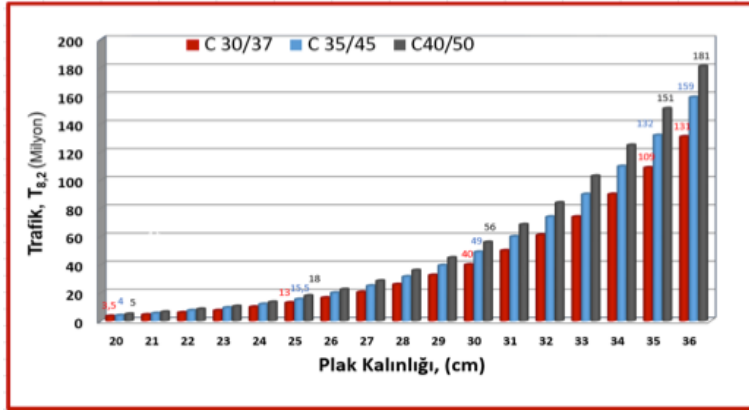
$$C_d = 1$$

$$k = 350 \text{ pci}$$

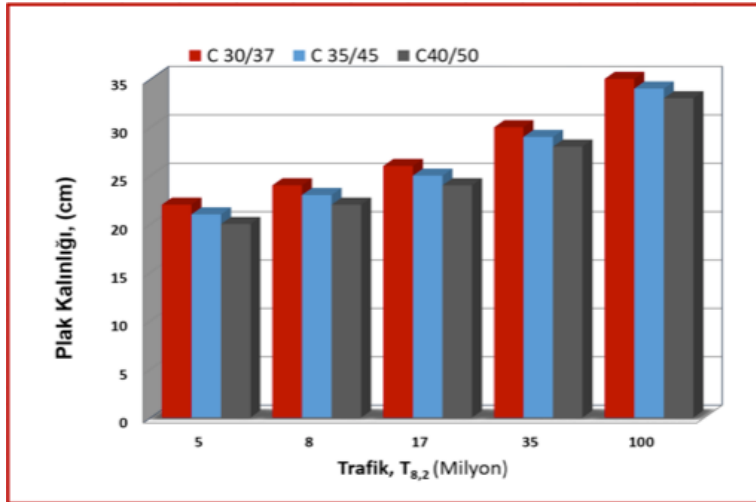
Not: Beton plak altında minimum 20 cm PMT, üstyapı tabanı malzemesi ise minimum yaş CBR %10 olacak malzeme ile teşkil edilecektir.

4.1. Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlığı

Beton sınıfına bağlı olarak E_c ve S'_c değerleri Tablo 1.'den seçilmiştir. Diğer tasarım parametreleri sabit tutularak Tablo 5.'de beton plak kalınlıkları ve bunlara karşılık gelen Trafik kategorileri bulunmuştur. Tablo 5.'den yararlanılarak plak kalınlıklarına bağlı trafik kategorileri grafiği Şekil.11'de, seçilen bazı trafik değerlerinde beton sınıfına bağlı plak kalınlıkları Şekil 12.'de verilmiştir.



Şekil 11. Plak kalınlıklarına bağlı trafik kategorileri



Şekil 12. Plak kalınlıkları-Beton Sınıfı Seçimine bağlı trafik değerleri

5 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Ülkemiz karayolu ağıımızda, sosyal ekonomik koşullar göz önünde bulundurulduğunda ihtiyaçları karşılama ve yapısal çözüm sunması açısından alternatif olarak beton yolların yapılması (arazi çalışmaları, projelendirme) gerekli bir durum arz etmektedir. Bu kapsamda 2017 yılında “Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi” hazırlama çalışmalarına Karayolları Genel Müdürlüğü AR-GE Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü bünyesinde başlanılmıştır.

Beton sınıfına bağlı olarak trafik ve beton plak kalınlıklarının değişimi irdelendiğinde şu çıkarımlara varabiliriz. Şekil 11.’de plak kalınlıklarındaki artışın projelendirme açısından hizmet edebileceği analiz süresi boyunca geçecek trafik kategorisi değerlerini göstermektedir. Beton sınıfına bağlı olarak değişimleri izlediğimizde C 40/50 sınıfı beton sınıfının diğer beton sınıflarına göre aynı projelendirme (analiz) süresi seçildiğinde daha yüksek değerlerde trafik değerlerinde hizmet edebileceği görülmektedir.

Şekil 12. incelendiğinde örnek olarak verilen bazı proje trafik değerleri için C 40/50 sınıfı betonun daha az kalınlıkta yapılarak çözüm ürettiği görülmüştür. Örneğin 17 Milyon proje trafik değeri için C 30/37 sınıf beton kullanıldığında beton plak kalınlığı 27 cm, C 35/45 sınıf beton kullanıldığında beton plak kalınlığı 26 cm, C 40/50 sınıf beton kullanıldığında ise beton plak kalınlığının 25 cm olduğu görülmektedir.

Hazırlanan rehberimizde tasarım açısından daha uygun değerlere sahip olan C 35/45 sınıfı beton kullanımı konusu üzerinde durulmuştur. Hazırlanan bu bildirinin, projelendirme rehberinin projelendirme konusunda faydalı olması temenni edilmektedir.

Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi 2019 yılı içinde tamamlanarak Üstyapı Mühendislerinin, ilgili kurum, kuruluşların, sektör temsilcileri konuyla ilgili tüm paydaşların faydalanabileceği bir kaynak olarak kullanıma sunulmuştur.

6 Kaynaklar

AASHTO Guide For Design of Pavement Structures, (1993).

Kaşak, S., Komut, M., (2019). Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı.

Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, (2016).

Karayolu Teknik Şartnamesi,(2013).

Keys for Successful Construction and Use of PCC Overlays

Mark B. Snyder

Pavement Engineering and Research Consultants (PERC), LLC, Bridgeville, Pennsylvania, USA

Note: The material presented herein is almost entirely extracted from “Guide to Concrete Overlays, Third Edition” (Harrington and Fick, 2014) and a training course based on that document. The author was a member of the Technical Advisory Committee that aided in developing the Guide and is an instructor for the training course based on the Guide.

Abstract

This document is an introduction to the design and construction of concrete overlays of existing pavements. It provides an overview of different types of concrete overlay and the conditions under which each type is best suited for use. General design concepts and typical design procedures are discussed, and some of the most important factors for successful construction are presented.

Keywords: *Concrete Overlay, Whitetopping, Bonded Overlay, Construction, Design.*

1 Introduction

The need has never been greater for engineered strategies to preserve and maintain pavement networks. With shrinking budgets, ever-increasing traffic volumes and loads, and the emerging critical focus on infrastructure sustainability and pavement preservation, highway agencies are being asked to do more with less in managing their pavement networks. Concrete overlays can serve as sustainable and cost-effective solutions for improved management of pavement assets, including preservation, resurfacing, and rehabilitation. In addition, they contribute to more sustainable construction practices by preserving and extending pavement service for years beyond the original design life. More than 1200 concrete overlays have been constructed on U.S. pavements since 1901. Many of these concrete overlays have been in service for decades, effectively extending the life of the original pavement structures for 30 years or more.

To ensure that concrete overlays provide durable, long-lasting maintenance and rehabilitation solutions, good design and construction practices must be followed. This paper presents such practices for the most common types of concrete overlays – bonded concrete overlays of asphalt-surfaced pavement and unbonded concrete overlays of all types of pavement.

1.1 Why Concrete Overlays?

Agencies that regularly construct concrete overlays derive several benefits:

1. Concrete overlays consistently provide cost-effective solutions.
 - a. Dollar for dollar, they are one of the most effective long-term pavement preservation and major rehabilitation options for existing pavements.
 - b. Because of the wide range of overlay thicknesses that can be used, combined with the pre-overlay work required, concrete overlays provide cost-effective solutions for almost any pavement type and condition, desired service life, and anticipated traffic loading.
2. Concrete overlays can be constructed quickly and conveniently.
 - a. The existing pavement does not need to be removed. It is factored into the overlay design to continue carrying some of the traffic load.
 - b. In most cases, only minimal pre-overlay repairs are necessary.
 - c. Concrete overlays are placed using normal concrete pavement construction practices.
 - d. Many concrete overlays can be opened to traffic within a day of placement. Nondestructive strength indicators, like maturity testing, enable engineers to take advantage of this benefit.
 - e. Accelerated construction practices can be used to minimize work zone duration.
3. Concrete overlays are easy to maintain.
 - a. Repairing concrete overlays, especially thin overlays, is usually much easier than repairing a section of conventional pavement.
 - b. Thin overlays constructed without reinforcement can be easily and economically milled out and replaced with a new concrete surface.
 - c. Utility repair locations can be restored to original surface elevation and ride quality with ease.

4. Concrete overlays are an effective means for enhancing pavement sustainability by improving surface reflectance (albedo), increasing structural longevity, enhancing surface profile stability, and maintaining ride quality.
5. Concrete overlays can serve as complete preventive maintenance, preservation, or rehabilitation solutions.

1.2 Overlay Systems and Applicability

Concrete overlays are commonly classified as being either “bonded” or “unbonded” to the underlying pavement system. Both options are applicable to all existing pavement types (i.e., on asphalt, composite, and concrete pavements), as shown in Figure 1.

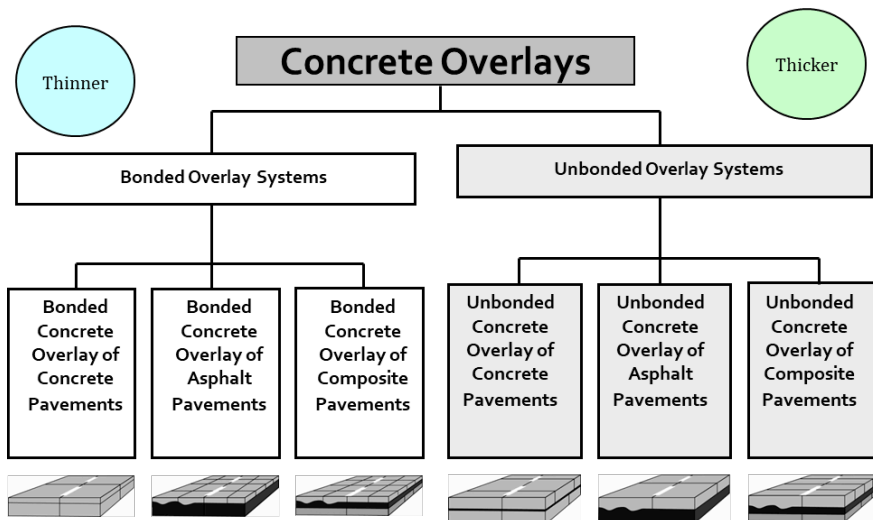


Figure 1. Illustration of system of concrete overlay classifications based on bond condition and type of underlying pavement.

Bonded overlays are generally used to strengthen pavements that are in good condition so that they can carry heavier loads, carry more loads (i.e., extended service life), or both. Unbonded overlays are generally placed over pavements that are in fair or poor condition – capable of serving as a foundation to a new pavement, but not in sufficiently good condition to become an integral part of a renewed pavement surface. Figure 2 illustrates typical uses for bonded and unbonded concrete overlays on pavements with a range of surface conditions.

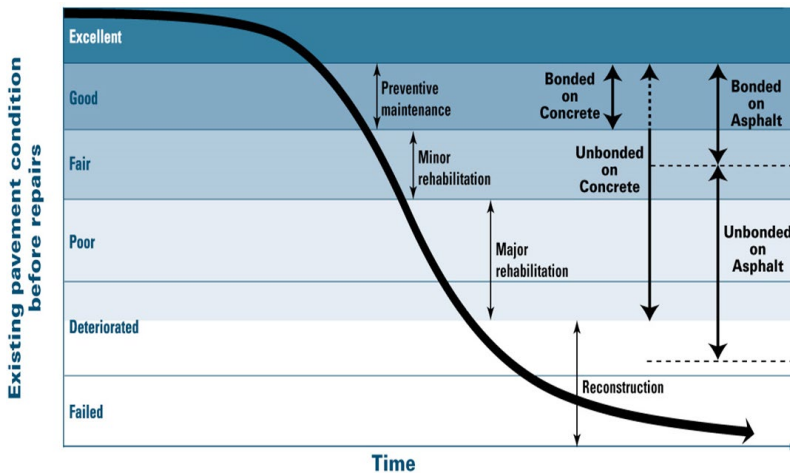


Figure 2. Illustration of applicability of various types of concrete overlays to asphalt and concrete pavements in a range of surface conditions.

It should be noted that the designation of “bonded” or “unbonded” is an assumption for the purposes of overlay thickness design and is not necessarily representative of actual bond between the overlay and underlying pavement under service conditions. For example, an overlay may be designed as “unbonded” because the underlying pavement has significant distress, but the overlay may still develop some degree of bond with the underlying pavement. This “partial” bond is not considered in design and makes the design more conservative, helping to ensure that the overlay will perform as intended.

Special efforts may be taken to ensure that the two layers are unbonded or isolated when any degree of bonding could cause cracks or other defects in the underlying layer to propagate through the overlay, resulting in premature failure. When the overlay is designed as “bonded,” special efforts must be taken to ensure the development of good bond between the two layers or the overlay may fail prematurely.

2 Bonded Concrete Overlays of Asphalt (BCOA)

Bonded concrete overlays of asphalt-surfaced pavements (BCOA) are generally appropriate for asphalt-surfaced roads, streets, and intersections in fair or better structural condition with typical distresses, such as rutting, shoving, slippage, and thermal cracking. They are typically 50–150 mm thick and rely on bond with the existing asphalt pavement (which must be at least

75mm thick at the time of overlay) to form a monolithic pavement section, thereby reducing load-related stresses and deflections and providing additional load-carrying capacity.

BCOA also eliminate surface defects (e.g., asphalt rutting and shoving), provide potential long-term improvements in surface characteristics (i.e., surface friction, tire-pavement noise, and ride quality/smoothness). Concrete overlays of asphalt pavement can also serve to reduce urban heat island effects by increasing pavement surface albedo.

2.1 Functional Concepts

Bonding concrete overlays to asphalt surface allows relatively thin layers of concrete to provide long service life because bonding with the underlying asphalt causes the two layers to act in concert, thereby moving the neutral bending axis down in the overlay layer and reducing tensile stresses at the bottom of the concrete overlay. This concept is shown in Figure 3, where the unbonded system on the left has a neutral axis at the mid-point of each layer while the bonded system on the right acts as a single layer with a single neutral axis somewhere below the midpoint of the overlay.

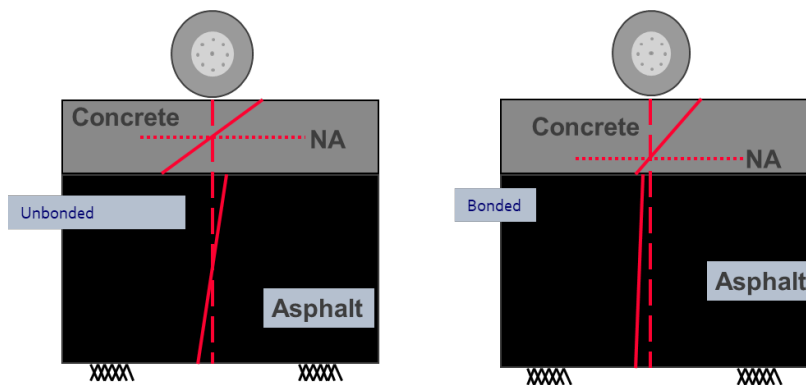


Figure 3. Illustration of applicability of various types of concrete overlays to asphalt and concrete pavements in a range of surface conditions.

The distance of axis shift (and, therefore, the reduction in concrete tensile stress) depends on the thicknesses and stiffnesses of the two layers.

Another feature of BCOAs is the relatively small sizes of the concrete panels. While conventional concrete pavements often have panels up to 5m long and as wide as the travel lane (typically around 3.5m), BCOA panels are usually no more than 2m wide and 2m long and they may be even smaller for very thin overlays. These small panels experience much lower bending stresses and curl/warp stresses than large panels, which makes them very efficient at carrying loads with relatively thin overlays.

2.2 Design

Mechanistic-empirical thickness design of BCOA can be performed with BCOA-ME, a free web-based application that was developed at the University of Pittsburgh with funding from several state highway agencies. The application can be accessed at:

<http://www.engineering.pitt.edu/Vandenbossche/BCOA-ME/>

The AASHTO PavementME Design software is also capable of designing bonded concrete overlays of asphalt using the “short-jointed plain concrete pavement” design module. This software is proprietary and requires an annual fee for access and use.

2.3 Construction

BCOA construction steps typically include: pre-overlay repairs, milling, surface cleaning, concrete placement, curing, joint sawing, and sealing.

The first step in constructing BCOAs is to repair any areas with potholes, moderate-to-severe alligator cracking, and areas with loss of base/subgrade support. These repairs are necessary to ensure uniform support of the overlay and uniform bonding to achieve the desired load-carrying capacity and long-term durability.

The next step is to mill the existing asphalt surface. The main objectives of milling prior to placing a bonded overlay are (1) to remove significant surface distortions that contain soft asphaltic material (these might result in poor bonding), (2) to reduce high spots that would result in thin (weak) spots in the overlay, (3) to reduce the depth of low areas that would require additional concrete fill, and (4) to match curb or adjacent structure elevations. Milling also creates a roughened pavement surface texture that can help enhance concrete bond. In general, however, the depth of milling should be minimized because it results in loss of structural support. There is no reason to mill off good asphalt that can contribute to composite action and continue to help carry traffic loads. It is important to ensure that at least 75mm of asphalt remains after milling; lesser thicknesses provide little structural contribution to the bonded concrete overlay.

The milled surface should be inspected for isolated pockets of deterioration that may require further repairs. For isolated areas that have a high number of wide transverse thermal cracks, a decision needs to be made whether to bridge the cracks with the bonded overlay or to clean and fill the cracks. Concrete can span normal asphalt longitudinal and transverse cracks if the stiffness of the concrete is greater than that of the asphalt layer (which is generally true when the concrete thickness is greater than one-half the asphalt thickness). Filling old cracks with sand, flowable fill, or other appropriate material is necessary only for cracks that have an opening greater than the maximum-size aggregate used in the overlay.

Following milling and any repairs, the asphalt surface should be cleaned to ensure adequate bond between the existing asphalt surface and the new concrete overlay. Cleaning may be accomplished by first sweeping the asphalt surface, then cleaning with compressed air. If

material is subsequently tracked onto the pavement surface, the surface must be re-cleaned. Pressure washing should be considered only when dust control is mandated or when mud has been tracked onto the milled surface. In no case should water or moisture be allowed to stand on the asphalt pavement prior to overlay placement. To prevent contamination, it is important to avoid a lengthy lag time between final surface cleaning and paving.

Concrete placement and paving can be performed with conventional placement and paving equipment when the surface temperature of the asphalt is below about 50°C. When surface temperatures exceed this level, the asphalt surface should be sprinkled with water to reduce the temperature and minimize the chance of early-age cracking. No standing water should remain on the surface at the time the overlay is placed. Water trapped in the milled surface texture can be removed with oil-free compressed air.

Curing is especially critical for BCOAs because their high ratio of surface area-to-volume makes them more susceptible to the effects of rapid moisture loss than conventional paving. Therefore, spray-on membrane curing compounds are often applied at twice the standard coverage rate and must be applied as soon as is feasible (within 30 minutes of concrete placement, if possible). The finished product should appear as a uniformly painted solid white surface, with the vertical faces along the edges of the overlay also thoroughly coated.

Timely joint sawing is necessary to prevent random cracking. Joint sawing should commence as soon as the concrete has developed sufficient strength so that joints can be cut without significant raveling or chipping. Lightweight, early-entry saws may be used to allow the sawing crew to get on the pavement as soon as possible. With typical joint spacings of 1 to 2 meters, extra saws are often needed to avoid random cracking. Transverse joints can be sawed with conventional saws set to a depth of T/3. Transverse joint saw-cut depths for early-entry sawing should not be less than 30 mm. Longitudinal joints should be sawed to a depth of T/3.

Contraction and construction joints should be filled with a hot-poured joint sealant to minimize water infiltration, which can accelerate loss of bond between the layers, especially in freezing climates.

2.4 Jointing

BCOA joints are typically cut to produce panels that are roughly square with sides measuring approximately 1m long for thicknesses of 75mm or less and approximately 2m long (half-lane width) for overlay thicknesses of 75 – 150mm. Care must be taken to make sure that selected panel dimensions do not result in the placement of longitudinal joints within the wheel paths because corner cracking of panels often results in these situations.

Thin concrete overlays usually do not include dowel load transfer devices and may not include tie bars as well. Some degree of joint load transfer is achieved through aggregate interlock, which is effective if the joints do not open very much. The use of structural fibers in the concrete mix can help to resist joint opening and maintain better aggregate interlock load transfer.

2.5 Use of Structural Fibers

When properly used, newer fiber-reinforcing technology can be used to enhance the performance of thin concrete overlays by: increasing concrete toughness (making it more resistant to crack propagation); helping control differential slab movement caused by curling/warping, heavy loads, temperatures, etc. (allowing longer joint spacing); increasing resistance to plastic shrinkage cracking; and holding cracks tight (enhancing aggregate interlock load transfer and improving pavement performance).

Steel fibers have a long, successful history in paving applications, but synthetic macro-fibers have become the fiber of choice in recent years due to their ease of handling, better dispersion characteristics (i.e., less “balling”), and resistance to rust damage. Structural synthetic macro-fibers (conforming with ASTM C116 Type III, Section 4.1.3) are commonly used at dosage rates of 1.8 – 3.0 kg/m³.

3 Unbonded Concrete Overlays

The purpose of an unbonded overlay is to restore structural capacity to an existing pavement that is moderately to significantly deteriorated. The overlay performs as a new pavement, and the existing pavement is intended to provide a stable base (after any required pre-overlay repairs).

When the underlying pavement has an asphalt surface, incidental bonding between the concrete overlay and the underlying asphalt layer should not cause a problem; in fact, such bonding generally adds some load-carrying capacity to the system. For these systems, the unbonded concrete overlay is not usually rigorously designed or constructed to prevent bonding between the layers.

When the underlying pavement is concrete, however, unbonded concrete overlays are carefully designed and constructed to prevent bonding between the two concrete layers because any bonding between the two concrete layers may stress the overlay and result in undesired reflective cracking.

Unbonded concrete overlays (UBOL) may be an appropriate long-life rehabilitation solution for asphalt-surface pavements for asphalt pavements with significant deterioration such as severe rutting, potholes, alligator cracking, subgrade/subbase issues, shoving, and pumping. The overlay is essentially designed as a new concrete pavement on a stable base layer (the original pavement) assuming an unbonded condition between the layers. Typical UBOL thicknesses range from 150–280 mm, although they have been successfully constructed as thin as 100mm on lower-volume roads. The result is: restoration or increase of structural capacity; elimination of rutting, shoving and other surface defects; improvement of surface friction, tire-pavement noise and ride quality; and reduction of urban heat island effects by increasing pavement surface albedo.

UBOLs may also be appropriate long-life rehabilitation solutions for concrete pavements in poor condition, but the existing pavement should be stable and provide uniform support (or repaired to that condition). UBOLs of concrete pavement are also designed as a new concrete pavement on a strong, stable base layer and assuming an unbonded condition between the layers. Typical UBOL thicknesses and benefits are similar to those listed above for UBOLs of asphalt-surfaced pavement.

3.1 Design

UBOLs are designed similarly to new concrete pavements on a stabilized subbase, assuming a separated condition between the layers. The required overlay thickness is affected by: 1) the desired load-carrying capacity and service life; 2) the effective support provided by the subgrade and any base layers (including existing asphalt pavement); and 3) the condition of any existing concrete pavement.

UBOLs are commonly designed using the AASHTO Design Guide (1993, 1998) or the newer AASHTO PavementME Design software (AASHTO 2014); both of these procedures consider the effects of the separation layer on overlay performance.

3.2 Construction

Construction of UBOLs may include pre-overlay repairs, placement of a separation layer, placement and consolidation of concrete, texturing, curing, and joint sawing.

Only distresses that cause a major loss of structural integrity require pre-overlay repair. Repairs are not usually needed for significantly distressed areas that are not shifting or moving and for which the pavement support is stable. When numerous repairs are needed, it is sometimes an alternative to not perform repairs and instead design the overlay with added thickness to compensate for the reduced level of support.

The use of an effective separation layer is essential for UBOLs of concrete pavement and may help ensure good performance of UBOLs of asphalt-surfaced pavement as well. A new asphalt concrete interlayer (thickness = 25 – 75mm) has historically been the most common interlayer material, but geotextile fabrics are rapidly gaining in use because of their lower cost, speed of construction and reduction of pavement profile elevation (that can result in reduced clearance under overpasses and the need to adjust safety barrier heights). Table 1 provides specifications for typical geotextile interlayer material. When asphalt materials are used, they must be resistant to stripping and may also be designed to provide drainage.

Table 1. Properties of typical geotextile fabric separation layer materials.

Property	Requirements	Test Procedure
Geotextile Type	Nonwoven, needle-punched, no thermal treatment to include calendaring†	EN 13249, Annex F (Certification)
Color	Uniform/nominally same color fibers	(Visual Inspection)
Mass per unit area	≥ 450 g/m ² (13.3 oz/yd ²)* ≥ 500 g/m ² (14.7 oz/yd ²) ≤ 550 g/m ² (16.2 oz/yd ²)	ISO 9864 (ASTM D 5261)
Thickness under load (pressure)	[a] At 2 kPa (0.29 psi): ≥ 3.0 mm (0.12 in.) [b] At 20 kPa (2.9 psi): ≥ 2.5 mm (0.10 in.) [c] At 200 kPa (29 psi): ≥ 0.10 mm (0.04 in.)	ISO 9863-1 (ASTM D 5199)
Wide-width tensile strength	≥ 10 kN/m (685 lb/ft)	ISO 10319 (ASTM D 4595)
Wide-width maximum elongation	≤ 130 percent	ISO 10319 (ASTM D 4595)
Water permeability in normal direction under load (pressure)	≥ 1 x 10 ⁻⁴ m/s (3.3 x 10 ⁻⁴ ft/s) at 20 kPa (2.9 psi)	DIN 60500-4 (modified ASTM D 5493)
In-plane water permeability (transmissivity) under load (pressure)	[a] ≥ 5 x 10 ⁻⁴ m/s (1.6 x 10 ⁻³ ft/s) at 20 kPa (2.9 psi) [b] ≥ 2 x 10 ⁻⁴ m/s (6.6 x 10 ⁻⁴ ft/s) at 200 kPa (2.9 psi)	ISO 12958 (ASTM D 6574)* or ISO 12958 (modified ASTM D 4716)
Weather resistance	Retained strength ≥ 60 percent	EN 12224 (ASTM D 4355 @ 500 hrs exposure for grey, white, or black material only)
Alkali resistance	≥ 96 percent polypropylene/polyethylene	EN 13249, Annex B (Certification)

The surface temperature of the separation layer must be less than 50°C at time of concrete placement to minimize the potential for early-age overlay cracking. This can be accomplished by sprinkling the surface with water. No standing water should remain on the surface at the time the overlay is placed. When cooling a black-colored geotextile interlayer, it should be damp and not saturated with water.

Conventional concrete paving procedures are followed for placing, spreading, consolidating, finishing and texturing UBOLs. Special care must be taken to ensure that dowel baskets are securely anchored to the interlayer material and/or original pavement surface; alternatively, pavers equipped with dowel bar inserters can be used.

Good curing practices are important, especially when overlay thickness is less than 150mm because of the high surface-area-to-volume ratio. In such cases, spray-on membrane cure is typically applied at twice the usual rate. Curing should begin as soon as possible and no later than 30 minutes after concrete bleed water has evaporated.

Timely joint sawing is necessary to prevent random cracking. Transverse and longitudinal joints should be sawed with conventional saws to a depth of T/3. Transverse joint saw-cut depths for early-entry sawing should not be less than 30 mm.

3.4 Jointing

UBOL joints are typically cut to produce panels that are roughly square. When the overlay thickness is 150mm or less, panels are typically about 1.8m square and maximum panel length should not exceed about 18 times the overlay thickness. For thicker overlays, panels are often the full width of the travel lane (~3.5m) and maximum panel length is limited to no more than about 24 times the overlay thickness. For overlays of concrete pavement, overlay joint

locations do not need to match (or avoid matching) the positions of joints in the underlying concrete pavement.

Load transfer dowels and longitudinal joint ties are typically used in UBOLs, especially when overlay thickness exceeds 150-175mm. These devices should be designed using the same criteria and procedures used for conventional concrete pavement. In thinner UBOLs without load transfer dowels and lane ties, the use of structural fibers in the concrete mix can help to resist joint opening and help to maintain aggregate interlock load transfer, especially when using geotextile fabric interlayer materials (because they provide little resistance to lateral pavement movement).

4 Summary and Closure

There are concrete overlays options for pavements of all types and existing conditions. To ensure that concrete overlays provide durable, long-lasting maintenance and rehabilitation solutions, good design and construction practices must be followed. This paper presents key design and construction concepts and practices for successful construction of the most common types of concrete overlays. The recommendations provided are based on experience gained in the U.S. from more than 1200 concrete overlays, many of which have been in service for decades.

Acknowledgments

The material presented in this paper is almost entirely extracted from “Guide to Concrete Overlays, Third Edition” (Harrington and Fick, 2014) and a training course based on that document. The author was a member of the Technical Advisory Committee that aided in developing the Guide and is an instructor for the training course based on the Guide.

The author would like to thank and acknowledge the contributions of the authors, the contributing technical authors, the members of the Technical Advisory Committee, the technical illustrator and the editors for the “Guide to Concrete Overlays, Third Edition” (Harrington and Fick, 2014). The author also gratefully acknowledges the National Concrete Pavement Technology Center and the American Concrete Pavement Association for their roles in sponsoring, assembling and producing the Overlay Guide document.

References

- AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures, 4th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA.
- AASHTO (1998). Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 4th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA.
- AASHTO (2014). AASHTOWare Pavement ME Design Software. www.aashtoware.org. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA.
- Harrington, D. and Fick, G. (2014). Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements (3rd edition). TB021.03P. American Concrete Pavement Association, Rosemont, Illinois, USA.

Yansıma Çatlağı Oluşumu Açısından Kompozit Bir Üstyapının Performansının Belirlenmesi

Dr. Yavuz Abut

Kocaeli Büyükşehir Belediyesi, Kocaeli, Türkiye

Özet

Yansıma çatlağı oluşumu, rijit veya esnek üstyapılar üzerine inşa edilen asfalt kaplamalardaki temel bozulma tiplerinden biridir. Bu çatlaklardan su veya yabancı maddeler yol gövdesine sızarak kaplama yapısını bozar, sürüş kalitesini düşürerek yolun servis ömrünü kısaltır. Bu çalışma kapsamında, PavementDesigner.org yazılımı ile bir kompozit üstyapı tasarlanmış, yazılımdan elde edilen kesit özellikleri kullanılarak 2017 Nisan ayı itibariyle bir test yolu yapılmıştır. Sürekli gözlenen bu yolda, 2019 Eylül ayı ile ilk yansıma çatlağı gözlenmiş ve literatürdeki yansıma çatlağı hasar modelleri kullanılarak kaplamadaki toplam hasar oranı belirlenmiştir. Toplam uzunluğu 928 m olan, yapımından 2,5 yıl süre geçen ve sürekli gözlenen bu yolda yansıma çatlağı hasar oranı %6,1 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulguların ilerleyen zamanlarda yapılması planlanan kompozit üstyapılar için bir performans göstergesi olarak kullanılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit üstyapı, yansıma çatlağı, performansa dayalı tasarım

1 Giriş

Yansıma çatlağı oluşumu, rijit veya esnek üstyapılar üzerine inşa edilen asfalt kaplamalardaki temel bozulma tiplerinden biridir. Bu çatlaklardan su veya yabancı maddeler yol gövdesine sızarak kaplama yapısını bozar, sürüş kalitesini düşürerek yolun servis ömrünü kısaltır. Bu tür kaplamaların uzun dönem performansının bilinebilmesi için, ileriki dönemlerde trafik ve sıcaklık etkisi ile meydana gelebilecek olası yansıma çatlaklarının bir tahmin modeli ile belirlenmesi gerekmektedir. Bazı araştırmacılar yansıma çatlaklarını tahmin etmek için birtakım yöntemler üzerinde çalışmışlardır (Andrei v.d., 1999, Eltahan ve Lytton, 2000, Elseifi ve Al-Qadi, 2004, Bari ve Witczak, 2006). Ancak, bu modellerin kalibrasyonu için sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır. Yansıma çatlağı ile ilgili sorunların etraflıca ele alınabilmesi için

mekanik-ampirik prosedürlerle inşa edilen test yollarında daha çok gözlem ve ölçüm yapmaya ihtiyaç vardır. Çünkü kaplamalarda kullanılan malzeme özellikleri, derzlerin yük transferi kabiliyeti, yolun sınıfı, iklim ve zemin durumu gibi parametreler yansıma çatlağı oluşumunda önemli derecelerde farklılıklar doğurmaktadır (Tsai, 2010).

Yansıma çatlakları, büyük ölçüde asfalt kaplama altındaki süreksizliklerden (çatlak veya derzler) kaynaklanmaktadır. Çatlak gelişimi, katmanlar arasındaki termal genişleme farklılıkları ve trafik yükleri ile aşağıdan yukarı doğru ilerler. Yoğun çatlakların olduğu eski bir kaplama üzerine yapılacak olan yeni bir asfalt kaplamada ara yüzeyde çatlak sönümleyici bir yapı (geosentetik, geogrid, çelik tel, vb.) kullanılmamış ise mevcut kaplamadaki çatlaklar, genellikle kaplama kalınlığının bir fonksiyonu olan bir sürenin sonunda yüzeye doğru hareket eder. Lytton, 1989'a göre, tekerlek yükünün mevcut kaplamada bir çatlaktan geçmesi o kesitte bir maksimum eğilme ve iki maksimum kayma gerilmesi olmak üzere üç kritik kesit tesirine neden olur. Çatlak hareketi arttıkça, çatlağın yüzeye doğru ilerlemesi hızlanır. Katmanlar arasındaki sıcaklık farklılıklarının rijit kaplamalarda meydana getireceği büzülme (contraction) veya kıvrılma (curling) hareketi ise, asfalt kaplamada ekstra yatay gerilmelere neden olur ve mevcut çatlakların açılma süreci hızlanır. Dolayısı ile bir yansıma çatlağının doğru bir şekilde modellenebilmesi için trafik yükleri ve sıcaklık etkileri bir arada düşünülmelidir.

Bu çalışmada, *PavementDesigner.org* yazılımı ile bir kompozit üstyapı tasarlanmış, yazılımdan elde edilen kesit özellikleri kullanılarak 2017 Nisan ayı itibarıyla bir test yolu yapılmıştır. 928 m uzunluk ve 1x1 olan bu kompozit üstyapıda sırasıyla Kırmataş Temel (30 cm), Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) (22 cm), HMA Binder (7 cm), HMA Aşınma (5 cm) kullanılmıştır. Sürekli gözlenen bu yolda, 2019 Eylül ayı ile ilk yansıma çatlağı gözlenmiş ve literatürdeki yansıma çatlağı hasar modelleri kullanılarak kaplamadaki toplam hasar oranı belirlenmiştir. Elde edilen bulguların ilerleyen zamanlarda yapılması planlanan kompozit üstyapılar için bir performans göstergesi olarak kullanılması hedeflenmiştir.

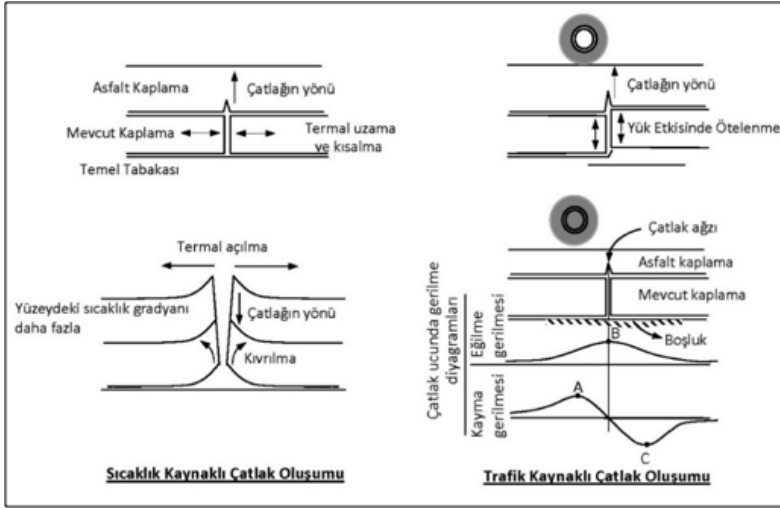
2 Yansıma Çatlağı Mekanizması

Yansıma çatlağı konusu Gary ve Martin, 1932'de bu sorunu çalıştığından bu yana, kompozit üstyapılarda ciddi bir endişe kaynağı olmuştur. O zamandan beri, bu sorunu çözmek için birçok çalışma yapılmıştır. Yansıma çatlağının analiz ve tahmininde birçok model geliştirilmiştir.

Genel olarak bunlar;

- Ampirik model
- Genişletilmiş çok katmanlı doğrusal elastik model
- Denge denklemlerine dayalı modeller
- Sonlu elemanlar ile geleneksel yorulma denklemi modeli
- Sonlu elemanlar ile kırılma mekaniği modeli
- "Crack Band Teorisi" temelli model
- Koheziv çatlama / bölge modeli
- Yerel olmayan süreklilik hasarı modeli

Yansıma çatlağı mekanizması sırasında kesitlerde oluşan kesit tesirleri ise Şekil 1'de gösterilmiştir (Nunn, 1989 ve Lytton, 1989).



Şekil 1. Sıcaklık farklılıkları ve trafik yükünün neden olduğu kesit tesirleri (Nunn, 1989 ve Lytton, 1989).

Paris'in çatlak büyüme yasası, asphalt gibi doğrusal olmayan viskoelastik malzemelerdeki çatlak yayılımı ve gerilme yoğunluğu faktörleri ile malzeme yorulma özelliklerini arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılabilir. Paris'in yasası matematiksel olarak şöyle ifade edilir (Anderson, 1995):

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (1)$$

Burada,

dc/dN : Yük döngüsü başına çatlak ilerlemesi

K : Gerilme yoğunluğu faktörü

A, n : Deneysel olarak tespit edilen malzeme sabitleri

Denklem 1 temel alınarak yürütülen bir çalışmada (Owusu-Antwi, 1998), kompozit bir kaplamadaki kabul edilebilir yansıma çatlama oranı, trafik yükü ve sıcaklık değişimi baz alınarak denklem 2-7'de sırasıyla verilmiştir.

Kabul edilebilir dingil yükü tekrerrü;

$$N_i = \frac{h_{OL}}{10^{-12} K_C^{2.4}} \quad (2)$$

Gerilme yoğunluğu faktörü;

$$K_C = \left[\frac{JE}{(1 - \mu^2)} \right]^{0.5} \quad (3)$$

Sıcaklık etkisinde J-integral;

$$J = \left(-1.459 + \frac{7.176}{h_{OL}} + 0.129h_{PCC} + 0.002145k \right) 10^4 [S\alpha(\Delta T)]^2 \quad (4)$$

Tek dingil yükü etkisinde J-integral;

$$J = 0.01P^2 \left(-0.048 + \frac{1.648}{h_{OL}} + 0.00641h_{PCC} + 0.000279k \right) \quad (5)$$

Toplam hasar;

$$DAMTOT = 0.0132 \sum \frac{n_i}{N_i} + \frac{AGE}{N_{temp}} (8.79 + 0.000795 * FI * AGE) \quad (6)$$

Yansıma çatlakları oranı;

$$\%RCRACKS = \frac{100 * DAMTOT^{1.9}}{DAMTOT^{1.9} + 1} \quad (7)$$

Bu denklemlerde;

N_i : Kabul edilebilir dingil yükü tekrerrüü, N_{temp} : Kabul edilebilir sıcaklık tekrerrüü, K_c : Kritik gerilme yoğunluğu faktörü, J : J-integral, P : Standart dingil yükü (kN), E : Asfalt kaplama esneklik modülü (MPa), μ : Asfalt kaplama Poisson oranı, h_{OL} : Asfalt kaplama kalınlığı (mm), h_{PCC} : Beton kaplama kalınlığı (mm), k : Taban zemini esneklik modülü (MPa), S : İki derz arasındaki mesafe (m), α : Betonun ısı genleşme katsayısı (1/°C), ΔT : Maks. ort. aylık sıcaklık – Min. ort. aylık sıcaklık (°C), $DAMTOT$: Toplam hasar, n_i : Kaplamadan geçen dingil yükü tekrerrüü, AGE : Kaplamanın yaşı (yıl), FI : Don indeksi, $\%RCRACKS$: Yansıma çatlakları oranı (%)

3 Test Yolu

3.1 Yolun Yapısal Tasarımı

Çalışmanın birinci aşamasında, Kocaeli ili, İzmit ilçesi sınırları içerisinde yer alan ve Şekil 2’de koordinatları verilen 928 m (1x1) uzunluğundaki Bağımsızlık Caddesi güzergahında yapılması hedeflenen kompozit üstyapının tasarımı ele alınmıştır. Kompozit kaplamada 20 yıllık proje süresi içerisinde yaklaşık 50 milyon Eşdeğer Dingil Yükü Tekerrür Sayısı (EDYTS) ve günlük ortalama olarak ta 1.000 adet kamyon geçişinin olacağı hesaplanmıştır.



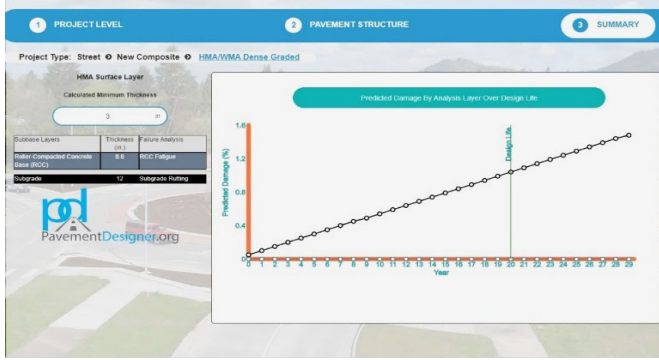
Şekil 2. Bağımsızlık Caddesi koordinatları

Kesit tasarımı, PCAPave’in altyapısı ile çalışan ve PavementDesigner.org sitesinde yer alan toolbox yardımıyla yapılmıştır. Tasarım ve hasar modelinde kullanılan parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım ve hasar modelinde kullanılan parametreler

PARAMETRE	SEÇİLEN DEĞERLER
Proje Süresi (Yıl)	20
20 yıllık Eşdeğer Dingil Yükü Tekerrür Sayısı (EDYTS)	50.000.000
Günlük Ortalama Kamyon Sayısı (Major Arterial)	1.000
Ağır taşıt trafiği artış oranı (%)	2
Yön dağılımı (%) (1 x 1)	50
Tasarım şeridi dağılımı (%)	100
P, Standart dingil yükü (kN)	80
E, Asfalt kaplama esneklik modülü (MPa)	2.757
μ , Asfalt kaplama Poisson oranı	0,35
Eb, Betonun esneklik modülü (MPa)	27.579
μ_b , Betonun Poisson oranı	0,15
Betonun eğilme dayanımı (MPa)	4,5
k, Taban zemini esneklik modülü (MPa)	69
μ_z , Zeminin Poisson oranı	0,4
Rijit temel kalınlığı (mm)	300
S, İki derz arasındaki mesafe (m)	10
α , Betonun ısı genleşme katsayısı (1/°C)	10 ⁻⁵
Maksimum ort. aylık sıcaklık (°C) (Kocaeli İli)	Ağustos 29,7
Minimum ort. aylık sıcaklık (°C) (Kocaeli İli)	Ocak 3,1
FI, Don indeksi (Kocaeli İli)	100

Programdan elde edilen verilere göre, kompozit üstyapıda taban zemininden yukarıya doğru sırasıyla Kırmataş Temel (30 cm), Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) (22 cm) ve Asfalt (7,5 cm) kullanılmasının uygun olabileceği görülmektedir (Şekil 3). Zamana bağlı tahmini hasar grafiğine bakıldığında ise 20 yıllık periyot içerisinde üstyapıda herhangi bir yapısal hasar meydana gelmediği, Kırmataş Temel düzeyinde ise yaklaşık %1 oranında yapısal hasar oranının gözlenebileceği tahmin edilmiştir. Bu hasar oranı 928 m uzunluktaki bir yol için 20 yılda yaklaşık olarak 9 m'lik bir kesimi ifade etmektedir.



Şekil 3. Üstyapı kalınlıkları ve zamana bağlı tahmini hasar grafiği

3.2 Yolun Yapılması, Gözlenmesi ve Performansının Değerlendirilmesi

2017 yılı Nisan ayı başında yapımına başlanan üstyapı inşaatı, 1 aylık bir süre içerisinde tamamlanmıştır. Eski kaplama kaldırılarak yer yer derin dolgu imalatları ile zemin güçlendirilmiş, birkaç kesimde genişletme çalışması yapılmıştır. PavementDesigner.org ile elde edilen kesitler aynen kullanılmış, ancak yansıma çatlaklarının yüzeye doğru ilerleme süresinin daha uzun bir periyotta gerçekleşmesi ve görece daha uzun bir süre ile yolun sürekli gözlemlenebilmesi amacıyla en üst tabakada 5 cm kalınlığında Aşınma ilavesi yapılmıştır. Dolayısıyla nihai kaplama kalınlıkları Şekil 4'teki gibi belirlenmiştir.

(5 cm) Aşınma (ASFALT)
(7 cm) Binder (ASFALT)
(22 cm) Silindire Sıkıştırılmış Beton (SSB)
(30 cm) Kırmataş Alttemel

Şekil 4. Proje üstyapı kalınlıkları

Taban zemininde gerekli iyileştirmeler yapıldıktan sonra, SSB iki seferde (11cm + 11cm) serilip sıkıştırılmıştır. 24 saat sonra kesitin 1/3'üne kadar 10'ar m aralıklarla enine derzler oluşturulmuştur. Son aşamada ise bitmiş kaplama üzerine bitüm bazlı yapıştırıcı emülsiyonlar tatbik edilerek, sırasıyla Binder ve Aşınma tabakaları uygulanmıştır (Şekil 5).



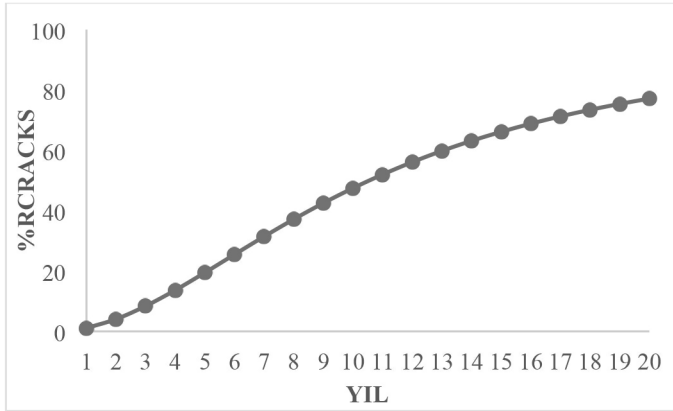
Şekil 5. Yol katmanlarının yapımı ve yolun güncel durumu

Yansıma çatlaklarının zamana bağlı değişimini gözlemleyebilmek için, derz bölgelerinde gerilme sönmüleyici bir mekanizma veya ara yüzey kullanılmamıştır. Sürekli gözlenen yol yüzeyinde 2019 yılı Eylül Ayı içerisinde ilk yansıma çatlağının geliştiği tespit edilmiştir (Şekil 6). Yaklaşık 2,5 yıl süre içerisinde kaplama üzerinden geçen trafik yükleri ve sıcaklık değişimlerinin neden olduğu bu yansıma çatlağı hasarı için, literatürdeki hasar modelleri kullanılarak genel bir yaklaşımla kaplamadaki hasar oranı tahmin edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 6. İlk yansımaya çatlağının oluştuğu yer

Yolun trafiğe açıldığı günden bu yana geçen 2,5 yıl süre zarfında ilk yansımaya çatlağının oluşması için kaplamanın proje toplam dingil yükü kapasitesinin %12,5'u (2,5 yıl / 20 yıl) kadar etkiye maruz kaldığı kabul edilirse, kaplamada 6.250.000 EDYTS'lik (50.000.000 x 0,125) bir trafik gerçekleştiği doğrusal bir ilişkide tahmin edilebilir. *Denklem (2-7)* yardımıyla kaplamada, mevcut durumda %6,1 oranında yansımaya çatlağı hasarı tespit edilebilmektedir. Benzeri bir durum ilerleyen yıllarda Şekil 7'de verilen ilişki gibi olmaktadır. Burada kaplamadaki yansımaya çatlaklarının ilerleme hızının ilk 10 yıla kadar hızlı geliştiği, bu yıldan sonra ise bu hızın yavaşlayarak devam ettiği görülmektedir.



Şekil 7. Yansımaya çatlak hasarının yıllara göre değişimi

4 Sonuçlar

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre,

- Trafik yükü 50.000.000 EDYTS olan bir güzergahta *PavementDesigner.org* ile tasarlanan yol için taban zemininden yukarıya doğru sırasıyla Kırmataş Temel (30 cm), Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) (22 cm) ve Asfalt (7,5 cm) kullanılmasının uygun olabileceği tespit edilmiştir. Zamana bağlı tahmini hasar grafiğine bakıldığında, 20 yıllık periyot içerisinde üstyapıda herhangi bir yapısal hasar meydana gelmediği, Kırmataş Temel düzeyinde ise yaklaşık %1 oranında yapısal hasar oranının gözlenebileceği tahmin edilmiştir. Bu hasar oranı 928 m uzunluktaki bir yol için 20 yılda yaklaşık 9 m'lik bir kesimi ifade etmektedir.
- Yansımaya çatlak bazında bir performans değerlendirmesi yapılması durumunda ise, kaplama yüzeyindeki yansımaya çatlak sayısı o kaplamadaki hasar durumu ile ilişkilendirilerek dingil yükü ve sıcaklık etkilerine göre yansımaya çatlak yönünden hasar oranları belirlenebilmektedir. Bu çalışmada yapımından 2,5 yıl bir süre geçen ve sürekli gözlenen bu yolda yansımaya çatlak hasar oranı %6,1 olarak tespit edilmiştir.
- Literatürdeki hasar modelleri kullanılarak, ilerleyen yıllarda gelişecek olan diğer yansımaya çatlakları için yıllara göre bir değişim grafiği elde edilmiştir. Burada kaplamadaki yansımaya çatlaklarının ilerleme hızının ilk 10 yıla kadar hızlı geliştiği, bu yıldan sonra ise bu hızın yavaşlayarak devam ettiği görülmektedir. Zamanla gelişecek olan diğer yansımaya çatlak oranları grafik üzerinde kalibre edilerek, bakım ve onarım stratejileri önceden tahmin edilebilecektir.

Kaynaklar

- Anderson, T. L. Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications. CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla., 1995.
- Andrei, D., M. Witczak, and M. Mirza, *Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures*, NCHRP 1-37 A Inter Team Report, University of Maryland, 1999.
- Bari, J. and M. Witczak, Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 75, pp. 381-423, 2006.
- Elseifi, M. and I. Al-Qadi, A Simplified Overlay Design Model against Reflective Cracking Utilizing Service Life Prediction, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 5, pp. 169–192, 2004.
- Eltahan, A. and R. Lytton, Mechanistic-Empirical Approach for Modeling Reflection Cracking, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1730, pp. 132-138, 2000.
- Gary, B. E., G. E. Martin, Resurfacing with Bituminous Types of Surfaces, *Proceedings of Highway Research Board, National Research Council*, vol. 12, pp. 177-192, 1932.
<https://www.pavementdesigner.org/>
- Lytton, R. L. Use of Geotextiles for Reinforcement and Strain Relief in Asphalt Concrete. In *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 8, 1989, pp. 217-237.
- Nunn, M., An Investigation of Reflection Cracking in Composite Pavements in the United Kingdom, *Proceedings of 1st International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, Assessment and Control*, Liege, Belgium, 1989, pp. 146-153.
- Tsai F., Prediction of Reflection Cracking in Hot Mix Asphalt Overlays, A Dissertation of Doctor of Philosophy, Texas A&M University, December 2010.

Recent Advances and Uses Of Roller Compacted Concrete For Pavement Construction in the United States

Corey Zollinger

Paving Solutions, CEMEX, Inc, Houston, TX USA

Abstract

Roller Compacted Concrete (RCC) is a no slump concrete that is placed by an asphalt paver and compacted with vibratory rollers similar to asphalt pavement construction. RCC has long history of good performance as a pavement for ports, container yards, and manufacturing plants. This paper will summarize a recent survey of uses of RCC, types of paving equipment and final surface since 2011 with a focus on the past 3 years in the United States as well as provide a few case studies on recent projects. The paper documents many of the benefits of using RCC on these types of projects such as speed of installation and traffic opening. Recent advances in mix design with admixtures, aggregate selection, as well as utilization of trowelling for a more aesthetically pleasing finish are also documented.

Keywords: *Roller COmpacted COncrete / HIGH dENSITY aSPHALT PAVING MACHINe / pavement / construction / admixtures / Trowelled rcc.*

1 Introduction

Roller Compacted Concrete (RCC) is defined as a negative slump concrete mix which usually has been made up of aggregate, sand, cement, and water. The material has traditionally been produced in twin shaft horizontal pug mills located on the jobsite and delivered to the paver in dump trucks. The paving machines are large asphalt pavers which are equipped with high density asphalt screeds that compact the RCC material with tamper bars, pressure bars and vibration typically achieving greater than 90% compaction behind the screed and recently many projects have achieved near or greater than 98% behind the screed. The material is then compacted to 98% density using dual steel drum rollers, pneumatic rollers or combination

rollers, and final smoothness is provided with a smaller dual steel drum roller or combination roller. The RCC pavement is then cured using traditional concrete pavement curing compounds and saw cut using early entry technology or left to crack naturally.

As documented by Pittman and Anderton, this pavement construction process began in 1975 with test sections at the Army Corp of Engineers Waterways Experiment Station in Vicksburg, Mississippi and was followed by the first large scale project in 1984 at Fort Hood, Texas for a tank hardstand military application (Pittman 2009). By 1990, 51 projects and over 2.5 million SY (2.09 million SM) of RCC pavements had been constructed for military and industrial type facilities, with only a few roadway projects. During the 1990's, RCC construction came to a near standstill with only 22 projects and roughly 500,000 SY (418,063 SM) of RCC pavements constructed (Pittman 2009). During the first decade of 2000 (2000 – 2010), RCC use began to expand into various applications such as highway shoulders, however the major user remained industrial, military, and port applications with over 70 projects and 8.9 million SY (7.4 million SM) placed (Pittman 2012). Since the beginning of the current decade (2011 – 2013), RCC utilization has expanded into many other applications such as hike and bike trails, local streets and roads, commercial parking lots, while continuing to be used in traditional industrial type applications. According to a previous survey conducted by the Author, between 2011 and 2013, over 197 projects were been paved covering more than 4.9 million SY (4.1 million SM) (Zollinger 2014). According to a recent survey of the RCC Industry, Since the 2014 (2014 – 2016), RCC utilization continues to be used on local streets and roads with an increase in residential roads and commercial parking lots, as well as increased utilization by the distribution centers and oil and gas sectors. The public sector utilization remains steady with continued investigations by Departments of Transportation and Municipal governments. According to the recent survey conducted by the Author, between 2014 and 2016, over 265 projects were been paved covering more than 5.1 million SY (4.3 million SM).

As the Engineering and construction professions as well as the industrial owners and operators continue to become more familiar with this pavement type, the technology for mix design, mix production, and placing, and final surface texture continues to develop and advance to support RCC growth into more pavement applications. This paper details a survey that was conducted by the author on the recent uses of RCC pavements, and is followed by a few of the advancements in mix design and aggregate selection, production and final surface types. Case studies are presented during the paper to highlight the advancements and uses.

2 RCC Projects From 2014 To 2016 Survey Summary

In 2017, the author conducted a survey of owners, contractors, material suppliers and consultants regarding RCC projects constructed across the United States. The survey was able to gather 265 projects covering over 5.1 million SY (4.3 million SM) covering 2014 - 2016. While this survey does not represent 100% of the RCC paved, it is estimated to represent 85% or higher based on the author's knowledge of the RCC market. The survey collected data for each RCC project on the market segment, application type, owner type, location, year of construction, paving area, thickness, final surface type, mixing plant type, and type of paving machine.

RCC utilization around the United States is clearly increasing in terms of area placed per year, types of applications, and number of projects per year. When combining the data collected in this survey, along with the other surveys conducted by Zollinger and Pittman, over 22.0 million SY (18.4 million SM) of RCC has been placed since 1975, and over 634 projects have been completed in that time period. Since 2000, 19.3 million SY (16.1 million SM) have been placed in 555 projects. Figure 1 combines the data with Zollinger and Pittman’s previous studies and illustrates the growth of RCC over this time period in terms of cumulative and individual square yards of RCC per year.

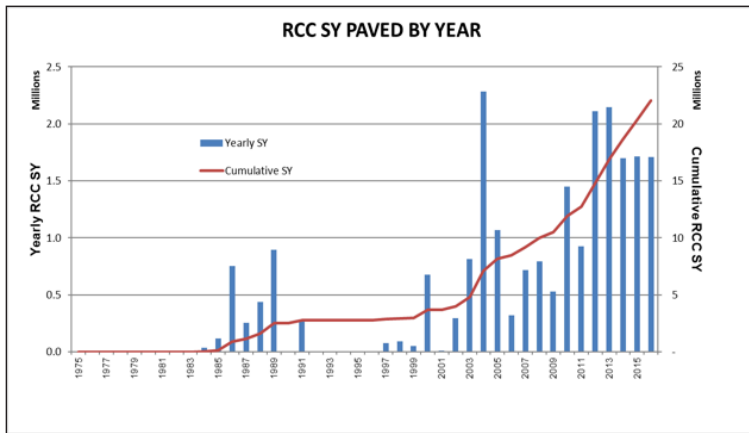


Figure 1. Summary of RCC SY Placed in the United States

Figure 2 combines the data with the previous studies and illustrates that as the number of RCC projects around the United States grows per year, the size of the projects are coming down. The project size reduction is due to the change in the type of applications where RCC is being used. While large projects continue to utilize the pavement type, smaller projects such as roadways, and parking lots are becoming more common.

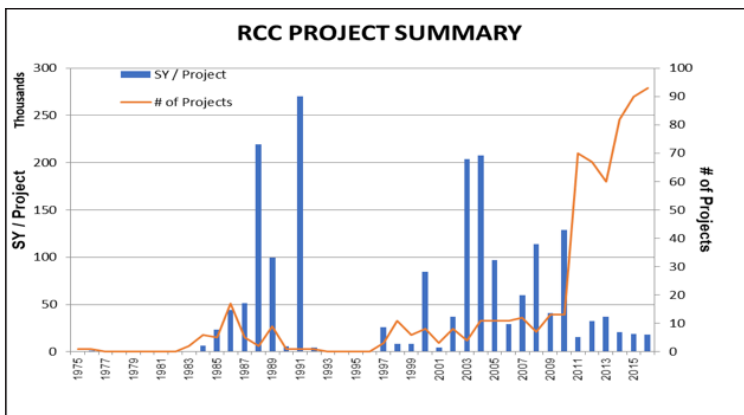


Figure 2. Summary of RCC Projects in the United States

One key aspect of determining if RCC is the right solution for a project, is the total size as well as the shape of the paving area. Due to the nature of the market dynamics, most of the contractors are mobilizing plants and paving equipment to the project site, which requires the size of the project to be large enough to justify the mobilization. The local market in Columbus, OH has become established where a typical pavement design includes RCC topped with asphalt. In mature markets like Columbus, the demand for RCC has allowed concrete suppliers to supply RCC from fixed locations, and smaller projects have become feasible. In other markets, certain concrete suppliers have partnered with paving contractors to produce RCC for specific projects through the use of ready mix trucks. The survey data shows the large majority of the projects (60%) are between 1,000 and 10,000 SY (836-8,361 SM) followed by 28% projects between 10,000 and 100,000 SY (8,361 – 83,612 SM). While larger projects are typically a good fit for RCC, there are not as many of those projects every year as only 4% of the projects are that size. Only 8 % of the projects are smaller than 1,000 SY (836 SM)

Between 2014 and 2016, RCC was paved by 32 different contractors, with 2 contractors paving over 1 million SY (836,127 SM) each, and 9 contractors paving more than 100,000 SY (83,612 SM) each. The contractors who are paving the larger volumes have become “on-purpose” RCC installers where RCC paving is a large percentage, and for some all, of their activities. They are investing significant time conducting business development activities for the purpose of introducing future owners to the paving solution.

For this survey, the projects were classified as commercial, industrial, intermodal, port, and roadways. For clarification, industrial projects are classified as distribution centers, equipment yards, etc. While Intermodal yards and ports could also be classified as industrial, the large amount of RCC being paved in these types of projects justifies separating them. Figure 3 summarizes the statistics for the different applications. As can be seen, the industrial, intermodal and port applications have historically been the largest market segments using RCC, however in recent years, the private commercial and roadway segments are rapidly increasing. The primary reason for the roadway growth is private developers using RCC for construction of residential neighborhoods. They are using RCC due to the lower cost of installation as well as the faster speed of construction. The state Departments of Transportation continue to grow in use with a few having completed their first projects between 2014 and 2016 over the past few years including Texas, California, and Virginia.

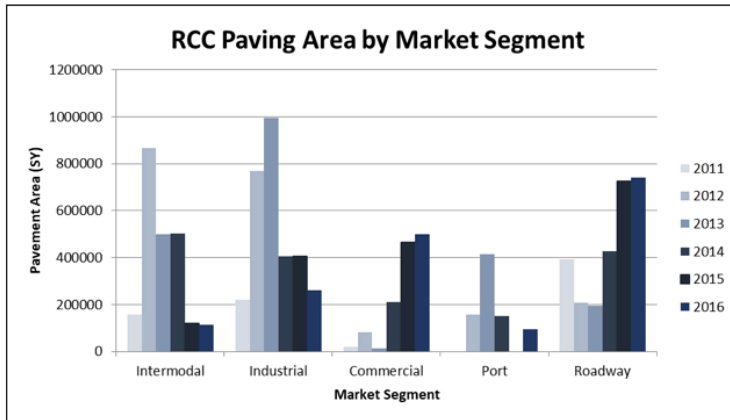


Figure 3. Summary of RCC Projects By Segment 2011-2016

As has been the case since 2000, the primary user of RCC is the private industry, followed by public agencies, while military use has become significantly smaller even though it was the first user of RCC in the United States. The private owners are using RCC specifically for the lower cost of installation compared to alternatives as well as the speed of construction. Figure 4 summarizes the data by owner type.

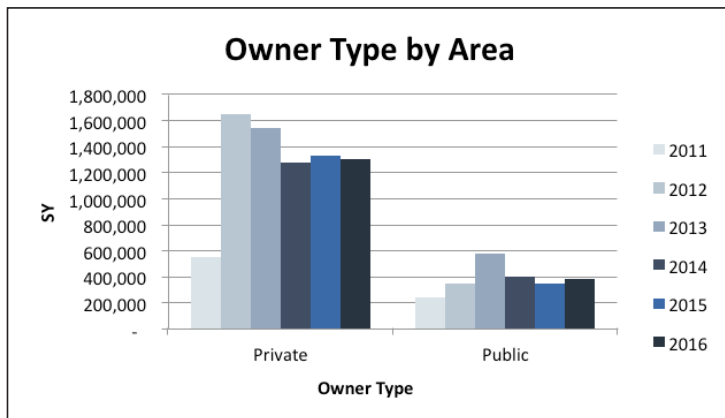


Figure 4. RCC Summary by Owner Type 2011 – 2016

While RCC has historically been paved with high density paving machines which utilize tamper bars or pressure bars to achieve greater than 90 percent density behind the paver, the use of standard asphalt paving machines is still being used on smaller projects with thinner pavements. The recent survey indicates an average of 93 percent of the RCC area has been paved with high density paving machines over the last 3 years, while only 83% of the projects have used these paver types. The reason for this difference is that high density machines

are very large and are not typically used on smaller projects or areas that have tight radius, whereas standard density pavers can meet those criteria. High density paving machines were historically only used by a few contactors; however, they are becoming increasingly more available throughout the United States. There was a push a few years ago for some contractors to consider the use of “medium density” pavers as a means for the purpose to serve both markets, however that does not seem to be catching on as determined by this survey as shown in Figure 5.

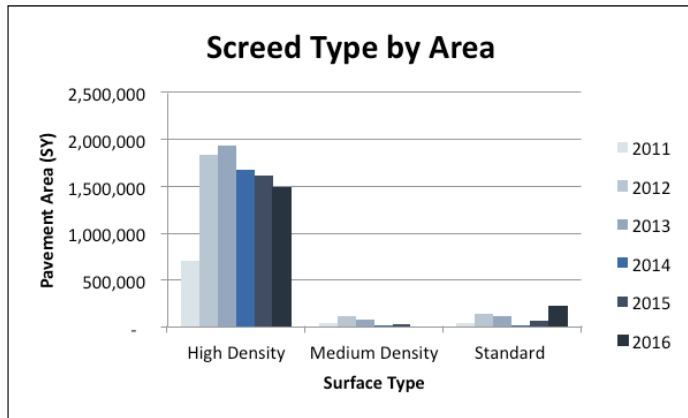


Figure 5. RCC Summary by Paver Type 2011 – 2016

RCC Pavements were initially being designed with a conservative approach, recently they are being design using the same fatigue models for mid slab cracking as is used for conventional concrete pavements. This process is resulting in similar pavement thicknesses as would be found for conventional pavements under the same loading and soil conditions. A summary of the pavement thicknesses used for constructing RCC pavements in the survey is shown in Figure 6. As would be expected, 80% of the projects are between 6 and 10 inches (15 and 25 cm) thick, however the heavier port and intermodal facilities utilize RCC pavements between 14 and 18 inches (35 and 45 cm) thick. For pavements, greater than 10 inches (25 cm) thick, a dual lift paving system is utilized where the second lift is placed within 30 minutes of the first lift to achieve a bond between the two lifts.

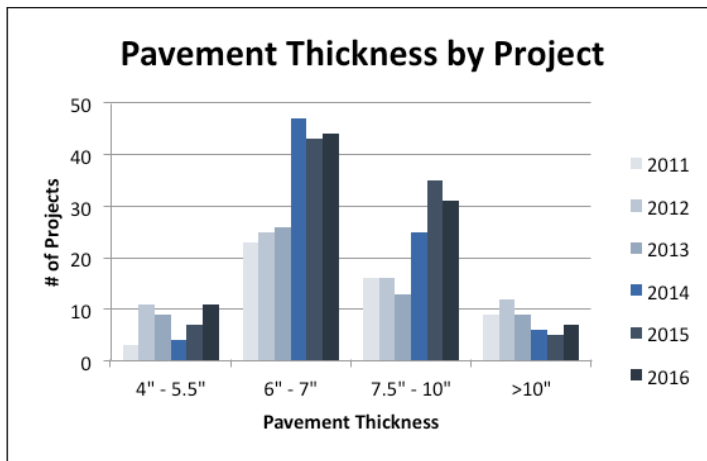


Figure 6. RCC Pavement Thickness by Project Type 2011 – 2016

3 Mix Design and Aggregate Selection

The traditional RCC mix has only included the basic ingredients of aggregate, sand, cement, and water. The RCC pavement mix design is developed in such a way to ensure the highest possible density, stability under the heavy screed and rollers during placement, achieve acceptable strength for the future loading, and provide surface durability during service. Traditionally, highest density has been achieved through selecting a combination of well graded aggregate with a maximum size of 3/4 inch (19 mm) and a local sand source. Using this approach, it usually results in higher sand percentage and lower coarse aggregate percentage than conventional concrete. Due to the use of pug mills for on-site production, the contractor usually only has two aggregate bins which are attached to the pug mill to work with and achieve the needed combined gradation. The water content is then determined through an optimum moisture / maximum density proctor test (ASTM D 1557) using a mid – range cement content such as 14% by weight of dry materials. Finally, compressive strength specimens are fabricated using a range of cement contents (typically 12 to 15%) according to ASTM C 1435. The design cement content is determined by plotting the compressive strength versus cement content and identifying the amount of cement needed to achieve the design compressive strength with the appropriate amount of over-design.

A recent development on RCC projects is to achieve very high densities with the paving machine. Often the density behind the paver is greater than 96% and routinely over 98% thereby meeting the density specification with the paving machine alone. There is tremendous debate whether or not a roller is still required to provide a long-term durable pavement under these conditions. Regardless of that requirement, the ability to achieve this extremely high density with the paver alone has been determined to be influenced by many factors including the paver screed setup and operation, stiffness of the underlying support layer, as well as the

mix characteristics such as moisture content, aggregate properties, and cement content. While most of the aggregate selection criteria has historically focused on the combined gradation or durability properties such as abrasion, a recent development is consideration of aggregate and sand shape, specifically focusing on the angularity. The angularity of the coarse and fine portions of the mix predominantly affect the workability of the mix in terms of compaction and stability. For example, when using rounded coarse aggregates and natural sands, it is well known the contractor will experience mix stability problems under the screed making it very difficult to achieve final grade. On the other side of the spectrum, when using crushed coarse aggregate and manufactured sands with highly angular aggregates, the contractor may struggle to achieve 98% compaction even with heavy rollers and the pavement structure will not be uniformly compacted throughout the full depth of the pavement.

A test section was paved in Sacramento, CA in 2014 to evaluate proposed mixes for a paving project where the effect of the shape of the sand particles was demonstrated. The contractor proposed 2 mix designs, which included the same coarse and intermediate aggregates, however used 2 different sand sources. The first sand source was manufactured sand from the production of coarse aggregate, while the other sand source is considered “natural” mined from a creek. The manufactured sand material is considered to be much more angular and harsh as compared to a rounded natural sand. The mix designs as related to aggregate along with the compaction properties are shown below in Table 1 and the combined gradations are shown in Figure 7. As can be seen in the combined gradations, they are similar to each other except for the material smaller than #16 sieve as would be expected when only changing the sand.

Table 1. Combined Aggregate for Sacramento, CA RCC Mix Designs

MATERIAL	Mix #1	Mix #2
½» X #8 Crushed Aggregate. (%)	20	20
¾» X ¼» Crushed Aggregate. (%)	25	25
Manufactured Sand (%)	55	
Concrete Sand (Natural)		55
Compaction Properties		
Maximum Dry Density (pcf) (kg / m ³)	141.7	145.0
Optimum Moisture Content (%)	5.7	5.4
Reference Wet Density (pcf) (kg / m ³)	149.8	152.8

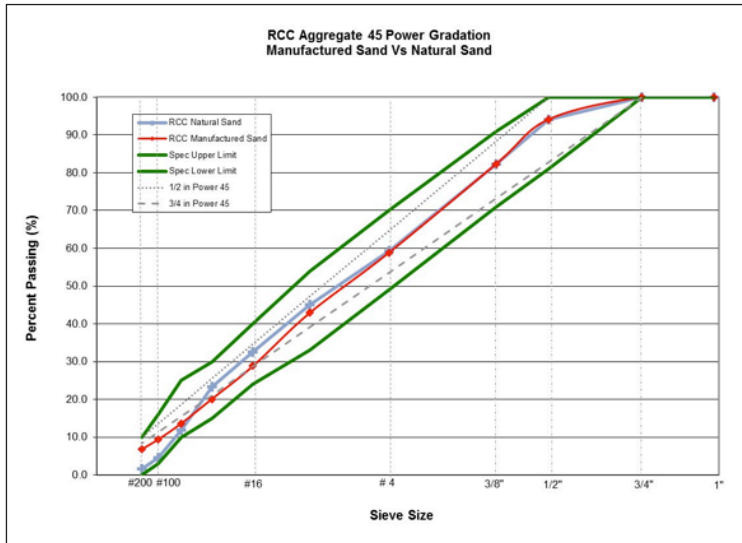


Figure 7. Combined Aggregate Gradation for Sacramento, CA RCC Mix Designs

The test sections were 150 ft (45 M) long by 20 ft (6 M) wide paved side by side each other and paved with a Vogele Super 2100 Paver. The material was produced on-site by a Rapidmix 400 C pugmill and hauled approximately 5 minutes to the test sections. Each test section was constructed with 6 truckloads each covering about 25 ft (7.6 M) per truck. The in-situ density measurements were taken at 3 different locations immediately behind the paver for each truckload. When paving both mixes, the only variable that was changed was the sand source, with all the paver settings, subgrade compaction, etc remaining constant. The mix with the manufactured sand achieved an average wet density of 86.5% with a standard deviation of 3.4, while the mix with natural sand achieved an average wet density of 95.5% with a standard deviation of 1.9. Compressive strength cylinders were also fabricated on site and 28-day results showed the manufactured sand achieved an average of 3,766 psi (26.0 MPa), with a standard deviation of 355 (2.4 MPa) psi, while the natural sand achieved an average of 6,858 psi (47.2 MPa) with a standard deviation of 374 psi (2.6 MPa). It was observed during the paving operation that the natural sand mix was easier to compact, had a much tighter surface appearance, and was overall easier to pave. Other factors that may be affected by combined aggregate shape include screed stability, roller marks, surface appearance, aggregate segregation, and moisture demand. These test sections have provided an indication that while the combined gradation is important to aggregate selection, the combined aggregate shape may actually impact the paving operation and mixture compaction in a more significant way.

Admixtures are also being introduced into the market claiming to enhance compaction as well, however we are currently seeing mixed results when using them on projects. In summer of 2018, RCC was paved in Roseville, CA using ACEiT Plus admixture in the RCC. During the paving operation, there were some malfunctions in the dosing equipment and the admixture was removed from the mix for some time. During that time period, it was observed that

the compaction behind the paving machine actually increased, so the paving team began to experiment with putting the admixture in and taking it out of the mix to determine the impact to compaction. The compaction results are shown below in Figures 8 and 9 where the density was clearly higher in all but 2 tests without the ACEiT in the mix as well as across the entire width of the screed.

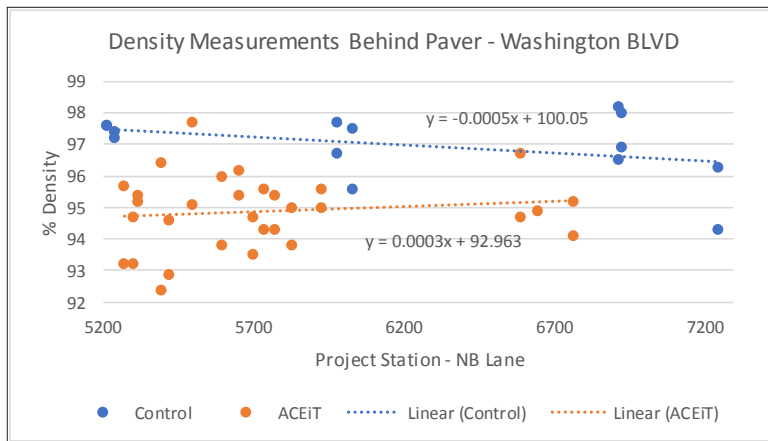


Figure 8. Density Measurements Behind the Paver with and without Admixture

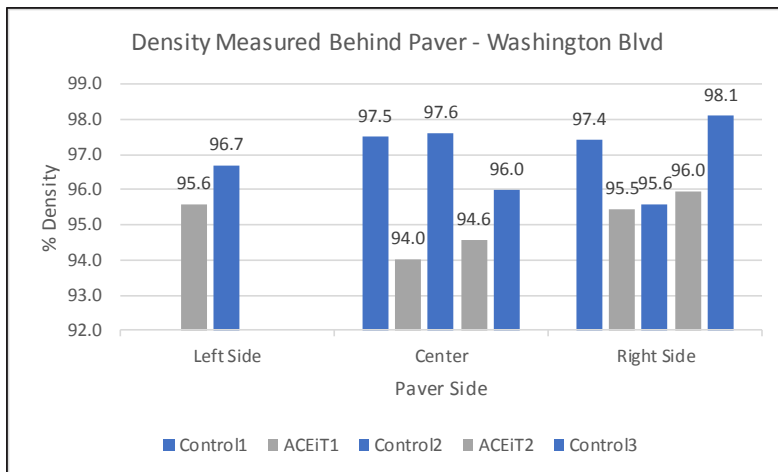


Figure 9. Density Measurements Across the Width of Paver

4 Production Advancements

Historically RCC has been produced in continuous mixing, twin shaft - pugmill type mixers that are easily transported from one site to another, and set up in one day with two to three workers. The operation of these plants is also very simple with only 1 plant operator and 1 loader typically required. These plants operate in a continuous mode thereby allowing for very high production rates, ranging from a rating of 400 to 100 short tons (363 to 909 metric tons) per hour. A recent development during the 2014 to 2016 time period is the use of pugmill plants that operate by either volumetric or weigh batching. The weigh batching plants are still not very common, and have had some operational challenges keeping up with the demands of high production, however they seem to be increasing usage. The mobile pugmill plants come with 2 aggregate hoppers, so when additional aggregates are needed, a common practice is to include auxiliary 3 or 4 bin hoppers to the plant set up as shown in Figure 10.



Figure 10. Pugmill Mixing Plant

Figure 11 illustrates that while the pugmill plant continues to be the dominant plant type used in RCC production, the Central mix tilt drum and traditional dry batch plants are being used on smaller projects where slower production is appropriate. The central batch twin shaft mixing plants and spiral shaft mixing plants, while are efficient at producing high quality RCC, they have not gained the market share that was anticipated a few years ago. The current reason for this to be the case is the central mix tilt drum and dry batch plants are more commonly available.

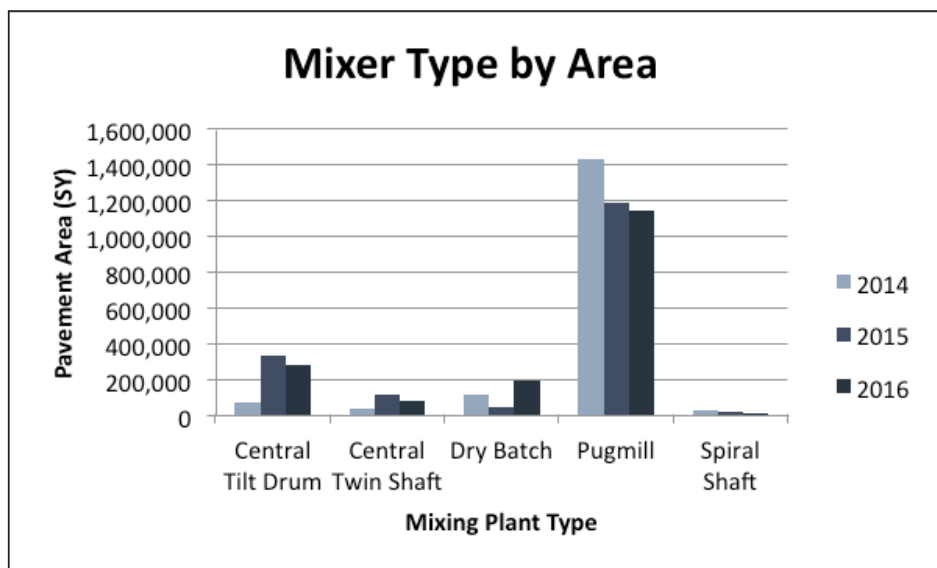


Figure 11. Mixing Plant Type used between 2014 - 2016

5 Final Surface Types

As was stated in the introduction, RCC is placed by asphalt type paving equipment and is finished with heavy dual steel drum rollers, which leaves a final surface appearance similar to asphalt, except the color is gray. Historically, the final surface provided by this equipment is what was used by the owner, however in the past 10 years RCC pavements are beginning to utilize other surface finishes such as diamond grinding. While the natural surface finish has proved to be durable when properly placed, owners are now requesting an improved surface appearance like conventional concrete. The trowelling of RCC surfaces with the use of water has been tried as far back as the early 1980's in Spain, however, recently admixtures for surface application have made their way into the market on many projects to meet this need. Those admixtures appear to make the trowelling process easier, even providing enough paste workability to broom or tine the finished surface, and remain durable over time. The development of the process as well as admixtures continues to evolve rapidly and changing the RCC pavement market.

A summary of the surface type by areas is provided in Figure 12. In the most recent year of the survey, based on the surface area of RCC placed, 2% of the projects have been diamond ground, 11% an asphalt overlay has been placed on top, 74% has remained as natural RCC, and 13% has a trowelled surface.

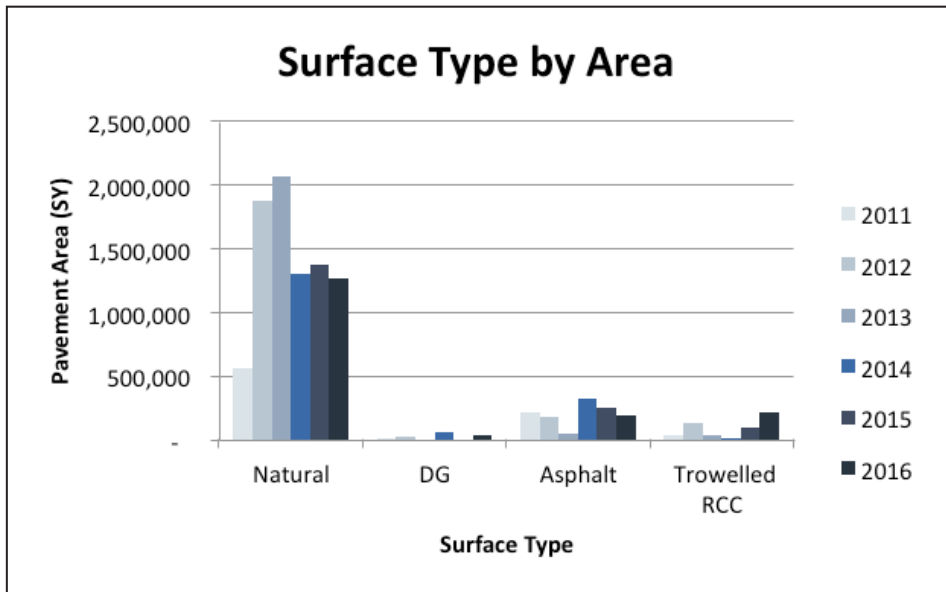


Figure 12. RCC Surface Types by Pavement Area

In 2015, the neighborhood of Chapel Landing in Bel Aire, Kansas was paved with an innovative solution using a proprietary product named ACEiT Blue that was sprayed on the surface to make the trowelling process easier and enhance durability. After the trowelling was complete, a standard concrete broom was used to provide a final surface. The final project was 21,000 SY (17,558 SM) of 6 inch (15.2 CM) thick RCC. This mix also included the use of macro fibers which was made possible by the contractor using a central batch twin shaft mixing plant to produce the material.

Recently, two field studies at two different location in Houston, TX were conducted to evaluate admixtures as compared to using water, cement or curing compound as a trowelling aid. The materials were carefully measured to ensure the spraying rate was consistent for each of the test sections. The process included spraying the product onto the surface and immediately trowelling the surface followed by a typical application of curing compound. One of the variables included using curing compound as a trowelling aid where one of the sections included following the trowelling with a 2nd application of curing compound and the other section was left alone after trowelling with no additional curing compound. After 28 days, the pavement sections were cored for compressive strength testing per ASTM C 42 and Abrasion Surface Resistance Test per ASTM C 944. The results of those tests are found in Table 2.

Table 2. Summary of Field Testing of Trowelling Aids

Finishing Product	Average Loss in Mass (grams)		
	Location #1	Location #2	
		Sample #1	Sample #2
Water	8.9	NA	NA
ACEiT Blue	NA	8.1	12.1
Day 1	7.9	11.5	8.2
Surface Pro		13.8	5.6
Admixture #1	4.5	4.8	6.8
Cement / Water		4.3	7.0
Curing Compound (No cure)	26.1	NA	NA
Curing Compound (Followed by Cure)	14.1	NA	NA

As can be seen from the table, admixture #1 as well as a mixture of cement / water appears to provide the least amount of mass loss as compared to the other finishing products. The use of a curing compound following the trowelling process appears to be very important as without that process, that section resulted in the highest amount of mass loss during the abrasion process. The Day 1, Surface Pro and ACEiT Blue products seem to have a high variability in terms of abrasion resistance as shown in these results. The technology and process for doing this is still developing rapidly, as well as determining what is needed and how to specify it. What has not yet been determined is what threshold value is required to be met to have adequate field performance for surface durability over time under various loading and environmental conditions. What we do know is field observations of the projects completed with trowelling aids have resulted in high quality surfaces with no significant failures or surface loss due to abrasion. These projects are still relatively young, however this process seems to have significant potential to change the RCC paving market. This technology will continue to develop and evolve over the coming years as it continues to be used in various applications.

6 Project Applications

As was stated above in the paper, RCC continues to be utilized in many different applications and project types, as well as find new uses. Below are some of the projects detailing those applications.

In 2015, the City of Roseville California began to understand they could not continue to use their historical paving practices to adequately provide the level of performance the residents in their city had come to expect. Their annual maintenance needs were about twice their annual budget and they needed to find another paving solution with lower maintenance costs. They

investigated the use of RCC and developed a pilot projects to observe the performance on 3 streets: Washington Blvd (Major Arterial), Atkinson (Major Industrial roadway), and Hickory Street (Residential). Construction was completed in the summer of 2018 by a local contractor with the support of the author acting as a consultant. The RCC was produced in a RapidMix 400 C Pugmill plant located within 20 minutes of the projects. The RCC was placed using a Vogele Super 2100 high density asphalt paving machine with paving widths up to 24 ft wide. The paving thicknesses were 7.0 inch for Washington, 8.5 inch for Atkinson, and 6 inch for Hickory. The RCC paving was placed on cement treated base (treated exist base material), compacted aggregate base, and compacted subgrade for the 3 streets respectively. The RCC pavement surfaces included diamond grinding, natural, and trowelled / broom finish for the 3 streets respectively. So far all the pavement surfaces are performing very well with no observed distresses 8 months later. One of the key aspects to paving Washington Blvd was the traffic control and the early opening of driveways for access to local businesses and homes. Washington Blvd was constructed by milling the existing asphalt and aggregate base 7 inches deep, and then cement stabilizing the remaining aggregate base. During that time, traffic could cross over on the stabilized base layer with ramps built as needed, however the driveway or intersection was closed during RCC paving. As a routine practice, the RCC pavement was placed at night through all of the intersections or driveways, however they were opened to traffic by the morning. As can be seen in Figure 13, steel plates were used to mitigate the surface deterioration and were successful at keeping traffic flowing. Zero distress has been identified in these areas due to the early age trafficking.

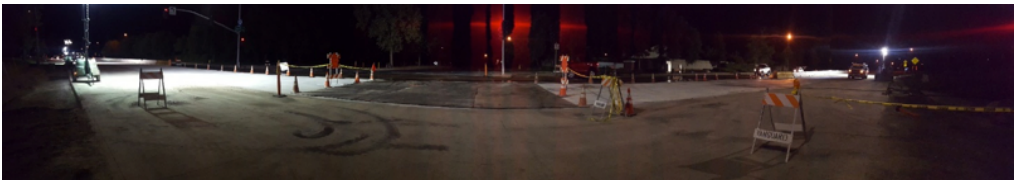


Figure 13. Steel Plates on at an intersection in Roseville, CA

In the spring of 2014, the Public Works Department of Liberty County, TX approved the use of Roller Compacted Concrete pavements for the construction of residential roadways by a local developer. The project consisted of 122,000 SY (102 K SM) of 5 inch thick (12.7 cm) RCC placed on 6 inches (15.2 cm) of cement stabilized subgrade. The pavement is 22 ft (6.7 M) wide and has been saw cut at 11 ft (3.3M) wide by 12 ft (3.6 M) long. Due to the stiff subgrade and optimized aggregate gradation and the use of a high density paving machine, the contractor was able to place the mix at greater than 98% density behind the paver. In order to provide a nice surface texture, the contractor has used a maximum aggregate size of ½ inch (12 mm) as well as isolated surface trowelling on an as needed basis. The initial project has now been followed up with additional projects of similar scope. Those projects have consisted of 387,200 SY (323 K SM) in 2015, and 400,000 SY (334 K SM) in 2016.

In 2007, The Port of Houston began a major plan to expand their cargo and container storage capacity in preparation for the Panama Canal Expansion. During their planning stages,

they evaluated RCC Pavements and decided to allow contractors to turn in alternate bids to conventionally reinforced concrete pavements on their first project at the Bayport Container Terminal Phase 1. Due to the significant cost savings as well as being able to reduce construction time by 4 months, that project used RCC pavements of 14 and 18 inches (35.5 and 45.7 cm) thick for approximately 50 acres (202 K SM). Since 2007, the Port of Houston has completed over \$300 million in projects and plans to complete 380 acres (1.5 M SM) of RCC paving by 2020.

7 Conclusions

RCC continues to increase in utilization around the United States into many different project types. The past three years has seen over 1.6 million SY (1.3 million SM) of RCC placed each year. As RCC continues to grow in utilization, the technology is developing along with it. Recent advances have occurred related to mix design such as understanding aggregate shape as well as size distribution, as well as admixtures to improve the finished surface appearance. With an expected increase in the use of RCC, advancements are expected to continue and likely increase in the rate of development.

References

- ASTM D 1557 (2002) “Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort”
- ASTM C 1170 (1998) “Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table”
- ASTM C 1435 (2006) “Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer”
- Cornell, Chris (2011), email correspondence and personal Microsoft Excel data file
- International Grinding and Grooving Association (2009) “Roller Compacted Concrete Grinding in Aiken, SC” CPR – Rebuilt to Last
- JOHNSON, Andy (2009), email correspondence and personal Microsoft Excel data file
- PITTMAN, David; ANDERTON Gary (2009) “The Use of Roller-Compacted Concrete Pavements in the United States”: MAIREPAV 6, Torino, Italy
- PITTMAN, David; ANDERTON Gary (2012) “Characteristics of Roller-Compacted Concrete Pavements in the United States.” MAIREPAV 7, Auckland, New Zealand
- ZOLLINGER, Corey (2014), “Recent Advances and Uses of Roller Compacted Concrete Pavements in the United States.” 12th International Symposium on Concrete Pavements, Prague Czech Republic

T.C. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı Beton Yol Uygulamaları

Soner Özkan, Sertaç Engin Ünverdi, Osen Didem Tiryaki

Eskişehir Büyükşehir Belediyesi Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı, Eskişehir, Türkiye

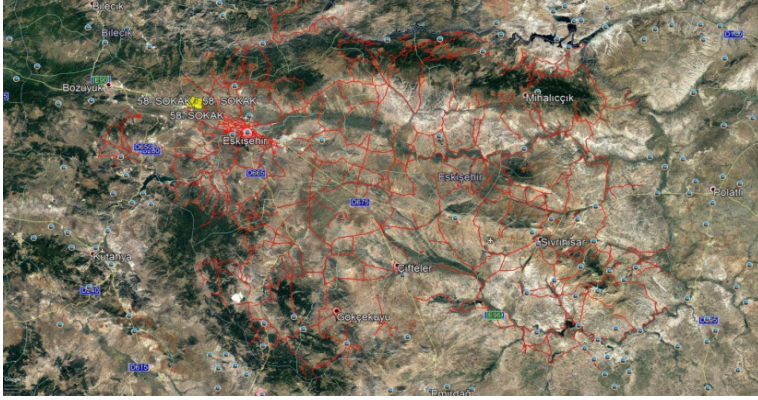
Özet

6360 sayılı “On Dört İlde Büyükşehir Belediyesi Ve Yirmi Yedi İlçe Kurulması İle Bazı Kanun Ve Kanun Hükmünde Kararnamelerde Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun’ un yürürlüğe girmesinden sonra Eskişehir Büyükşehir Belediyesi hizmet alanı önemli oranda büyümüş, merkeze uzak yerlere hizmet götürme sorumluluğu dolayısıyla da yol yapım bakım ve onarım maliyetleri de yadsınamaz derecede artmıştır. Bununla birlikte Belediye kaynaklarının en iyi şekilde kullanılması ve yapılan imalatların kullanım sürelerinin uzun yıllara sari olması gerekmektedir. Ancak yürütülen çalışmalarda, Belediyemiz sorumluluğuna geçen asfalt sathi kaplama yolların, özellikle trafik yükü ağır olan bölgeler ile mahalle yollarında bakım maliyetlerinin yüksek olduğu, ayrıca artan bitüm fiyatları dolayısıyla ilk yapım maliyetlerinin de bütçe planlamalarımızın üzerine çıktığı anlaşılmıştır. İlimiz nüfus, coğrafi ve iklim koşullarına uygun, yol yapım bakım ve onarımı için ayrılan bütçeye fazla yük getirmeyecek bir çözüm arayışına girilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda donma-çözülme, genleşme-büzülme reaksiyonlarından sathi kaplamaya göre daha az etkilenen, zayıf taban zeminleri üstünde asfalt yollara göre daha iyi sonuçlar veren, hemen her iklim koşulunda imal edilebilen, hizmet ömrünün uzun olması ve en önemlisi de % 100 yerli malzeme kullanılması nedeniyle ülkemizin ve hatta ilimizin kendi kaynakları kullanılarak imal edilebilen Silindirle Sıkıştırılmış Beton kaplamasının Eskişehir Büyükşehir Belediyesi kırsal yol ağında uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. SSB yol kaplaması ekonomi, işlevsellik, kalite ve çevresel değerler açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bildiride öncelikle, sathi kaplamanın dezavantajları ile SSB kaplamaların temel özellik ve üstünlükleri ortaya koyulacak, sonra İlimizdeki uygulamaların hazırlık, yapım ve kontrolleri hakkında bilgi verilecek, sonuç bölümünde ise, tüm bu bilgiler ışığında, SSB yol yapımının yaygınlaşmasının gerekliliği vurgulanacaktır.

Anahtar kelimeler: *Silindirle Sıkıştırılmış Beton Kaplama, Rijit Üstyapı, Kırsal Yol Ağı, Sürdürülebilirlik*

1 Giriş

2014 yılı öncesinde Eskişehir Büyükşehir Belediyesi, il merkezinde kalan ana yolların yapım, bakım ve onarımından sorumlu iken, 6360 sayılı yasa ile il sınırları belediye sınırları haline gelmiş ve Belediyemiz sorumluluğunda bulunan yol ağı 439 km'den 3845 km'ye yükselmiştir.



Şekil 1. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi kırsal yol ağı haritası

Söz konusu yasanın yürürlüğe girmesiyle Belediyemiz Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığınca yürütülen tespit çalışmalarında sorumluluk alanımızda bulunan, özellikle grup mahalle yollarının çoğunun kullanım ömrünü doldurduğu ve acil olarak yenileme gerektiği, bir kısmına da en kısa sürede bakım yapılması aksi halde yenileme gerekeceği belirlenmiştir. Mevcut yolların asfalt sathi kaplama olması nedeniyle onarım işlemlerine de bu kaplama uygulamasıyla devam edilmiştir. Ancak bu süreç zarfında görülmüştür ki sathi kaplamanın;

- Rutin bakım ve onarım ihtiyacı fazla olduğundan dolayı bakım/onarım masrafları yüksektir.
- Sık aralıklarla yenilenmesi gerekmektedir.
- Taşıma gücü düşüktür ve bu nedenle ağır taşıt trafiği yüksek olan yollar için uygun değildir.
- Hammaddesi petrol türevi olduğu için birim maliyeti hızla artış göstermektedir.

Ciddi maliyetlerin sürdürülebilir malzemeden olmasının, gelecek nesillere kaynak aktarımı ve doğanın korunması açısından büyük önem arz ettiği de göz önünde bulundurulduğunda; karşılaşılan olumsuzluklar dolayısıyla, daha az dezavantajlı uygulama teknolojileri ile çevre ve insan sağlığı açısından da Belediyemizin sürdürülebilir ulaşım ilkesiyle uyumlu olabilecek malzemelere ilişkin arayışa geçilmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde kamu kaynaklarının etkin, ekonomik ve verimli kullanılması açısından asfalt sathi kaplamaya alternatif olarak, birçok gelişmiş ülkede uzun yıllardır kullanılan silindire sıkıştırılmış betonun ilimiz koşullarında uygun bir kaplama olabileceği sonucuna varılmıştır. SSB kaplaması üzerine yapılan araştırmalar sırasında ülkemiz ve dünyada ki uygulama örnekleri üzerine pek çok makale, rapor ve çalışma dokümanı incelenmiş, TÇMB tarafından Kocaeli'nde düzenlenen

seminere katılım sağlanmış, beton yol uygulamasının Ülkemizde ilk örneklerinin yapıldığı Samsun'da incelemelerde bulunulmuştur. Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığında görevli Mühendis, Tekniker, Laboratuvar Teknisyeni ve Operatörlerden oluşan 18 kişilik kafile tarafından Ankara İli, Polatlı İlçesi Babayakup Mahallesi ile Sincan İlçesi Çokören Mahallesi arasında yapım çalışmaları devam eden mahalle yolunda Finişer ile serilen Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) kaplama uygulaması yerinde gözlemlenmiştir.

2 Silindirle Sıkıştırılmış Beton Temel Özellik ve Üstünlükleri

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), geleneksel beton malzemeleriyle beton santralinde üretilen ve asfalt yol ekipmanlarıyla uygulanan sıfır slampli bir betondur. Düşük su/çimento oranına sahip olduğundan asfalt finişeri ile serilmekte ve vibrasyonlu çelik tamburlu ve lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırılarak yüzeyin son hali verilmektedir. İlimizde beton santrallerinin yeterli teknolojiye ve sayıda olmaları ile uygulamada Belediyemiz ekipmanlarının kullanılabilirlik olması SSB uygulanmasına karar verilmesinde büyük etken olmuştur. Araştırmalarımız süresince karayolu üst yapısında uygulanan sathi kaplama ve beton kaplama, İlimiz kırsal yol ağında tespit edilen olumsuzluklar da dikkate alınarak karşılaştırılmış olup elde edilen bilgiler aşağıda paylaşılmaktadır.

2.1 Malzeme Olarak Asfalt ve Çimento

Bitümlü malzeme grubuna dahil olan asfalt, rafinerilerde büyük çoğunluğu yurt dışından ithal edilen ham petrolden elde edilir. Türkiye'de 5 rafineri faaliyet göstermekte ve İlimize İzmit Rafinerisinden malzeme temin edilmektedir.

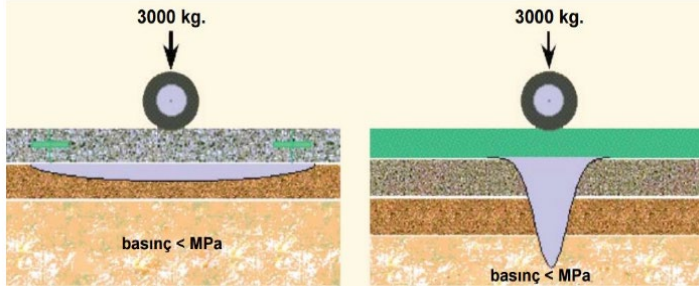
Portland çimentosunun ana hammaddeleri ise doğada bol miktarda bulunan kalker ve kildir. Portland çimentosu su ile karıştırıldığında zamanla katılarak (priz alarak) sertleşmekte ve bir süre dayanım kazanmaya devam etmektedir. Asfalt gibi ısınınca sıvılaşmaz. Değişik dayanım sınıflarında çimentolar elde edilerek sülfatlara karşı direnci arttırmak da mümkündür. Bir bölümü endüstriyel atıklar olmak üzere çeşitli mineral katkılarla üretilen çimentolar teknik, ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamaktadırlar. [1-2] İlimiz sınırlarında iki tane entegre çimento fabrikası ve 17 adet hazır beton üretim tesisi bulunmaktadır.

Dolayısıyla SSB kaplama yol uygulamasında hammaddesi İlimiz sınırları dahilinde elde edilen %100 yerli malzeme kullanılacağı için ekonomik açıdan avantaj sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

2.2 Esnek ve Rijit Karayolu Üstyapıları

Üst kaplama tabakasında bağlayıcı olarak asfalt kullanılanlara “esnek”, çimento kullanılanlara ise “rijit” üstyapı denilmektedir. Esnek ve rijit üstyapılarda trafik yüklerinin üst kaplama tabakasından zemine intikali Şekil 2’de görüldüğü gibi birbirinden farklıdır [3]. Rijit beton yol, elastik zemine oturan bir giriş şeklinde çalışmakta ve trafik yüklerini bu esasa göre geniş bir alana yayarak, taban zeminine iletmektedir. Elastik zemine oturan bir giriş gibi çalıştığı için taşıma gücü taban zemininin direncine bağlı bulunmamaktadır. Bu nedenle, rijit beton

kaplamalı yol, zayıf taban zeminleri üzerinde esnek kaplama türü olan sathi kaplama yollara göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Sathi kaplamanın yük taşıma yeteneğinin az olması nedeniyle, üstyapının yük taşıma kapasitesinin hesaplarında dikkate alınmazken beton yolların taşıma gücü yüksektir. Bu bakımdan, ağır trafik altındaki yollarda, beton kaplamalı yol uygulaması, dayanıklılığı nedeniyle çok daha uygun olacağı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 2. Rijit ve Esnek Kaplamalarda Yük Dağılımı

2.3 Yapımla İlgili Hususlar

Sathi kaplamada yola serilen asfalt, kırmataş (mıcır) ile yerinde sıkıştırılır. Zeminin kuru veya en fazla %2 oranında nemli olması, hava sıcaklığının 15 °C' den düşük olmaması gerekir. Bu da karasal iklimin hakim olduğu ilimizde yol kaplaması yapım sezonunu fazlasıyla sınırlandırmaktadır.

SSB kaplamalarda kullanılan beton, beton santralinden damperli kamyon vasıtası ile inşaat yerine taşındıktan sonra finişer ile yola serilmektedir. Zeminin ıslak oluşu beton için problem teşkil etmediğinden, inşaat mevsimi gerekli önlemler alınarak uzatılabilmektedir. Kür uygulaması her beton yapı için önemli olduğu gibi beton yol kaplamasında da önem teşkil etmekte olup; mevsim koşulları gözetilerek kür işlemi çeşitli kimyasallarla da yapılabilir. Beton yeterli dayanım kazandıktan sonra yolun hizmete açılması gerekmektedir. Bu nedenle yapım sırasında özellikle ağır tonajlı araç geçişine izin verilmemelidir.

SSB beton kaplamasının uygulanabileceği mevsim koşulları dolayısıyla ilimiz kırsal yol ağında daha uzun zamana yayılan imalat imkanı sağlayacağı kanaatine varılmıştır.

2.4 Dayanıklılık ve Kullanım Ömrü

Asfalt ve betonu yıpratıcı faktörler sıcaklık ve nem değişimleri ve farklılıkları, donma-çözülme, aşırı yükler, tekrar eden yükler ve zararlı kimyasallardır.

SSB yol kaplamasının dayanıklılığının en fazla önem kazandığı mevsim yağışların yoğun olduğu ilkbahar ve sonbahar mevsimleridir. AASHTO tarafından Kanada'da yapılan bir araştırmaya göre, asfalt kaplamaların % 61'i bahar koşullarında bozulurken, beton kaplamaların aynı koşullardaki bozulma oranı sadece % 5,5 olmaktadır [4].

Asfalt sıcaklık değişimlerine karşı betona nazaran daha duyarlıdır. Bu durum yazın yumuşayarak tekerlek izi, kışın da gevrekleşerek çatlaklar oluşmasına neden olmaktadır. Düşük geçirgenliği sayesinde, SSB donma-çözülme koşullarına, kimyasal etkilere karşı daha fazla dirençli ve dayanıklıdır. Soğuk ve yağışlı iklimlerde donma-çözülme etkisine karşı beton karışımına kimyasal katkılarla hava sürüklemek etkili korunma sağlamaktadır.

Malzeme olarak asfalt zamanla yıpranır ve sertleşerek bağlayıcılık özelliğini kaybetmeye başlar, agrega ile aderansı azalır, çatlak ve suda çözünürlüğü artar [1,2]. Bu olumsuzluk sathi kaplamanın direncinin düşmesine ve ömrünün azalmasına neden olmaktadır.

Kışın buzlanmaya önlem olarak kar yağışlarında yolların tuzlanması her iki kaplama türüne de olumsuz etkileri vardır. SSB yol imalatında geçirgenliği düşük kaplama yüzeyi oluşturarak önlem alınabilir [1].

SSB yol kaplamalarının 35 - 40 yıl ve daha uzun süre dayanmak üzere tasarlandığı göz önüne alındığında, en önemli üstünlüğünün uzun hizmet ömrü olduğu sonucuna varılmaktadır.

2.5 Sürüş Güvenliği ve Konforu

SSB kaplamaların rijit olması sayesinde uzun süre yüzey düzgünlüğü bozulmamaktadır. Bu nedenle de daha güvenli, daha konforlu sürüş sağlamaktadır. Kanada'da yapılan bir araştırma, beton kaplamalı yollardaki düzgünlük kaybının 5 yıl içinde 4 mm'den 7 mm'ye çıkarken, asfalt kaplamalı yollarda 16 mm'ye çıktığını göstermiştir. Bu sonuç, betonda yüzey düzgünlüğünün daha uzun süre korunduğunu ortaya koymaktadır [4].

SSB kaplamanın kayma sürtünme katsayısı yüksek bulunmaktadır. Ayrıca, yol yüzeyi düzgün olduğundan, yağış suları kolayca akmakta ve yüzey çabuk kurumaktadır [1]. Asfalt kaplamada oluşan tekerlek izlerinin yağışlı havalarda fazla su tutmakta bu da su kayağı etkisine sebep olmaktadır. Su birikintilerinin düşük sıcaklıklarda donması nedeniyle uzayan duruş mesafeleri riski doğmakta, ayrıca betonun ışık yansıtma özelliği sayesinde hem gece güvenli seyir hem de karayolu aydınlatma maliyetlerinde tasarruf sağlanmaktadır.

2.6 Bakım Maliyetleri

Beton yollar az bakım gerektirir. Sathi kaplamalar trafik, hava koşulları vb. etkenlere bağlı olarak hasar görmekte ve sık sık bakım ihtiyacı doğmaktadır. SSB kaplamalarda beton dayanımının yüksek olması nedeniyle, doğru malzeme karışımı ile doğru uygulama da yapıldığı takdirde bakım çok nadiren gerekmektedir.

2.7 Akaryakıt Tüketimi

SSB kaplama yollar, ağır tonajlı kamyon trafiğinde deformasyona uğramayan rijit yollardır. Rijit yüzey tekerleklerin dönmesini kolaylaştırdığından beton kaplamaların “Yuvarlanma Sürtünme Katsayıları” düşüktür. Dolayısıyla tekerleğin dönme hareketine karşı yol direnci düşük olduğu için motordan tekerleklere aktarılan kuvvet daha az olmaktadır. Bu durumda

da yakıt ve yağ giderleri ile bandaj ve lastik aşınması azalmaktadır [4]. ABD’de, Federal Highway Administration (FHWA) ve Hindistan’da Central Road Research Institute tarafından yapılan denemeler, beton kaplamalarda asfalt kaplamalara göre yaklaşık % 15 – 20 yakıt tasarrufuna ulaşıldığını göstermiştir [5].

2.8 Çevresel Etkiler

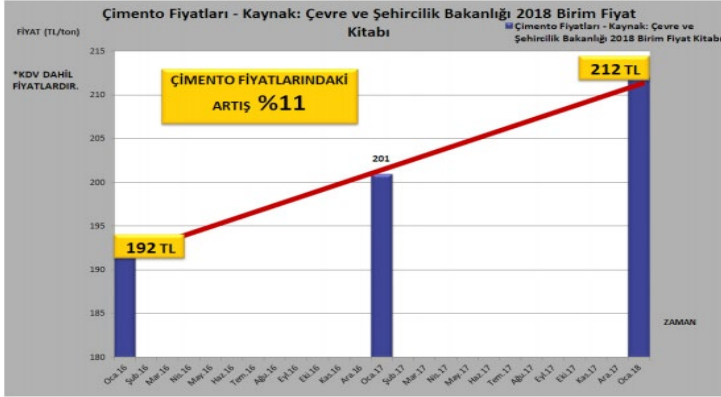
SSB kaplama yolun faydalı ömrü 35 - 40 yıl civarında bulunmaktadır. Beton kaplama yeniden yapılacağına, eski yüzeyin kırılarak yeni yolda kullanılabilmesi, beton üretiminin atmosferi kirletmiyor oluşu, termal güç tesislerinin kirletme yan ürünü olan uçucu külün beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi oluşu, sathi kaplamaya oranla taşıtların SSB kaplama yolda daha hızlı seyretmesi nedeniyle taşıt emisyonundan kaynaklanan çevre kirliliğinin de daha düşük düzeyde olması; SSB yol kaplamasının çevre dostu olduğunu ve sürdürülebilirliği desteklediğini göstermektedir.

2.9 Yaşam Döngüsü Maliyeti

SSB kaplama yolların ilk yapım maliyeti, taban zemininin taşıma gücü ve trafik miktarına bağlı olarak sathi kaplama yollara göre yüksek olabilmekle birlikte, bitüm fiyatlarının sürekli artması ve bu iki tip kaplamanın maliyeti oldukça karşılaştırılabilir duruma gelmektedir. Diğer yandan, beton en iyi yaşam döngüsü maliyetli seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Ekonomik açıdan doğru kaplama seçimini yapabilmek için beklenen hizmet ömrü, yolun ömrü boyunca söz konusu olacak yaklaşık bakım maliyetleri vb. tüm giderler bir arada değerlendirilmelidir. Yaşam döngüsü maliyetleri göz önüne alındığında, uzun ömürlü ve basit bakımlı SSB kaplama yolların sathi kaplama yollara göre genellikle daha ekonomik olduğu görülmektedir. Daha genel bir değerlendirme yapılarak kullanıcı giderleri de düşünüldüğünde yakıt tasarrufu sağlanması ve çevre dostu olması SSB kaplama yollar sathi kaplama yollara göre avantajlı bir seçenek durumuna gelmektedir. Tablo 1 ve Grafik 1 de de çimento ve asfalt emülsiyonlarındaki fiyat artışlarına bakıldığında da; çimentoda ki fiyat artışının çok daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 1: Bitüm fiyatı değişimi (İzmit Rafinerisi Fiyatları)

Bitüm Sınıfı	Fiyat (TL/ ton) 8 Ocak 2016	Fiyat (TL/ton) 9 Kasım2018	Değişim (%)
AC 50/70	380,77	2.523,99	563
FM2B2 (MC30)	1.502,14	4.934,76	230



Şekil 3. Çimento fiyatı değişimi

3 İlimizde Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Uygulamaları

SSB yol kaplamaları üzerine yapılan araştırmalar sonucunda Eskişehir Büyükşehir Belediyesi kırsal yol ağında sathi kaplamanın alternatifi olarak öncelikli ve uygun grup yollarında SSB kaplama imalatı yapılmasına karar verilmiştir. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi öncülüğünde TÇMB tarafından Eskişehir’de Beton Yol ve Uygulamaları semineri düzenlenmiş, Yol Yapı Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığınca yapılan araştırmalar ve planlanan uygulamalar hakkında da bilgi verilerek, ilçe belediyelerinin de katılımıyla SSB kaplamasının İlimizde uygulanması değerlendirilmiştir. Akabinde de Belediyemiz ekip ve ekipmanları tarafından imalata geçilmiştir. Aradan geçen süre zarfında Belediyemiz imkanları ve ihaleli işler olmak üzere yaklaşık 40 km SSB kaplaması uygulanmıştır. Halen çalışmalar devam etmekte olup 2019 yılı sonu kadar kırsal yol ağında SSB kaplaması uygulamasının 50 km.’ye ulaştırılması planlanmaktadır. Eskişehir Büyükşehir Belediyesince uygulanan SSB kaplamasına ilişkin genel ve teknik bilgiler Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 2. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi yetki alanında SSB kaplaması uygulanan yol güzergâh bilgileri

Yolun Adı	Yol Mesafesi (km)	Yol Genişliği (m)	Kalnlık (cm)	Miktar (m ³)
Kandilli Yolu	6	6	17	7.200
Hatboyu – 3 Caddesi	9,6	7	15	11.760
Cevizli – Bardağcı Yolu	36,3	7	15	44.468

Tablo 3. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi SSB kaplaması uygulamalarına ilişkin teknik bilgiler

	Kandilli Yolu	Hatboyu-3 Caddesi	Cevizli-Bardakçı Yolu
Hava Sıcaklığı	0 C° - 10 C°	15 C° - 30 C°	20 C° - 40 C°
Kalınlık	17 cm	15 cm	15 cm
Yoğunluk	2485	2511	2511
Yol Çatı Eğimi	%2	%1 – 2	%1 – 2
Su Oranı	%4,5	%4,5	%4,5
Su/Çimento	0,38	0,38	0,38
Kür	1-5 Gün (Hava Sıcaklığı Uygun)	10 Gün	10 Gün
Finişer	Tek	Tek	Tek
Silindir	1 Vabil 2 Bandaçlı	1 Vabil 2 Bandaçlı	1 Vabil 2 Bandaçlı
Katkı	-	-	-
Bakım	-	-	-

3.1 Eskişehir Büyükşehir Belediyesince Uygulanan SSB Kaplamasında Kullanılan Malzemelere İlişkin Bilgiler

Agrega: Beton üretiminde kullanılacak agreganın temiz, sağlam, dayanıklı olmasına ve bünyesinde zararlı miktarlarda toz, çamur, kil veya organik kökenli yabancı maddeler bulundurmamasına önem verilmiş, teknik şartnamede TS 706 EN 12620 standardına uygun malzemeler kullanılarak beton üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çimento: Kullanılan çimentolar, TS EN 197-1 “Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri” standardına uygun seçilmiş, CE işaretlemesi ve etiketlemesi olmayan çimentolar kullanılmamıştır.

Su: Karışımda kullanılacak suyun, TS EN 1008 “Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları” standardına uygunluk belgesi olmasına, yağ, tuz, asit, alkali gibi endüstri atıkları ve beton kalitesi için zararlı olan organik materyaller içermemesine dikkat edilmiştir.

Katkı Malzemeleri: SSB yol yapımında genel olarak; hava sürükleyici, akışkanlaştırıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkıları ile uzun işlenebilirlik ve priz geciktirici katkıları kullanılabileceği öğrenilmiş olup; henüz kendi uygulamalarımızda herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamıştır.

Karışım Tasarımı: SSB karışımını oluşturan malzemelerin miktarları, “SSB Karışım Tasarım Raporu” hazırlanarak belirlenmiş olup; asgari Karakteristik Basınç Dayanım sınıfı C30/37 olacak şekilde düzenlenmiştir. Karışım gradasyonunun Tablo 06’ da verilen limitleri içerisinde kalmasına, beton kıvamının slump (çökme) değeri 0 mm verecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir.

Tablo 4. SSB Tabakası Gradasyon Limitleri

Elek Açıklığı (mm)	% Geçen
22,4	100
16	80-100
11,2	65-90
4	35-65
2	25-45
0,5	12-28
0,063	2-8

Tablo 5. SSB Karışım Tasarımı-1

Bileşen	Miktar	Ölçü Birimi
CEM I 42,5 R TS EN 197-1:2012	330,00	kg.
Su	106,30	kg.
0-4 mm kırma kum	1.033,40	kg.
7-15 mm kırma agrega	726,60	kg.
15-22 mm kırma agrega	314,70	kg.
TOPLAM	2511	kg./ m³

Tablo 6. SSB Karışım Tasarımı-2

Bileşen	Miktar	Ölçü Birimi
Cem I 42,5 R TS EN 197-1:2012	325,00	kg.
Su	110	kg.
0-5 mm kırma kum	1050	kg.
7-15 mm kırma agrega	560	kg.
15-22 mm kırma agrega	440	kg.
TOPLAM	2485	kg./m³

3.2. Eskişehir Büyükşehir Belediyesince SSB Kaplaması Uygulama Aşamalarına İlişkin Bilgiler

Hazır Beton: SSB Karışım tasarımında belirtilen oranlarda hazırlanan malzemeler, Kandilli ve Hatboyu-3 yolları için beton santralinde, Cevizli-Bardakçı Yolunda ise beton harman tipi mobil plantte karıştırılarak üretilmiştir. Uygulamada finişerin durma ve yeniden sermeye başlama hareketlerinin malzemede ayrışma ve yüzey bozukluklarına sebep vermemesi için yapım ve üretim hızının uyumlu olmasına önem verilmiştir.

İş Yerine Taşınması: SSB Karışımı damperli kamyonlarla iş yerine taşınmıştır. Taşıma esnasında betonun zaten az olan rutubetini kaybetmemesi için branda örtülmüştür. Bu şekilde beton yağmurdan ve aşırı sıcaktan da korunmuştur. Kamyon adedi, beton üretim tesisinin kapasitesi ve taşıma mesafesi göz önüne alınarak imalatın kesintisiz olmasını sağlayacak şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır.

Betonun Serilmesi: SSB serme işlemi süreklilik arz edecek şekilde yapılmaya çalışılmıştır. Sıkışmış kalınlık 15 cm olacak şekilde serim yapılması için kalınlık kontrolü yol boyunca rutin olarak yapılmıştır. Serim için kayar kalıplı finişer kullanılmış, finişer ayarları SSB tabakasını %80 sıkışıklıkta serecek şekilde yapılmıştır. Yağmurlu havalarda SSB imalatı durdurulmuştur.

Sıkıştırılması: Beton serilir serilmez sıkıştırma işlemine başlanmıştır. İstenilen sıkışmanın sağlanması için gerekli olan finişer ayarları, sıkıştırma makineleri ve geçiş sayıları, serilen kesimin ilk 20 m' lik kısmında denenerek belirlenmiştir. Sıkıştırma ağırlığı en az 11 ton olan çelik bandajlı silindir ve lastik başına düşen yükü en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli silindir kullanılmıştır. Sıkıştırma sırasında segregasyona uğramış kısımlar olduğunda bir saat içerisinde kaldırılarak yerine uygun malzeme getirilmesi ve sıkıştırılması yoluyla düzeltilmiştir. Sıkışma kontrolleri yapılarak %98 oranı sağlanıncaya kadar sıkıştırma işlemine devam edilmiştir.

Derz Kesme: Günlük imalatın sonunda veya herhangi bir sebeple 1 saatten fazla ara verildiğinde sıkışmış SSB tabakasının bitim yerleri yol eksenine dik doğrultuda özel kesme ekipmanları ile kesilerek enine inşaat derzi yapılmıştır.

Beton Kürü: Uygulamalarımızda sıkıştırmanın tamamlanmasından sonra hemen püskürtme şeklinde su kürü yapılmıştır. SSB kaplaması imalatından sonra 10 gün süreyle de arasözle su kürüne devam edilmiştir. Kenarlarda da yeterli kürlenme yapılabilmesi için arasözlere uygun aparatlar taktırılmıştır.

Trafik: İmalatı tamamlanan SSB yol yüzeyinin araçlardan koruması için yol trafiğe kapatılmış, imalat yapılan kısımlarda 24 saat süreyle araç geçişine engel olunmuştur.

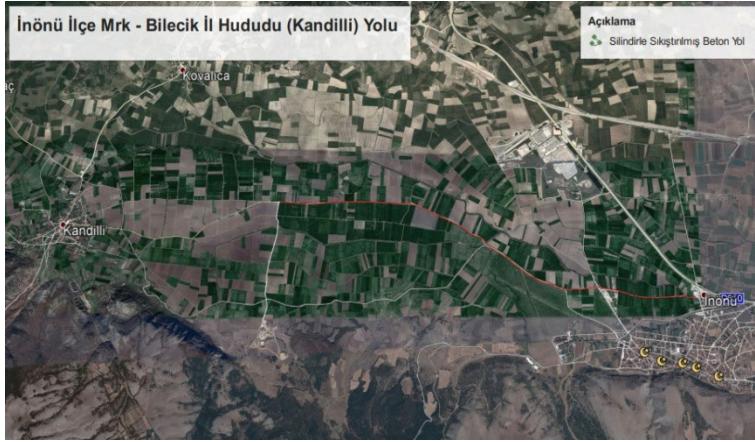
Kalite Kontrolü: Kullanılan malzemeyi kontrol etmek amacıyla, belirli aralıklarla kalite kontrol deneyleri yapılmıştır. Sıkışma Kontrolü için Kum Konisi Metodu ve Nükleer Metot kullanılmıştır. Taze betondan 15x15x15 cm ebatlarında küp numuneler alınarak 7, 14 ve 28 gün küre tabi tutulduktan sonra TS EN 12390-3 standardına göre Basınç Dayanım testi yapılmıştır.

Ayrıca SSB tabakasının dayanımı 28 günlük olgunluk yaşına göre 150 mm çapında karot alınarak belirlenmiş, karotların alındığı yerler aynı sınıf betonla en kısa zamanda sıkıştırılarak doldurulmuştur.

3.3 İnönü-Kandilli Yolu

Eskişehir Büyükşehir Belediyesi sorumluluk alanında SSB kaplama uygulaması 22.12.2018 tarihinde Şekil 4.'te gösterilen İnönü-Kandilli yol güzergahında Belediyemiz Yol Yapı Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı ekip ve ekipmanlarıyla yapılmaya başlanmıştır. Söz konusu çalışma 6 km uzunluğunda ve 6 m genişliğinde yapılmış olup, öncesinde 40 cm dolgu ve mekanik malzeme ile 15 cm temel yapılmıştır. Uygulamada C30/37 basınç dayanımlı, sıfır slump hazır beton kullanılmıştır. Su / Çimento oranı 0,38 olup, TS EN 206 ve TS EN 13515'e göre hazırlanmış beton karışımı kullanılmıştır. Çalışmada esnek yolların yapımında kullanılan iş makinelerinden faydalanılmıştır. Uygulamada iş makinası olarak 1 adet vabil tip ve 2 adet çelik bantlı silindir ile sıkıştırma işlemi yapılmış, serim için ise geleneksel asfalt finişeri kullanılarak bulunan donanımda herhangi bir modifikasyon işlemi yapılmadan beton karışımı zemin dolgusu üzerine yerleştirilmiştir. Çalışmalar yaklaşık bir ayda tamamlanmıştır. Hava sıcaklıkları 0 C° - 10 C° arasında seyretmiş olup, beton kaplamanın İlimiz ilkim koşullarında sonbahar ve kış aylarında dahi uygulanabileceği görülmüştür.

Üzerinden geçen zaman zarfında yolda trafik güvenliğini etkileyecek herhangi bir bozulma tespit edilmemiş olup; bölge halkından memnuniyet bildiren dönüşler alınmaktadır.



Şekil 4-5 : İnönü-Kandilli Yolu



Şekil 6. İnönü-Kandilli Yolu yapılan çalışmalar ve deneyler

3.4. Hatboyu-3 Caddesi

Eskişehir İli, Tepebaşı İlçesi, Hatboyu – 3 Caddesi Şekil 7’ de görülen yol güzergahında, Fevzi Çakmak Mahallesi ile Cumhuriyet Mahallesi arasında 9,6 km uzunluğunda 7 mt genişliğinde SSB yol kaplaması “Eskişehir İli Mahalle Yollarının Silindirle Sıkıştırılmış Beton(SSB) Yol Kaplama Yapılması İşİ” kapsamında ihale yoluyla yaptırılmıştır. İmalatlara Haziran ayında başlanmış ve yaklaşık 1 ayda tamamlanmıştır. Yapım esnasında karşılaşılan en büyük sorun, tarım arazilerine ulaşımı sağlayan yol güzergahının özellikle bu aylarda yoğun araç trafiğine maruz kalması nedeniyle imalat sonrası korunmasının sağlanması olmuştur.



Şekil 7. Hatboyu-3 Caddesi



Şekil 8. Hatboyu -3 Caddesi yapılan çalışmalar ve deneyler

3.5. Cevizli – Bardakçı Yolu

Eskişehir İli, Seyitgazi İlçe Merkez .- Cevizli - Bardakçı - Hankaraağaç - Gökçekuyu Mahalle Yolu Şekil 9’ da görülen yol güzergâhında, 30,3 km uzunluğunda 7 mt. genişliğinde SSB yol kaplaması “Eskişehir İli Mahalle Yollarının Silindirle Sıkıştırılmış Beton(SSB) Yol Kaplama Yapılması İşi” kapsamında ihale yoluyla yaptırılmıştır. Dört mahalleye hizmet veren söz konusu yol Seyitgazi ve Han İlçeleri arasında da ulaşımın sağlandığı alternatif yol güzergâhıdır. Çalışmalar Temmuz ayı itibariyle başlamış olup, Eylül ayı sonunda tamamlanacaktır.



Şekil 9. Cevizli – Bardakçı Yolu





Şekil 10. Cevizli – Bardakçı Yolu yapılan çalışmalar ve deneyler

3.6. SSB Kaplaması Uygulamalarımızda Kalite Kontrol Amacıyla Yapılan Bazı Test Sonuçları

Beton üretimi sırasında alınan küp numunelerin basınç deneyleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Laboratuvarında yapılmıştır.

Tablo 7. Küp beton numuneleri basınç dayanımı sonuçları

Boyut (cm)	Numune Yaşı (gün)	Kırılma Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
15x15x15	7	835,79	37,15
15x15x15	7	887,46	39,44
15x15x15	7	914,60	40,65
15x15x15	14	1045,18	46,45
15x15x15	14	1082,80	48,12
15x15x15	14	1040,90	46,26
15x15x15	28	1085,70	48,25
15x15x15	28	1129,80	50,21
15x15x15	28	1189,30	52,86

Tablo 8. Silindirik beton numuneleri basınç dayanımı sonuçları

Yükseklik (cm)	Numune Yaşı (gün)	Kırılma Yükü (kN)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
15,10	28	495,78	37,37
16,00	28	523,41	39,45
15,15	28	605	40,44

3.7. SSB Kaplaması Uygulamalarımıza İlişkin Maliyet Bilgileri

Tablo 9. Maliyet bilgileri

Yolun Adı	SSB Kaplama Maliyeti (TL)	Açıklama
Kandilli Yolu	472.520,00	Beton hibe yoluyla temin edilmiş, imalat İdare ekip ve ekipmanları ile yapılmıştır.
Hatboyu –3 Caddesi	1.798.776,00	Altyapı idare tarafından hazırlanmış, kaplama yükleniciye yaptırılmıştır.
Cevzili – Bardakçı Yolu	7.593.553,80	Altyapı idare tarafından hazırlanmış, kaplama yükleniciye yaptırılmıştır.

3.8. Tüm uygulamalarımızda tespit ettiğimiz önemli hususlar özetle aşağıda açıklanmaktadır:

- 1- Tasarımda belirlenen oranlara mutlaka uyulmalı, hava sıcaklıklarındaki ani değişikliklere dikkat edilmeli ve karışımdaki oranlara gerektiğinde doğru müdahaleler yapılmalıdır.
- 2- Beton yol kaplamalarında kullanılan her bir agrega fraksiyonu Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) ve zararlı organik maddeler ve kil yönünden mutlaka test edilmelidir. Killi agrega bulunan kısımlarda soyulma, sonrasında da çukurlaşmalar gözlenmektedir.
- 3- Betonun iş yerine taşınması sırasında dış etmenlerde olabildiğince korumak için mutlaka branda kullanılmalıdır.
- 4- Projedeki kalınlığa uyulabilmesi açısından kalınlık kontrolleri düzenli olarak yapılmalıdır.
- 5- Sıkışma kontrolleri için nükleer metodun kullanılması ve gerekli hallerde müdahale edilerek %98 sıkışmanın sağlanması büyük önem taşımaktadır. Özellikle yolun her iki kenarında da birer metrelik hat boyunca sıkışmanın kontrolüne özen gösterilmelidir.

- 6- Su kürü sırasında özellikle yolun her ki kenarının da yeterli miktarda su alabilmesi sağlanmalıdır.
- 7- İmalatı tamamlanan SSB yol yüzeyinin araçlardan mutlaka korunması gerekmektedir. 24 saatten önce üzerinden taşıtla geçilen veya manevra yapılan kaplamada teker izleri ve deformasyon gözlemlenmiştir

4 Sonuç

Belediyemizce yapılan araştırma ve uygulamalarda, SSB kaplama üretiminde %100 yerli malzeme kullanılıyor olması başta olmak üzere, dayanıklılık ve kullanım ömrü, yaşam döngüsü maliyeti, bakım maliyeti, akaryakıt tüketimi, çevresel etkiler gibi faktörler de göz önünde bulundurulduğunda;

SSB kaplamasının İlimiz kırsal yol ağında, mevsim koşulları ve ekonomik kriterler gözetilerek, doğru karışım ve doğru uygulamalar sağlandığında asfalt sathi kaplamaya alternatif olduğu görülmüştür.

Uzun servis ömrü, düşük yapım ve onarım maliyeti, inşaat ve onarım kısıtlılığı, yakıt tasarrufu, sürüş güvenliği ve konforu, kalite kontrol kolaylığı, ağır trafik yükü, hava ve zemin şartları gibi teknik ve ekonomik nedenler dolayısıyla SSB kaplamasının yaygınlaşması gerektiği düşünülmekte olup; %100 yerli malzeme kullanılan, yapımı hassasiyet ve tecrübe gerektiren bir imalat olan beton yol uygulamasında Eskişehir Büyükşehir Belediyesi İlimizde ve ülkemizde öncülük etmektedir.

Kaynaklar

- Ağar,E., Sütas.İ. ve Öztaş,G., “Beton yollar”, İ.T.Ü. Yayını, Sayı 1594, İstanbul, 1998, 392 p
“Benefits of Concrete Highways”, Cement Association of Canada, 2001.
Smith,T., Tighe,S. ve Fung,R., “Concrete pavements in Canada: A review of their usage and performance”, Proc., Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Halifax, 2001.
Tunç,A., “Yol malzemeleri ve uygulamaları”, Atlas Yayınları, İstanbul, 2001, 840 p
Zaniewski, J.P., “Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption”, SR289.01P, Por land Cement Association, Skokie, Illinois, 1989.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Polish Experience in The Concrete Roads Construction

Jan Deja¹, Piotr Kijowski²

¹ The Polish Cement Association, Faculty of Material Science and Ceramics, AGH University of Science and Technology, Cracow, Poland

² The Polish Cement Association

Abstract

The paper presents Polish experience in promotion of concrete pavements over past 25 years. In Poland there was a dominant technology and one may say the only one – the technology of flexible bituminous pavement. The consistent actions of Polish cement industry represented by Polish Cement Association and some construction companies have led to changes in technology of road construction. Concrete pavements have received recognition and become a technology which is more often chosen by road administration and local governments. The authors of the paper present promotion activities, their effects and also the challenges and potential threats resulting from the strong asphalt competition.

Keywords: *Concrete Pavement / Promotion Activity / Concrete Roads / Road Construction.*

1 Introduction

Polish Cement Association has been promoting concrete pavement roads for 25 years. Passing information on advantages of local concrete roads to road administration and local governments is the key action. Consistent organisation of conferences and seminars, publishing books and brochures has proved effective. Over 750 km of main national roads (motorways and express roads) managed by General Directorate for National Roads and Motorways have concrete pavement. Another 700 km of them is being built. After all the investments on national roads have been completed, the share of concrete pavements in Poland will be about 25%. Local governments, the number of which is 2793 in Poland (314 counties and 2479 municipalities), are more and more interested in modernisation and/or construction using concrete technology. During the past 20 years a lot of local road sections were made in concrete technology. Polish Cement Association estimates that their total length amounts to 800 km.

2 Concrete roads promotion

Concrete pavements appeared in public discussion in the recent history of road construction for the first time in 1994. During the International Road Construction Fair Autostrada – Poland Jan Deja, the co-author of this paper, presented a presentation entitled ‘Why not concrete’. The audience was surprised that the roads with concrete pavement can be built in Poland. Proponents of asphalt pavements placed numerous arguments against concrete technology. They said that it is three times more expensive than asphalt technology, that concrete pavements are noisy and that there is neither equipment nor qualified staff able to construct concrete pavements. Systematic and consistent actions of Polish Cement Association have led to changes in technology in Polish road construction, and concrete has become a technology equivalent to competitive asphalt.



Figure 1. Fair Autostrada-Poland 2006, Exhibition stand of the Polish Cement Association

The first document used for designing concrete rigid pavements was created thanks to the annual involvement of Polish Cement Association in road conferences and presentation of advantages of concrete pavements, such as: high durability, resistance to rutting, greater safety, lower cost of the operation, availability of domestic resources, the possibility of recycling, and even lower level of noise. Representatives of Polish Cement Association took active part in devising the document. In 2001 the General Directorate for Public Roads (present General Directorate for National Roads and Motorways) approved and introduced the document under the name Catalogue of Typical Rigid Pavements Construction. In 2014 the Catalogue was updated. New material requirements were introduced and a new category was added for traffic on roads with heavy traffic.



Figure 2. Catalogue of Typical Rigid Pavements Construction – on the left edition of 2001, on the right edition of 2014

In subsequent years Polish Cement Association shared knowledge on concrete roads by organizing seminars, taking part in fairs and by publishing activity. In 2004 the book ‘Concrete road pavements – theory, measurements and realisation’ was published. It was written by prof. Antoni Szydło from Wrocław University of Technology. The book became a primary course book for students of road construction and a helpful book for designers and constructors.

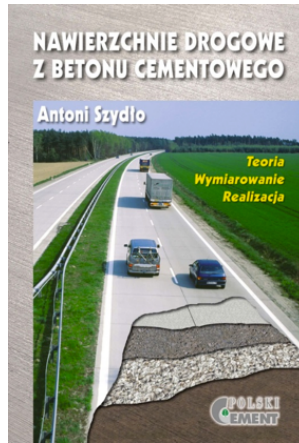


Figure 3. The book “Concrete road pavements”

Actions described above were directed to road administration which manages national roads, i.e. motorways, express roads and main roads. Local governments were another target of information and promotion activities, as they manage 95% of total length of roads.

It’s worth mentioning that road network in Poland amounts to nearly 420000 km, of which almost 5% is managed by General Directorate for National Roads and Motorways supervised directly by the Minister for Infrastructure and Construction. The remaining number of road network is managed by local governments on three levels: provincial, county and municipal, as shown in the Table 1.

Table 1. Division of public roads in Poland

Roads	Management	Total length [km]	Share [%]
National	General Directorate for National Roads and Motorways	19 292.8	4.6
Provincial	Board of the province	29 108.6	6.9
County	Board of the county	125 092.3	29.8
Municipal	Head of the municipality (Mayor, President of the city)	246 142.7	58.7
Total		419 636.4	100.0

In 1999 the first national conference ‘Local Roads’ was organised. Nearly 200 members of local governments from all around Poland took part in it. They had an opportunity to get to know various advantages of concrete pavements. They were also informed about European experience in construction of local roads with concrete pavement. Experiences which were presented were those of Belgium, Germany, Austria and England.

In subsequent years Polish Cement Association shared knowledge on concrete roads by organizing seminars and by publishing activity. The information brochure ‘Concrete pavements on municipal roads’ was published and the film ‘How to build a good road’ was made. The demonstration of the concrete pavement road was organised and carried out during the Fair Autostrada – Poland in 2005.



3 Technologies

3.1 Main national roads

Construction technology of main national roads (motorways and express roads) involves help of modern concrete pavers. Concrete mix is put in two layers using a method called wet-on-wet. Dowels and anchors are used. Casting grouts or elastomer dilatation inserts are used to fill dilatation gaps. For a few years the upper layer of pavement has been finished in exposed aggregate technology, which ensures good adherence and low noise level. Previously jute matting or brushing were used for texturing.



Figure 5. Motorway A1 in construction in the vicinity of Łódź (2015)

3.2 Local government roads

Local government roads are built with the use of basic construction equipment. Technology which was used involved putting concrete mix into permanent formwork and compacting it with a vibrating strip. Concrete pavement laying takes place on an existing road which is used as a base. In some cases the construction followed the ‘new road trace’. The structure was given to the pavement by brushing. Next, paraffin preparations are applied on the surface. They prevent rapid evaporation of water. After the concrete has achieved appropriate strength, dilatation gaps are cut and filled with bituminous casting grouts.



Figure 6. Local government road construction with the use of a vibrating strip

Building local government road with the use of concrete pavers is a more advanced technology. The method is comparable to the construction of main roads. However, there is one difference. In local government roads the concrete layer thickness is smaller and laid in one layer. Remaining technological processes are the same.



Figure 7. Construction of local government road using slip formwork and the paver

Using professional equipment with slip formwork guaranteed a very high quality of concrete surface. Table 2 below presents the ingredients of concrete mix and the Fig 2 shows grain-size distribution curve. Table 3 below presents testing compressive strength of concrete.

Table 2. Ingredients of concrete mixture

Ingredients	Amount per 1 m³ [kg]
Cement CEM I 42,5	418
Water	174
Sand 0/2mm	619
Crushed aggregate 2/8mm	668
Crushed aggregate 8/16mm	557
Plasticiser	2.93
Air-entraining admixture	1.46

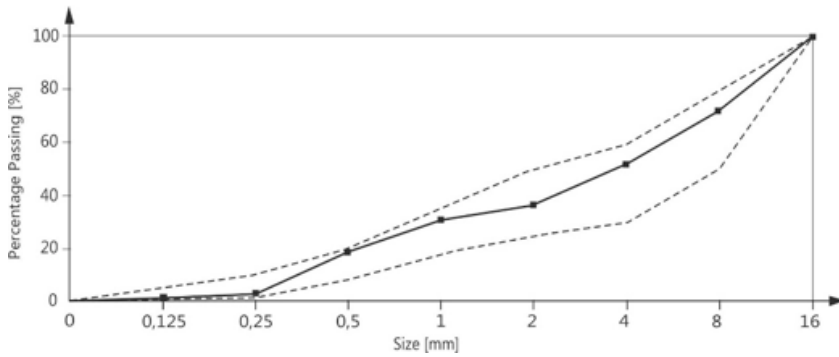


Figure 8. Grain-size distribution curve

Table 3. Testing compressive strength of concrete

Sample symbol	Compressive strength [MPa]
1	49.3
2	47.1
3	48.4
Average compressive strength $f_{cm, cube}$	48.3
Minimum compressive strength $f_{ci, lowest}$	47.1
Characteristic compressive strength f_{ck}	44.3
Compressive strength class	C30/37

Due to the low cost of realization local governments more often decide to build a road in roller-compacted concrete technology. In this method concrete mix is laid with typical pavers for bituminous mass, and then it is compacted with road rollers.



Figure 9. Construction of local government road using roller-compacted concrete technology

Another interesting usage of concrete pavements in Poland is construction of paths, squares and car parks from decorative concrete. Concrete mix is laid in permanent formwork and then it is compacted with a vibrating strip. Mixes coloured throughout mass are used in exposed aggregate technology. It gives limitless possibilities in shaping landscape architecture.



Figure 10. Decorative concrete pavement – Warsaw, a path in the park

4 Cost analysis

Polish Cement Association has been carrying out benchmarking of construction cost of rigid concrete pavements and flexible asphalt pavements for 7 years. Comparison involves typical construction solutions included in the catalogues of rigid and flexible pavements, which were approved by General Directorate for National Roads and Motorways. Cost estimate base for material prices – M, equipment – S and labour – R is the price base from Sekocenbud price list which is used in cost estimation of road work in Poland, also by General Directorate for National Roads and Motorways. Current prices and materials from the fourth quarter of 2019 were used in cost estimate.

Table 4. Cost comparison of rigid and flexible pavements construction (PLN)

Traffic categories	Flexible pavements - asphalt						Rigid pavements - concrete				
	Typ A1	Typ A2	Typ A3	Typ B	Typ C	Typ D	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV	
KR 1	117.5	98.0	97.9	111.3	134.5	99.9	115.2	145.2	138.0	–	119.2
KR 2	140.0	120.5	120.4	142.5	155.6	130.4	122.8	152.8	141.8	–	123.0
KR 3	166.1	146.6	–	171.3	182.3	–	136.8	169.0	154.4	–	143.1
KR 4	194.5	174.9	–	198.9	209.8	–	141.6	173.8	163.0	147.9	–
KR 5	223.3	203.8	–	226.6	224.8	–	202.5	203.3	178.0	–	–
KR 6	251.1	231.6	–	254.2	244.7	–	212.6	213.4	184.5	–	–
KR 7	265.0	245.5	–	268.0	258.6	–	222.5	223.4	198.1	239.9	–

1Euro ~ 4PLN

In 2015 Polish Cement Association asked independent experts to make a study of comparison of construction and operation costs of concrete and asphalt pavements in the 30-year period of usage. The study related to the construction of main roads for KR6 and KR7 traffic categories. Typical maintenance activities, which comply with Polish maintenance practice, were adopted. Replacement of dilatation filling and damaged concrete slabs was adopted for rigid pavements, and replacement of wearing and binder courses for flexible pavements. The study makes it clear that the cost of concrete pavement construction is lower as early as the stage of construction and total cost of construction and operation of concrete pavements constitutes about 50%, when compared to asphalt technology.

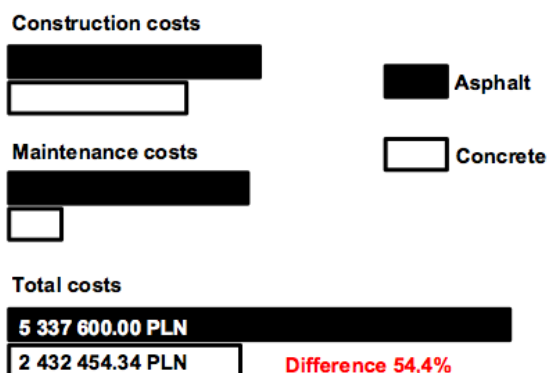


Figure 11. Collation of total cost of construction, repair and maintenance of 1 km of a two-lane express road for 30 years showing that concrete pavements are twice cheaper than asphalt pavements

The analysis and studies shown above are used by Polish Cement Association in current information and promotion activity. They are used in information material, brochures and presentations and are the vital source of information for prospective investors.

5 Conclusion

Experience in promotion of concrete pavements presented in the paper has brought measurable benefits. 25 years of work from a scratch is a sufficiently long period of time to answer the question: was it worth? The effects of these activities are not so clear on a day-to-day basis. However, when looking at statistical data YES should be a definite answer. In Poland about 750 km of concrete pavements on main roads were built and 750 km is being constructed. Local governments are more and more willing to look for durable technological solutions in local road constructions and concrete pavements prove to be a good solution for them.

Over 1000 km of concrete local government roads have been built and new investments are planned.

It's worth highlighting that concrete pavements are becoming more and more popular in Poland thanks to both their advantages and consistent promotion.

References

- Budownictwo, Technologie, Architektura (2004), Polski Cement nr 4/2004, Kraków, Poland
Budownictwo, Technologie, Architektura (2005), Polski Cement nr 2/2005, Kraków, Poland
Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych (2001), Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, Poland
Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych (2014), Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, Poland
Szydło A., Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego – teoria, wymiarowanie, Realizacja (2004), Polski Cement, Kraków, Poland
Deja J., Kijowski P., Doświadczenia z budowy i eksploatacji: autostrad, dróg ekspresowych i lokalnych wykonanych w technologii betonowej (2010), Konferencja naukowo-techniczna Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Kielce, Poland
Deja J., Kijowski P., Żurek M., Concrete pavements in Polish urban areas (2013), The 9th Central European Congress on Concrete Engineering, Wrocław, Poland
Deja J., Kijowski P., Urban concrete pavements – history and current technology (2014), The 12th International Symposium on Concrete Roads, Prague, Czech Republic
Deja J., Kijowski P., Why not concrete – a quarter of century lasting experience in promotion of concrete pavements in Poland, (2018) The 13th International Symposium on Concrete Roads, Berlin, Germany

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

50 years of concrete road experience in Wallonia

Pierre Nigro

Walloon road administration, Belgium

Abstract

The purpose of this article is to present an overview of the Walloon road network including the importance of the concrete roads in this one. Then, it will explain the different characteristics required by the administration in order to build a good-quality concrete road. Finally, a few examples of concrete road projects will be presented.

Keywords: *network, prescriptions, specific cases, administration.*

1 Introduction

Concrete roads have been an important part of the Belgian network for 100 years. The very first structures were made of concrete slabs. Then, in 1950, the first Belgian continuous reinforced concrete pavement was built in Leuze-en-Hainaut.

Due to the good performances of the concrete, many roads were built with this method, especially the important roads with a heavy traffic like motorways.

Therefore, when most of the Belgian motorways were built in the 70s, a lot of them were built with continuous reinforced concrete.

Nowadays, we still build concrete roads in Wallonia but the requirements have changed since the 70s to be more up to date. With suitable characteristics, some concrete pavements reach the acoustic and smoothness efficiency of the asphalt.

2 Overview of the Walloon road network

Wallonia is the southern part of Belgium. Originally, the road administration was a national entity. But this entity was divided in 1989 to be regionalized. Therefore, there are now 3 different administrations in charge of the Belgian roads (Wallonia, Flanders and Brussels).

The Walloon road administration is in charge of about 8,300 km of roads. It is located at the intersection of three European main ways: the first two, located on a south-north axis, go up towards the ports of Antwerp, Rotterdam and Amsterdam (traffic from Italy and Spain to Northern Europe), while the third crosses Wallonia from one side to the other (traffic from Great Britain to Eastern Europe). Because of this, heavy weight traffic is very important in Wallonia (and also in the other parts of Belgium).

Despite the fact that most of the Walloon roads are made of asphalt, concrete roads represent a significant share of the Walloon network.

Concrete roads are especially used for the motorways and the other important roads with substantial truck traffic. This use entails several characteristics which are specific to a concrete pavement structure. The first is a good bearing capacity and therefore a longer lifetime than an asphalt structure. In Wallonia, asphalt structures are designed to have a lifespan of 20 years while concrete pavement structures are designed to last 40 years. The second characteristic is less frequent maintenance works. As the road is properly built, roadworks will be less frequent on the section, which also means less inconvenience for the citizens.

Table 1. Distribution of Walloon roads and proportion of concrete structures.

Network	Total Length (km)	Length of the concrete sections (km)
Motorway	868	511
Important regional road (structuring Network)	1832	≈ 370
Other regional roads	5600	≈ 280

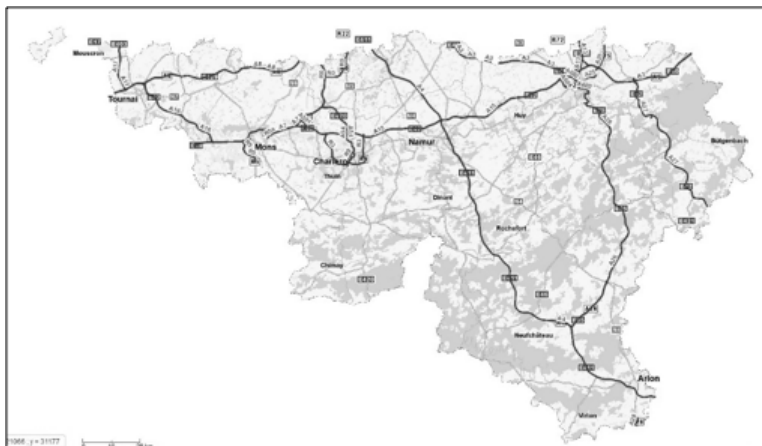


Figure 1. Walloon motorway network.

3 Requirements for concrete roads in Wallonia

Requirements for road construction in Wallonia are regulations based on standard specifications (CCT Qualiroutes) written by the administration. These specifications depend on the network classification. This classification is based on the number of trucks per day.

Table 2. Network classification in Wallonia.

Network classification	Description	Number of trucks per day
Ia - Ib	Motorways and important regional roads	Ia > 6000
		Ib < 6000
IIa - IIb	Other regional roads with a traffic > 250 trucks per day	IIa > 1000
		IIb < 1000
IIIa	Other regional roads with a traffic > 250 trucks per day + agricultural roads + Ravel	< 250
IIIb	sidewalks + bike paths	-

3.1 Design requirements

Design requirements, especially thickness, are made according to the network and the sort of concrete pavement. There are concrete slabs or continuously reinforced concrete pavements. The thickness is chosen by the administration.

Table 3. Minimum thickness of concrete pavements.

Pavement	Network	Thickness
Continuously reinforced concrete pavement	I	230 mm
	II & III	200 mm
Concrete slabs	I	230 mm
	II	200 mm
	III a	180 mm
	III b	160 mm

3.2 Composition requirements

Concrete composition will be defined by the network and by the layer. This composition will be different if concrete is topped by an asphalt layer or if we have a two-layer concrete.

The asphalt top layer is useful to protect the concrete against chemical attacks. It also reduces traffic noise.

Two-lift concrete is useful to reduce the traffic noise (smaller aggregates) and it allows the use of limestone, which is usually cheaper, in the bottom layer. There are in fact three types of rocks in Wallonia: limestone, sandstone and porphyry. Limestone is forbidden on every top layer (concrete or asphalt) due to skid resistance problems.

The concrete composition is provided by the contractor and approved by the administration.

Concrete has to be placed between 1°C and 25°C. It must also be laid 2 hours after its production at the latest. Finally, concrete must be protected against desiccation with a plastic sheet or by curing.

Table 4. Concrete composition.

	Maximum aggregate size	Amount of cement	W/C ratio	Entrained air
	(mm)	(kg/m ³)	By weight	(% -v)
Network I				
Top layer	> 32	≥ 400	≤ 0,45	-
	$6,3 < D_{\max} \leq 20$	≥ 400	≤ 0,45	$3 \leq v \leq 6$
	≤ 6,3	≥ 425	≤ 0,42	$5 \leq v \leq 8$
Bottom layer (two-lift concrete)	≥ 20	≥ 375	≤ 0,45	
Concrete topped by an asphalt layer	32	≥ 375	≤ 0,45	
Network II & III				
Top layer	> 32	≥ 350	≤ 0,50	-
	$6,3 < D_{\max} \leq 20$	≥ 375	≤ 0,50	$3 \leq v \leq 6$
	≤ 6,3	≥ 400	≤ 0,45	$5 \leq v \leq 8$
Bottom layer (two-lift concrete)	≥ 20	≥ 350	≤ 0,50	
Concrete topped by an asphalt layer	32	≥ 350	≤ 0,50	

3.3 Performance requirements

When the roadworks are finished, the administration checks a few concrete characteristics in order to validate the job done.

These tests refer mostly to the mechanical properties of the concrete and to the pavement surface.

For example, the compressive strength is tested but we also test for water absorption and frost resistance.

Table 5. Compressive strength.

	Network I	Network II & III
One-layer pavements or bottom layer of two-lift pavements Tested on cores (height = 10 cm, section = 100 cm ²) at 90 days		
Compressive strength (N/mm²)	60*	50*
*without air-entraining	50	40
Top layer of two-lift pavements Tested on cubes (15 cm wide) at 28 days		
Compressive strength (N/mm²)	40	30

As for the surface characteristics, skid resistance and evenness are always tested by administration's vehicles.

It's important to notice that, in terms of evenness and skid resistance, the expectations are exactly the same for concrete pavements and for asphalt pavements. There is no rutting in concrete pavements.

4 Practical cases

In order to illustrate the construction of concrete roads, we will focus on three recent motorway cases. The three motorways are made of continuously reinforced concrete pavements because it is the most suitable road structure for heavy traffic.

It is important to point out that most of the Walloon motorways were built in the 70s. Most of them are continuously reinforced concrete pavements and we have been driving on them to this day. Some Falling Weight Deflectometer tests have been run recently and the results are quite good. The bearing capacity of these roads is still great after more or less 50 years of heavy traffic.

4.1 A8/E42 Lamain – Kain (French border)

This motorway was built in 1971. The section concerned is 8km long.

The structure was made of:

- 5cm of asphalt (recent)
- 23cm of concrete slabs
- 7cm of asphalt interlayer
- 20cm of lean concrete
- 30cm of subbase (aggregates)

In 2015, the whole structure was replaced by a continuously reinforced concrete structure:

- 25cm of concrete
- 5cm of asphalt interlayer
- 20cm of lean concrete
- 30cm of subbase (aggregates)

Two specific features were added in this project. First, there were 20.5% of aggregates which were small aggregates (4/6.3) in the concrete composition. This results in a top layer which is as silent as a classic asphalt layer (measured by the CPX method before and after roadworks).

Then, an active crack control was set up. We make saw cuts in the concrete pavement in order to obtain more straight and regular cracks. It also reduces the risk of regrouped cracks. The saw cuts were made every 1,20m and are 40cm long and 4cm deep.

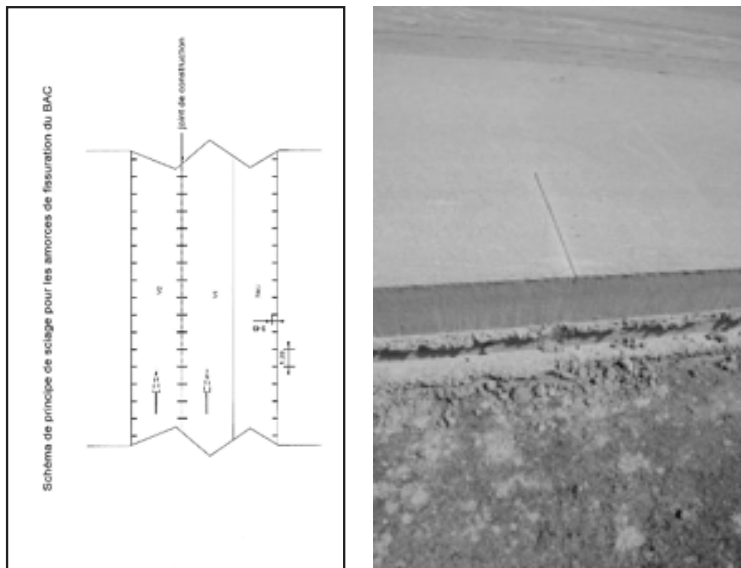


Figure 2. Active crack control on A8/E42.

4.1 A7/E42 St Denis - Jemappes

This is a 11,5km long section north of Mons. It was made of asphalt and the decision was made to replace the whole structure by a continuously reinforced concrete pavement (175.000m²). The roadworks took place this year for a total cost of 50.000.000 €.

The new structure is:

- 25cm of concrete
- 5cm of asphalt interlayer
- 20cm of lean concrete

As for the A8/E42, there is a huge part of small aggregates (24,3% of the aggregates are 4/6.3).

The concrete plant was located by the construction site and ran 24h/24 to reduce the duration of the works. The equipment was also chosen to spare time. It was a SP 1500 which is up to 15,5m width and weight 70tons.



Figure 2. The SP 1500 on the A7/E42 construction site.

4.1 N5/E420 Bypass of Couvin

This roadwork is one of the biggest from the past few decades in Wallonia: the building of a brand-new road of 14km to bypass the city centre of Couvin and reach a new French motorway. The old N5 in the city centre was used by 17000 vehicles/day with 20% heavy trucks. About 130.000.000€ were spent to carry out the project which consisted, among others, in 5.000.000m³ earthwork and 300.000m² of two lift continuously reinforced concrete pavement.

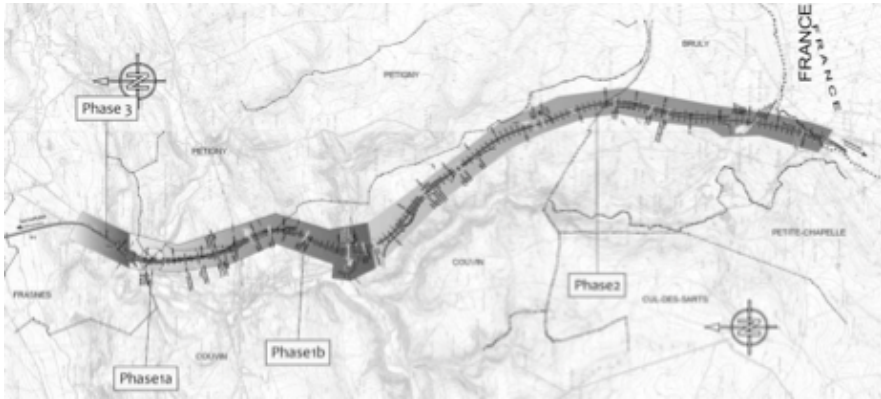


Figure 3. Bypass of Couvin.

- The road structure is:
- 60 mm top layer in exposed aggregate concrete
0/6,3 mm, placed wet-in-wet
 - 170 mm bottom layer concrete 0/32
 - 60 mm sandwich layer in asphalt
 - 200 mm lean concrete
 - 300 mm aggregate road base

Table 6. Characteristics of the two-lift concrete in Couvin.

Concrete characteristics	Bottom layer	Top layer
Cement	375 kg/m ³ CEM III/A 42,5 LA	425 kg/m ³ CEM III/A 42,5 LA
Air	3% - 6%	5% - 8%
Water/Cement	max 0,45	max 0,42
Dmax	32mm Limestone	6mm Porphyry
Ri,min 7 days	26,9 MPa	27,2 MPa
Ri,min 28 days	39,6 MPa	40 MPa

The concrete was made by mobile plants nearby the construction site and these plants were not allowed to produce any other concrete than the one used for the bypass of Couvin. Like the two other examples, an active crack control was foreseen for the bypass of Couvin with the same requirements.



Figure 4. Bypass of Couvin worksite.

5 Conclusion

Concrete roads do have a few drawbacks such as longer working time and the delay to open the road to the traffic due to the concrete's long hardening time.

Despite this, concrete roads are widely used in Wallonia due to their many benefits, such as better sustainability, less maintenance works and no rutting.

References

CCT Qualiroutes, 01/01/2019 version.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü Ağındaki Beton Deneme Yollarının Performans Değerlendirmesi

Muhammet Komut, E. Nazan Ünal, Şenol Altıok

Karayolları Genel Müdürlüğü, AR-GE Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Özet

Gelişmiş ülkeler ikinci dünya savaşı sonrası dönemde ve 1970'lerde karayolu ağlarını hızlı bir şekilde genişleterek ulusal karayolu sistemi inşa etmişlerdir. Bu eğilim şu anda birçok gelişmekte olan ekonomide yaşanmakta, çünkü ekonomik gelişmenin ilk belirtilerinden biri hızlandırılmış bir yol yapımı sürecidir. Ekonomik olarak hızlı bir şekilde gelişmekte olan ülkemiz için hızlandırılmış bir yol yapım süreci son dönemlerde acil eylem planları (AEP) ve stratejik planlar ile hayata geçirilmiş, doğrudan ya da dolaylı olarak birçok sosyo ekonomik katkı çarpan etkisi ile ülkemize kazandırılmış ve ekonomimizin itici gücü olmuştur.

Bu süreç beraberinde birçok yeni teknolojinin, tasarım yönteminin, alternatif mühendislik çözümlerinin vb ülkemize kazandırılmasını sağladığı gibi, ulaştırma altyapısı için Karayolları Genel Müdürlüğü'nün öncü ve kilit konumda olma özelliğini de teyit etmiştir. Karayolları Genel Müdürlüğü bu bağlamda malzeme, proje, yapım ve kontrollük gibi bir çok alanda yeni teknolojileri ve teknik gelişmeleri ülkemize kazandırırken, asfalt kaplamalara alternatif olarak beton yol konusunda da sektör temsilcileri bir araya gelerek farklı güzergahlarda deneme yolları yapmak suretiyle öncü rolünü hayata geçirmiştir.

Anahtar Kelimeler: AASHTO 93, Beton Yol, Performans.

1 Giriş

Ulaştırma sistemlerinin gelişimi sosyoekonomik bir bağlamda gerçekleşmektedir. Ulaştırma altyapısının niceliği ve kalitesi ile ekonomik gelişme düzeyi arasındaki ilişki açıktır. Yüksek yoğunluklu ulaştırma altyapısı ve yüksek geometrik standartla bağlantılı ağlar genellikle yüksek gelişim düzeyleriyle ilişkilidir. Ulaşım sistemleri verimli olduğunda, piyasalara daha iyi erişilebilirlik, istihdam ve ek yatırımlar gibi olumlu çarpan etkileri ile sonuçlanan ekonomik ve sosyal fırsatlar ve faydalar sağlarlar. Bu nedenle ulaştırma altyapısı ihmal edilemeyecek

önemli bir sosyal ve çevresel yük taşıdığı gibi sürdürülebilir kalkınma üzerinde de büyük bir etkiye sahiptir.

Gelişmiş bir karayolu ağı insan vücudundaki arter sistemi kadar önemli olduğu gibi, karayolu taşımacılığı da ulaştırma altyapısının dolayısıyla ekonomilerin ve dinamik toplumların bel kemiği durumundadır. Gelişmiş ülkeler ikinci dünya savaşından sonrası dönemde ve 1970'lerde karayolu ağlarını hızlı bir şekilde genişleterek ulusal karayolu sistemi inşa etmişlerdir. Bu eğilim şu anda birçok gelişmekte olan ekonomide yaşanmakta, çünkü ekonomik gelişmenin ilk belirtilerinden biri hızlandırılmış bir yol yapımı sürecidir.

Karayolları Genel Müdürlüğünün kurulmasıyla birlikte, öncelikli olarak yaz-kış geçit verebilen yollar yapmak hedeflenmiş ancak 1970 yıllardan sonra asfalt betonu kaplamalı yollar yapmak mümkün olmuştur. Ekonomik olarak hızlı bir şekilde gelişmekte olan ülkemiz için hızlandırılmış bir yol yapım süreci son dönemlerde acil eylem planları (AEP) ile hayata geçirilmiş, doğrudan ya da dolaylı olarak birçok sosyo ekonomik katkı çarpan etkisi ile ülkemize kazandırılmış ve ekonomimizin itici gücü olmuştur.

Hızlandırılmış bu yol yapım sürecinde, tüm Dünya'da olduğu gibi ülkemizde de gerek yapım sırasında gerekse bakım/onarım işlemleri sırasında yolların trafiğe açık kalmasını sağlayacak şekilde çalışmaların yapılması hedeflenmiştir. Ayrıca trafiğe açık yollarımızda servis yolu gerektirmeyecek veya asgari seviyede servis yolu ihtiyacı oluşturacak yöntem ve teknolojiler önemli hale gelmiştir. Ulaştırma altyapısındaki bu hızlı gelişmeye paralel şekilde şehirleşme ve diğer tüm altyapı sektörlerindeki gelişmelerde dikkate alındığında, karayolu ağı ile ilişkili altyapı tesislerinin yapımı, modernizasyonu, kapasite artırımı, bakım/onarımı gibi çalışmalarda ekonomik kayıpların en aza indirgeneceği ve kolaylık sağlayacak esnek üstyapı uygulamaları hayata geçirilmiştir. Tüm bu nedenlerle birlikte yapım ve bakım kolaylığı, ilk yapım maliyetinin düşük olması, kademeli inşaat prensibine ve bütçe olanaklarına uygun olması gibi birçok nedenden dolayı asfalt kaplamalı yollar (esnek üstyapılar) tercih edilmiştir. Bu süreç beraberinde birçok yeni teknolojinin, tasarım yönteminin, alternatif mühendislik çözümlerinin vb ülkemize kazandırılmasını sağladığı gibi, ulaştırma altyapısı için Karayolları Genel Müdürlüğünün öncü ve kilit konumda olma özelliğini de teyit etmiştir. Karayolu ağımızın genişlemesi ve mevcut ağdaki yolların yüksek standartlı hale getirilmesi için gerçekleştirilen tüm bu çalışmalar, aynı zamanda sektör temsilcileri ve tüm paydaşlarının da gelişmesine ve büyümesine son derece büyük katkı sağlamıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü bu bağlamda malzeme, proje, yapım ve kontrollük gibi bir çok alanda yeni teknolojileri ve teknik gelişmeleri ülkemize kazandırırken, asfalt kaplamalara alternatif olarak beton yol konusunda da sektör temsilcileri bir araya gelerek farklı güzergahlarda deneme yolları yapmak suretiyle öncü rolünü hayata geçirmiştir.

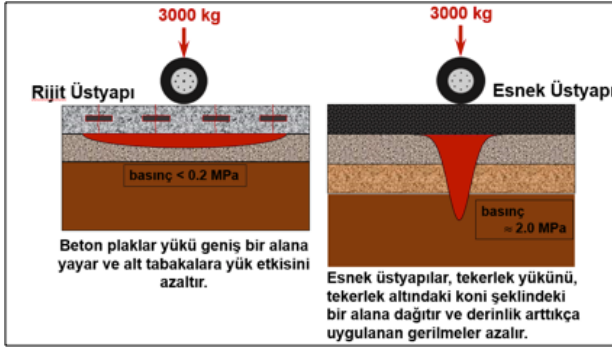
2 Esnek ve Rijit (Beton Yol) Üstyapılara Genel Bakış

Karayolu üstyapıları, kullanılan malzemelerin niteliklerine göre esnek veya rijit olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Rijit ve Esnek Üstyapılar arasında; proje tasarımı, uygulama tekniği, yapım koşulları, bakım/onarım koşulları, çevresel ve iklimsel koşullar, konfor gibi birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının bulunduğu birçok hususun olduğu bilinmektedir. Beton yollar; çimento betonu ile yapılan ve üzerinden geçen dingil yüklerini tabana ileten bir

kaplama türü olup, genel olarak üstyapı tabanı üzerine yerleştirilen granüler Alttemel/Temel tabakası ve/veya zayıf beton temel tabakası ve/veya bitümlü tabaka üzerine serilmiş beton plaktan oluşmaktadır.

Esnek ve Rijit üstyapıların trafik yüklerinin kaplama vasıtasıyla zemine iletme ve yayma kabiliyetlerinin birbirinden farklı oluşu aralarındaki en büyük farkı oluşturmaktadır. Esnek üstyapılar çok tabakalı olup istenilen gerilme ve deformasyonları karşılayacak kalınlıkta yapılırlar. Rijit üstyapılar, beton plakların yüksek rijitliklerinden ötürü teker yüklerinin beton plak alanının tümünde hemen hemen eşit olarak zemine iletmektedirler.

Rijit üstyapıların yapısal kapasitesi beton plağın rijitliğinden kaynaklanırken, esnek üstyapılarda ise her bir tabakanın yük yayma kabiliyetine ve kalınlığına bağlıdır. Zemin mukavemetinin rijit kaplama kalınlığı üzerindeki etkisi esnek üstyapılarınkinden daha azdır. Yapısal olarak, beton plağın elastisite modülü taban zemininkinden çok daha büyük olduğundan dolayı beton yol elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışır ve trafik yüklerini bu esasa göre, esnek üstyapıya nazaran daha geniş bir alana yayarak taban zeminine iletir. Bununla birlikte, rijit üstyapılarda beton plak doğal taban zeminini üzerine oturtulamamaktadır. Bunun yerine genel olarak granüler alttemel veya kırmataş alttemel veya kırmataş temelden oluşan bir kaplama alt tabakası oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Rijit ve Esnek Üstyapılarda Yük Dağılımı

3 Beton Yolların Sınıflandırılması

Beton yollar genel olarak 3 farklı şekilde inşa edilebilmektedir;

3.1 Derzli Donatsız Beton Yollar (JPCP)

3-6 m uzunluğunda kısa anolardan oluşur, donatı çeliği içermezler ve plaka kalınlığı 125 -350 mm'dir. Boyuna derzlerde bağlantı donatısı, enine derzlerde ise kayma donatısı kullanılır. Anolar genel olarak granüler malzeme ve ya bitümlü tabakalar üzerine inşa edilir. Temel tabakası kalınlıkları 100-200 mm olabilir. Kısa derz aralığı ano ortası çatlamayı asgariye indirmek için kullanılır.

3.2 Derzli Donatılı Beton Yollar (JRCP)

Derzli Donatılı beton kaplamalar 8-30m uzunluğundaki anolardan oluşur. Ortalarında donatı çeliği içerirler ve bu sayede ano uzunluklarının fazla olması nedeni ile kaplamada oluşabilecek çatlakları engellerler. Plaka kalınlığı 150 -350 mm kalınlığındadır. Boyuna derzlerde bağlantı donatısı, enine derzlerde ise kayma donatısı kullanılır. Anolar genel olarak granüler malzeme ve ya bitümlü tabakalar üzerine inşa edilir, temel tabakası kalınlıkları 100-200 mm olabilir.

3.3 Sürekli Donatılı Beton Yollar (CRCP)

Enine derzler olmayan beton bir bloktan oluşur. Çelik donatı beton blok boyunca vardır ve derzler sadece imalat bitimlerinde konulur. Beton kalınlıkları genelde 150-250 mm'dir. Genelde kesit alanının %0,5-0,8'i kadar donatı içerirler. Derz olmadığı için 0.6-2.4 m'lik aralıklarla enine çatlaklar oluşur, ancak bu çatlaklar donatı çeliği sayesinde kapalı kalırlar. Bununla birlikte yoğun donatı kullanılmasından dolayı maliyetli olması, uygulamanın daha zor ve özel ekipmanlar gerektirmesi gibi nedenlerden dolayı en pahalı beton yol uygulamasıdır.

4 KGM Yol Ağında Beton Yol Deneme Kesimleri

Ülkemizde değişik trafik kategorileri, topoğrafik yapı, çevre ve iklim farklılıklarına maruz muhtelif yollarda beton kaplamalı deneme yolu kesimleri inşa edilerek, beton yolun davranışlarının gözlenmesi ve buna bağlı olarak ülkemiz koşullarına özgün uygulamalar için görüşlerin netleştirilmesi hedeflenmiştir.

Ülkemizde KGM yol ağındaki yollarda uygulanan deneme yollarının tamamında Derzli Donatısız Beton Yollar (JPCP) tercih edilmiştir. Beton kaplamalı bu yolların projelendirilmesi AAHTO 1993 amprik projelendirme metodu kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan deneme kesimlerinin performansları gerek yerinde gözlemsel olarak gerek fonksiyonel durum ölçüm cihazları marifetiyle belli periyotlarda gerçekleştirilmiş ve performans izlemesi halen devam etmektedir.

Ülkemizde yapılan beton deneme yolları ile ilgili özet bilgi Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Deneme Beton Yollar Özet Bilgi Tablosu

Beton Yol Verileri	Afyon-İşcehisar	Hasdal Kavşağı-Kemerburgaz	Ordu-Ulubey Devlet Yolu	Karamürsel Şehir Geçişi
Yolun Tipi	DDBK	DDBK	DDBK	DDBK
Bölgesi	3. Bölge	1. Bölge	7. Bölge	1. Bölge
Kilometresi	5+700-7+700	40+000-43+500	5+000-6+000	38+400 – 40+000
Yapıldığı Tarih	2004	2006	2007	2010
Proje Süresi	30 yıl	30 yıl	30 yıl	30 yıl
Protokol Tarafları	KGM - TÇMB	KGM - TÇMB	KGM - BOREN	KGM
Beton Yol Uzunluğu	2 km	3,5 km	1 km	1,6 km
Platform Genişliği	12 m	10,5 m	2x10,5 m	2 x 8.5 m
Şerit Sayısı	3	2	2 x 2	2 x 2
Derzler Aralığı	5 m	5 m	4,5 m	4,5 m
Plak Kalınlığı	27 cm	32 cm, 27 cm	28 cm	30 cm
Beton Plağın Oturduğu Zemin	Sathi Kaplama	PMT üzeri astar, 5 cm BSK	Sathi Kaplama	6 cm Binder
Çimento Tipi	CEM I 42,5 + (Silis Dumani)	CEM I 42,5	Bor Katkılı	CEM I 42,5 R
Çimento Miktarı	375 kg/m ³	400 kg/m ³	350 kg/m ³	378 kg/m ³
Su / Çimento	0,41-0,45	≤ 0,35	~ 0,30	~ 0,43
Agreganın Özellikleri	Kırma çakıl, kırma kum, D _{max} 32 mm	Doğal kum ve kırma taş D _{max} 32 mm	Melet ırmağı kırma taş D _{max} 25 mm	Kırma çakıl, kırma kum, D _{max} 25 mm

4.1 Afyon-İşcehisar Beton Yolu

Karayolları Genel Müdürlüğü ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) arasında imzalanan bir protokol çerçevesinde yapılan bu yol Karayolları Genel Müdürlüğü'nün ilk deneme amaçlı beton yolu özelliğini taşımaktadır. Afyon –İşcehisar Km:5+700-7+700

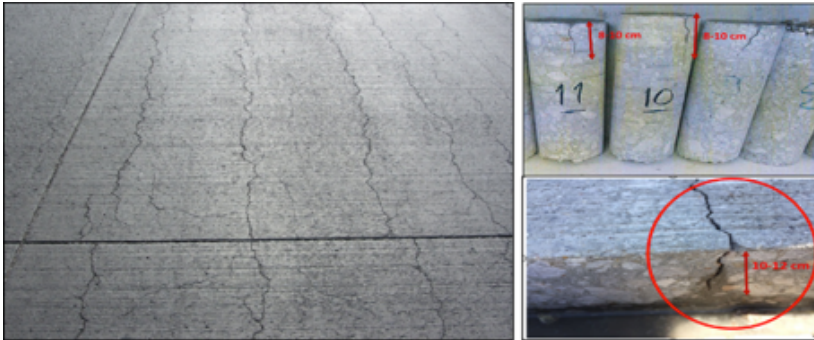
arasında 2 km'lik bölünmüş yolun tek yönlü 3 şeritli taşıt yolunda TÇMB tarafından yapılan denem beton yolu 2004 yılında trafiğe açılmıştır.

Derzli donatısız beton yol tipinde 27 cm kalınlığında inşa edilen beton kaplama, Km:5+700-7+200 arasında 30 cm alttemel, 10-15 cm temel ve mevcut sathi kaplama üzerine, Km:7+200-7+700 arasında ise 25 cm alttemel, 15 cm PMT ve astar tabakası üzerine inşa edilmiştir.



Şekil 2. Afyon-İşcehisar Beton Yolu Yer Bulduru Haritası

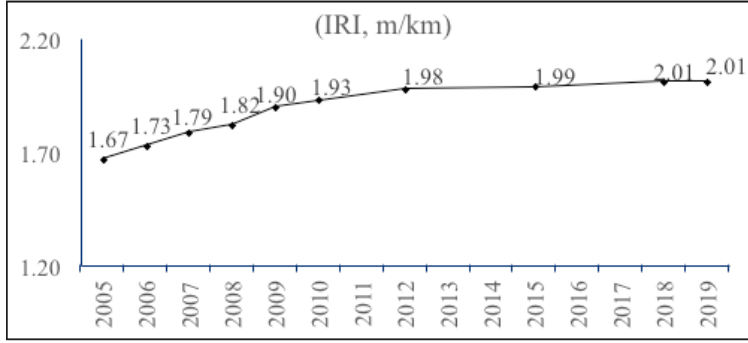
Deneme yolunda beton kaplamanın performansı ile ilgili yapısal ve fonksiyonel durum değerlendirmesi için gerekli incelemeler gözlemsel ve aletsel ölçümler ile periyodlar halinde gerçekleştirilmiştir. Afyon-İşcehisar deneme beton yolunda, beton kaplamanın yapımından birkaç ay gibi kısa bir süre sonra beton plak yüzeyinde çoğunlukla rastgele yönde gelişen ve birleşerek harita tipine dönüşen çatlak sistemlerinin ortaya çıkmaya başladığı görülmüştür. Başlangıçta kılcal seviyede olan bu çatlaklar zaman içerisinde daha yaygınlaşıp derinleşerek beton kaplama yüzeyine tamamen yayılmıştır. İlk dönemlerde 4-5 cm derinliğindeki çatlakların günümüzde 10-12 cm derinliğe ulaştığı alınan karotlardan ve yerinde yapılan kaplama kesit kontrollerinden anlaşılmaktadır. Buna karşılık alınan karot numunelerine uygulanan deney sonuçlarında beton basınç mukavemeti değerlerinin şartname kriterlerini sağladığı görülmüştür.



Resim 1. Karot Numuneleri Ve Yerinde Kesit İncelemesi

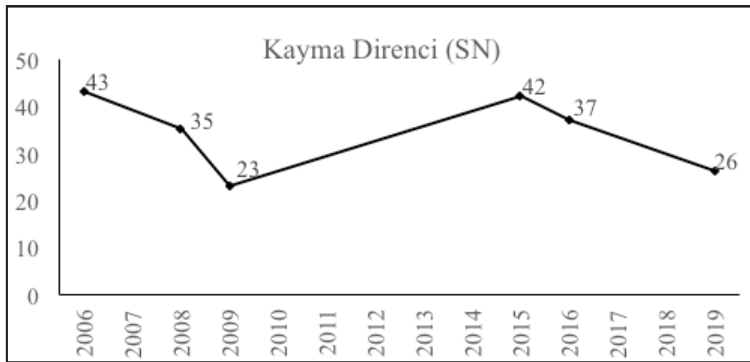
Yapısal incelemelerin yanında yüzey düzgünsüzlüğü (IRI) ve kayma direnci gibi fonksiyonel durum ölçümleri farklı tarihlerde gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel durum ölçümlerinde kaplama yüzey düzgünsüzlük (IRI) değerlerinin gerek ilk ölçüm yılında gerekse son ölçüm

yılına kadar geçen süre içerisinde artmasına rağmen genel olarak iyi durumda olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3. Afyon-İşçehisar Beton Yolu Yüzey Düzgünlük (IRI) Performansı

Kayma direnci ölçümlerinde başlangıçta iyi durumda olan performans değerlerinin 3 yıl gibi kısa bir sürede büyük düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun yapım sırasında telli fırçalarla elde edilen enine pürüzlülükten kaynaklandığı, trafiğin aşındırıcı etkisi ile zamanla pürüzlülüğün kaybolmasına bağlı olarak kayma direncinin azaldığı gözlenmiştir. Daha sonraki dönemde elde edilen verilerin tekrar yükselmesinin nedeni olarak, kaplamadaki kılcal çatlakların artarak yüzeyde yaygınlaşması ve genişlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4. Afyon-İşçehisar Beton Yolu Kayma Direnci Performansı

4.2 Hasdal Kavşağı- Kemberburgaz Beton Yolu

Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz Devlet yolu Km:40+000-43+500 arasındaki tek taşıt yolunda yapılan beton yol, Karayolları Genel Müdürlüğü ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

(TÇMB) arasında imzalanan bir protokol çerçevesinde TÇMB tarafından bedelsiz olarak deneme amaçlı yapılmıştır.

Km:40+000-42+620 arasında 15 cm kırmataş alttemel, 15 cm plent miks temel ve 5 cm aşınma tabakası üzerine 27 cm beton kaplama, Km:42+620-43-500 arasındaki kesimde ise 15 cm kırmataş alttemel, 15 cm plent miks temel üzerine 32 cm beton kaplama olmak üzere iki farklı kesitli derzli donatısız beton yol yapılmıştır.



Şekil 5. Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz Beton Yolu Yer Buldu Haritası

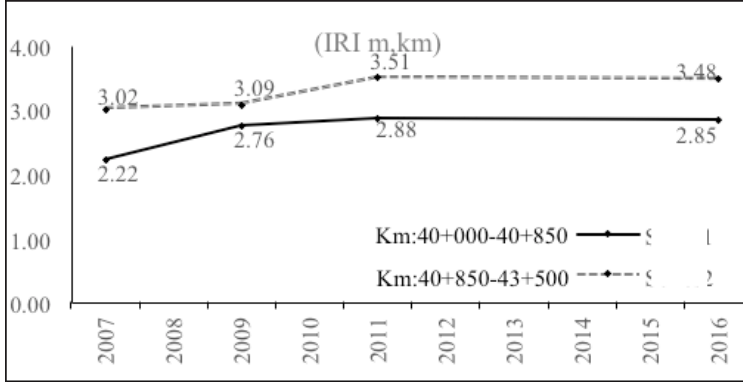
Deneme yolunda beton kaplamanın performansı ile ilgili yapısal ve fonksiyonel durum değerlendirmesi için gerekli incelemeler gözlemsel ve aletsel ölçümler ile periyodlar halinde gerçekleştirilmiştir. Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz deneme beton yolunda kısa sürede bozulmalar gelişmiştir. Bu yolun yapım aşamasında beton santrali ile beton serim finişeri kapasite uyumsuzluğu ve finişerin sürekli beslenememesine bağlı beklemeler ondülasyon sorunlarını ortaya çıkarmıştır. Gözlemsel olarak farkedilemeyen bu sorunlar sürüş konforunu ve yüzey düzgünlüğünü olumsuz etkileyen unsurlar olarak karşımıza çıkmıştır. Ayrıca derz kesimlerinde uygun olmayan yöntemlerin kullanılması ve ekipmanların doğru kullanılmaması derz kenarlarında yıpranmalara, kırılmalara ve derz boyunca sapmalara neden olmuştur. Ayrıca beton kaplama plağında derz kenarlarında çatlaklar gelişmiş, muhtelif birkaç noktada da yüksek şiddetli plak kırılmaları yaşanmıştır.

2006 yılında hizmete açılmasından sonra birkaç yıl içinde ağır taşıt şeritindeki bazı plaklarda boyuna çatlaklar yer yer köşe çatlakları meydana gelmiştir. Taşıma gücü yetersizliğine bağlı olarak, taban zemininde meydana gelen oturma ve malzeme kaybına bağlı olarak bu tür bozulmalar oluşabilmektedir.



Resim 2. Yüksek Şiddetli Plak Kırılmaları, Derz Kırılmaları, Köşe Çatlakları

Yüzey düzgünsüzlük (IRI) ve kayma direnci ölçümleri gibi fonksiyonel durum ölçümlerinde farklı tarihlerde gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel durum ölçümlerinde kaplama yüzey düzgünsüzlük (IRI) değerlerinin hedeflenen azami kriterlerin oldukça üzerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca kayma direnci (SN) değerlerinin ise hedeflenen asgari kriterlerin oldukça altında olduğu belirlenmiştir.

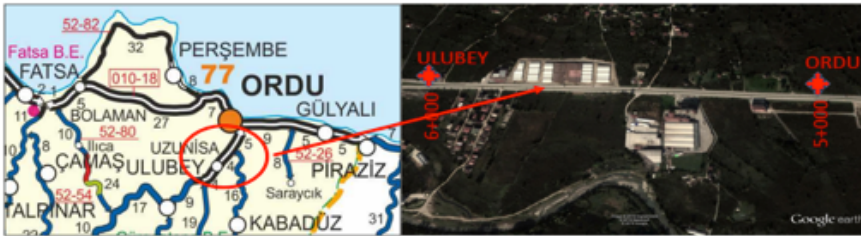


Şekil 6. Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz Beton Yolu
Yüzey Düzgünsüzlük (IRI) Performansı

4.3 Ordu –Ulubey Devlet Yolu

Ordu-Ulubey devlet yolu Km:5+000-6+000 arasında Karayolları Genel Müdürlüğü ile Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) arasında imzalanan protokolle beton yol deneme kesimi yapılmıştır. Beton kaplama mevcut sathi kaplamanın üzerine 28 cm kalınlığında olacak şekilde inşa edilmiştir.

Farklı çimentoların performansının gözlenebilmesi amacıyla deneme beton yolunun 700 m'lik kısmı bor katkılı çimento ile, 300 m'lik kısmı ise normal katkısız çimento ile yapılmıştır.



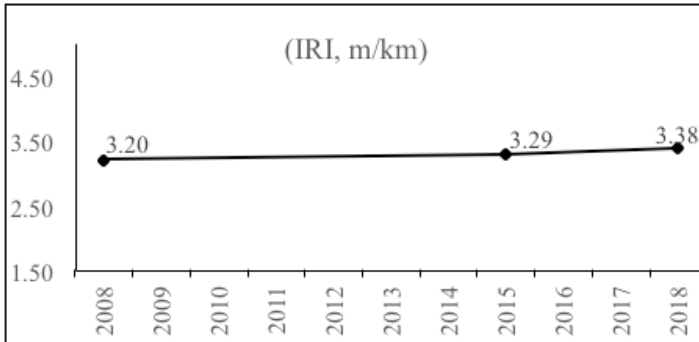
Şekil 7. Ordu-Ulubey Beton Yolu Yer Bulduru Haritası

2007 yılında hizmete açılmasından sonra birkaç yıl içinde ağır taşıt şeritindeki bazı plaklarda boyuna ve enine çatlamlar yer yer köşe çatlamları meydana gelmiştir. Taşıma gücü yetersizliğine bağlı olarak, taban zemininde meydana gelen oturma ve malzeme kaybına bağlı olarak bu tür bozulmalar oluşabilmektedir. Enine çatlakların bir çoğu mevcut enine derzlere yakın noktalarda meydana gelmiştir.



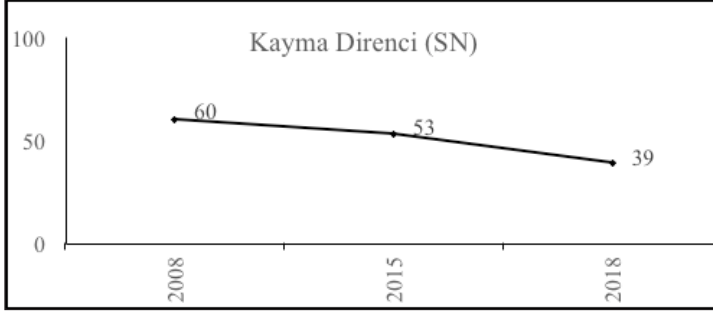
Resim 3. Taşıma Gücü Yetersizliğine Bağlı Bozulmalar, Enine ve Köşe Çatlamları

2018 yılında yapılan kontrollerde alınan karot numunelerine uygulanan deney sonuçlarında beton basınç değerlerinin şartname kriterlerini sağladığı görülmüştür. Yüzey düzgünlük (IRI) ve kayma direnci ölçümleri gibi fonksiyonel durum ölçümleride farklı tarihlerde gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel durum ölçümlerinde kaplama yüzey düzgünlük (IRI) değerlerinin hedeflenen azami kriterlerin oldukça üzerinde olduğu ve zamanla artış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 8. Ordu-Ulubey Beton Yolu Yüzey Düzgünlük (IRI) Performansı

Kayma direnci (SN) değerlerinin ise başlangıçta hedeflenen asgari kriterlerin üzerinde olduğu, ilk yapım yılından bu yana geçen sürede kayma direncini büyük ölçüde koruduğu ve iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 9. Ordu-Ulubey Beton Yolu Kayma Direnci Performansı

4.4 Karamürsel Şehir Geçişi Beton Yolu

İzmit – Yalova D-130 Devlet Yolunun Karamürsel Şehir Geçişinde Km: 38+400 – 40+000 arasında 2010 yılında beton yol çalışması gerçekleştirilmiştir. Karamürsel şehir geçişi beton yolu Karayolları Genel Müdürlüğü'nün, üstyapı projelendirmesini, beton dizaynını, imalatını yaptığı ilk beton yol uygulamasıdır. 29.10.2009 tarihinde başlayan beton yol imalatı, 15.01.2010 tarihinde sonuçlanmıştır.

Çalışma yapılan 1600 m'lik kesim, trafiğin yüksek ve sinyalizasyonlu kavşaklar nedeniyle trafik hızının düştüğü ve tekerlek izinde bozulma şeklinde bozulmaların yaygın olduğu bir kesimi kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu kesimde, mevcut bitümlü sıcak kaplamalı (BSK) yolda, asfalt tabakaları ve terasman kotu altındaki taşıma gücü düşük zemin kaldırılmış, terasman seviyesine kadar taş dolgu yapılarak, altyapı oluşturulmuştur. Daha sonra 20 cm plentmiks temel (PMT) tabakası ve 6 cm binder tabakası serilerek, üzerine 30 cm beton kaplama getirilmiştir.



Şekil 10. Karamürsel Şehir Geçişi Beton Yolu Yer Bulduru Haritası

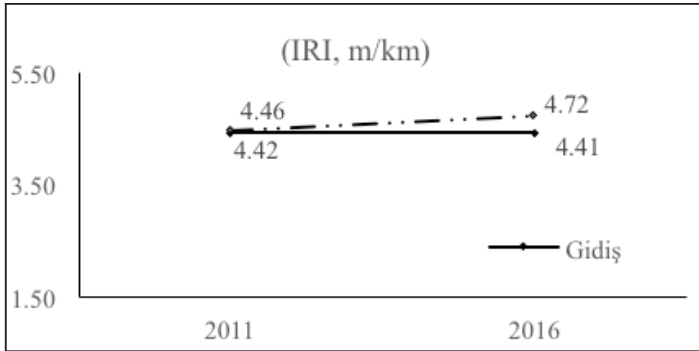
Ocak 2010 'da tamamlanarak trafiğe açılan Karamürsel Şehir Geçişi beton yol kesiminde bugüne kadar gelişen bozulmalar derz kenarlarında oluşan sökümler ile yer yer görülen enine çatlaklardır. Özellikle her iki yönde enine ve boyuna derzlerde meydana gelen sökümler oldukça yaygındır.

Erken gelişen derz sökümleri ve enine çatlaklar çoğunlukla betonun genişleme ve büzülme hareketi sınırlandırıldığına ortaya çıkmaktadır. Kayma demirlerinin uygun şekilde yağlanmadığı ve yanlış yönde yerleştirildiği durumlarda betonun büzülme hareketini sınırlayacağından derz kenarlarında sökümler meydana gelmektedir. Sökümlerin diğer bir nedeni de, derz dolgusunun iyi bir şekilde yapılmadığı ve derzin su içerdiği hallerde, suyun donup genişerek oluşturduğu basınç olabilmektedir.



Resim 4. Derz Sökümleri ve Yer Yer Enine Çatlaklar

Yüzey düzgünlük (IRI) ve kayma direnci ölçümleri gibi fonksiyonel durum ölçümlerinde farklı tarihlerde gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel durum ölçümlerinde kaplama yüzey düzgünlük (IRI) değerlerinin hedeflenen azami kriterlerin oldukça üzerinde olduğu ve zamanla artarak devam ettiği görülmüştür.

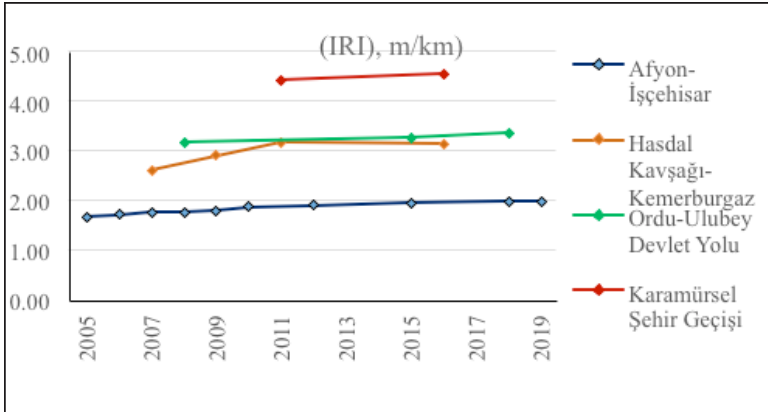


Şekil 11. Karamürsel Şehir Geçişi Beton Yolu Yüzey Düzgünlük (IRI) Performansı

5 Deneme Beton Yolları Yüzey Düzgünsüzlüğü (IRI) Performans Değerlendirmeleri

Bildirinin bu bölümünde Dünya’da çok yaygın şekilde kullanılan fonksiyonel durum ölçümlerinden olan yüzey düzgünsüzlüğü (IRI) ölçümleri değerlendirilmiştir. Deneme beton yolları yapım işleri tamamlanıp trafiğe açıldıkları zamandan itibaren gerek gözlemsel gerekse performans ölçüm cihazları ile sürekli takip edilmiş ve performans değerleri kayıt altına alınmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğünün envanterinde bulunan ve tahribatsız performans ölçüm cihazı profilometre ile gerçekleştirilen ölçümler neticesinde, erken dönem yaygın çatlaklara rağmen ilk yapıldığı yıldan bu yana en iyi yüzey düzgünsüzlük performansını Afyon-İşcehisar deneme beton yolu göstermiştir. Buna karşın en kötü performans ise Karamürsel Şehir Geçişi deneme beton yolunda tespit edilmiştir.



Şekil 12. Deneme Beton Yolları Yüzey Düzgünsüzlüğü Karşılaştırması

6 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından sorumluluk alanındaki değişik trafik kategorileri, topoğrafik yapı, çevre ve iklim farklılıklarına maruz Afyon-İşcehisar Yolu, Hasdal Kavşağı-Kemberburgaz Yolu, Ordu-Ulubey Yolu ve Karamürsel Şehir Geçişi yolu olmak üzere 4 farklı güzergahta deneme beton yolu yapılmıştır.

Deneme beton yollarında ilk yapıldıkları zaman diliminden itibaren gerek gözlemsel gerekse fonksiyonel durum ölçüm cihazları ile performans ölçümleri belli periyodlarla gerçekleştirilmiştir. Bildiri kapsamında yüzey düzgünsüzlüğü (IRI) ve kayma direnci (SN) ölçümleri değerlendirilmiştir.

Yapılan incelemeler neticesinde deneme beton yollarında beton basınç dayanımlarında herhangi bir sorunla karşılaşılmamasına rağmen, enine çatlaklar, derz kırılmaları, köşe çatlakları,

plak kırılmaları, yer yer taşıma gücü yetersizliklerine bağlı bozulmalar, derz doğrultularında sapmalar gibi birbirine benzer ya da farklı türde bozulmaların yapım tarihlerini takip eden kısa sürelerde ortaya çıktığı görülmüştür.

Genel olarak bakıldığında erken dönem bozulmaların ve yaygın çatlakların gözleendiği ilk deneme yolu olan Afyon-İşcehisar yolunda yüzey düzgünlük performansının daha iyi olduğu, buna karşın diğer yollarda Yüzey düzgünlük (IRI) performans değerlerinin sürüş konforunu olumsuz etkileyecek şekilde yüksek olduğu görülmüştür.

Kayma direnci değerlerinin başlangıçta yüksek olduğu deneme beton yollarda trafik altında kısa zamanda ciddi kayma direnci kayıplarının olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte kayma direnci performansı Ordu-Ulubey Deneme beton yolunda daha yüksek olduğu güncel ölçümlerde de görülmektedir.

Beton yollardan beklenen ve öngörülen asgari performans seviyelerinin ve proje ömürlerinin yakalanabilmesi için, beton kaplamanın performansını ve davranışını etkileyen üstyapı tabanı, temel veya alttemel malzemesi, betonda kullanılan malzeme özellikleri ve donatı özelliklerinin incelenmesi yanında, derz dizaynı ve derzlerin yapımı, bağlantı ve kayma demirlerinin yerleştirilmesi, betonun kür edilmesi başta olmak üzere her aşamada uygun ekip/ ekipman, yeterli kapasite, büyük hassasiyet ve tecrübeli işçilik gibi detayların çok önemli olduğu görülmektedir.

Tüm bu değerlendirmelerle birlikte, deneme yollarından elde edilen tecrübelerle, beton yollardan beklenen ve öngörülen proje ömürlerinin yakalanabilmesi için trafik kategorileri, iklimsel ve çevresel faktörler, topoğrafik yapı, zemin koşulları gibi birçok proje parametresi dikkate alınmak suretiyle proje bazlı uygulamaların değerlendirilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

7 Kaynaklar

AASHTO Guide For Design of Pavement Structures, (1993).

National Concrete Pavement Technology Center, 2007, Guide To Concrete Overlay Solutions, Iowa State University

Jung, Y.S, Freeman, T.J., Zollinger, D.G., 2008, Guidelines for Routine Maintenance of Concrete, Pavement, FHWA/TX-08/0-5821-1, Texas Transportation Institute, Texas

Kaşak, S., Komut, M., (2019). Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı.

Pavement Design Manual, 1997, Alberta Transportion And Utilities, Edition I

Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, (2016).

Concrete Pavements in Tunnels: Benefits, Design and Construction Guidelines Based on Some Belgian Case-Studies

Prof. Anne Beeldens, PhD, Eng.

Consulting engineer, AB-Roads, Belgium, a.beeldens@ab-roads.com

Abstract

Sustainability is one of the key parameters for the design of pavements. Not only the longevity, but also safety, environmental impact, comfort and land use become more and more important for the implementation of new roads. To minimise the impact on the environment and to maximise the social acceptance of the road more and more highways, city highways, ring roads and even local roads are constructed as tunnels. This does only minimise the environmental impact, by lowering the noise and guiding the air, but gives also the possibility to redesign the landscape at the surface.

To ensure the safety and reliable availability to traffic, a good design and an appropriate choice of materials for the tunnel pavement is needed. Concrete pavements and especially continuous reinforced concrete pavements are highly suitable for this application. The low maintenance, the high reliability, the good durability as well as the incombustibility and the non-toxicity contribute to the safety in the tunnels and the overall sustainability of the road network.

This paper focusses first on the overall qualities and design aspects of concrete pavements in tunnels. Consequently two projects are presented: the newly built highway A11/E34 between Knokke and Zeebrugge at the Belgian coast, where CRCP is applied in the tunnels as well in the open trench. The second project is the closure of the ring road of Antwerp by the Oosterweel link, which is an important liaison in the Trans European Transport Network. In this project, tunnels are not only used to cross the river Scheldt and the Albert Canal, but also the existing ring road, with a viaduct, will be reconstructed as a tunnel allowing to give land for leisure back to the city.

Keywords: *Tunnels, CRCP, concept and execution details*

1 Introduction

Boosted by the increasing global awareness of sustainability principles and the importance for limiting and mitigating the effect of the climate change, the road owners are enlarging the design requirements taking into account the impact on the environment, the needs of the surrounding community and the economic parameters over the whole lifetime of the structure.

This paper presents two projects from Belgium, where tunnels (open or closed) were introduced to mitigate the impact of the traffic on the surrounding without jeopardizing the mobility. In both cases, CRCP is or will be used in the tunnels in order to obtain a durable pavement with reduced maintenance, high safety level, good ride qualities and low noise production.

The first project is the highway E34, connecting the existing highway E34 with the E40 and improving in that way the accessibility of the port of Zeebrugge at the coast of Belgium. This increases safety, by separating the heavy sea port traffic from the local traffic without limiting the expansion possibilities of the port. In addition, special attention is given to the environmental impact and to the multimodality of the project, taking into account the demands of the port industry – a good and fluent connection with a high reliability – of the farming industry – as few as possible splitting up and good accessibility to the farming land – of the nature reserves – preserving a good habitat, especially for the birds – of the local Polder villages – reducing the impact as much as possible – and of the tourists – preserving the wide views on the Polder and giving the possibility to cycle through them.



Figure 1. The new segment of the E34 (A11)

Therefore, the project is much more than the new connection between the E34 and the E40. A re-evaluation of the underlying road network was done and a large increase of the bicycle road network was developed. For the tunnels and the open trench, Continuously Reinforced Concrete was chosen as pavement (CRCP).

The second project is the Oosterweel connection, named after an abandoned village in what is now the port area of Antwerp. It is a project that aims to complete the circle of the Antwerp Ring. It will create a new passage on the north-western part of the Ring allowing freight traffic from the left bank of the river Scheldt to travel north to the Netherlands and east to Germany without having to pass around the south of the city. The initial plan was to construct several viaducts, but the demands for a better quality of life in the city enforced the authorities to abandon the viaduct idea and to shift to several tunnels. In the same idea of minimizing the impact of the traffic on the environment, the existing ring road will be lowered in an open trench, which will then finally be covered, not only reducing in that way the level of the traffic noise, but also giving back space to the city which will result in a green ring around Antwerp. Also in this project, CRCP is chosen as the main pavement material, not only for the tunnel sections but for all pavements of the highway in order to resist the heavy traffic for a lifetime of 30 to 40 years.

2 Requirements for tunnel pavements

2.1 General requirements

A tunnel pavement has in principle no special demands compared to the pavement outside the tunnel, except for some different circumstances to be taken into account. A major one is the safety in the tunnel, in particular the possibility for a good evacuation and rescue when a fire starts. Another important aspect is the availability of the road network, which especially in a tunnel with limited access points implies a low maintenance and long service life.

Concrete pavements, doweled JPCP (jointed plain concrete pavements) and especially CRCP (continuously reinforced concrete pavements) are very well suited to be used in tunnels. Concrete is a non-combustible material, which does not emit toxic gases when subjected to fire and which retains a very important part of its structural capacity even at high temperatures (1). Concrete is not flammable, and therefore does not contribute to the fire load which, inside the tunnel, determines the risk of fire and the magnitude and consequences arising from it. In Austria as well as in Spain, regulations are put in place in which concrete is to be used obligatorily in tunnels longer than 1 km in order to ensure the necessary safety.



Figure 2. The Juan Carlos I Tunnel in Spain with a jointed slab concrete pavement (1)

Concrete pavements in tunnels have additional advantages:

- Due to the brightness of the concrete, the lighting can be reduced, without jeopardizing the visibility. This results in fewer lights and less energy consumption;
- Concrete pavements, when constructed with polishing resisting aggregates, have a very high friction coefficient, resulting in a good skid resistance, which is maintained over the life time. As there is normally no water on the pavement, the breaking distance will be shorter in the tunnel as for the higher friction coefficient;
- Concrete pavements require low maintenance, mainly limited to the maintenance of the joints;
- Concrete pavements add weight to the tunnel, which is often wanted to prevent floating of the tunnel.

2.2 Tunnel pavement structure

The design of the concrete pavement does not alter from the classic design. However, the temperature gradient over the thickness of the pavement is much more limited, as there is no direct sun in the tunnel and the structure can profit from the presence of the concrete floor of the tunnel, providing a very stiff base layer. Therefore, the thickness of the concrete can be slightly reduced and the base layer itself can be omitted.

The concrete pavement can be a doweled jointed plain concrete pavement, but in order to minimise the maintenance even more, a continuously reinforced concrete pavement is the standard for highly trafficked roads in Belgium.

Following pavement structures with a continuously reinforced concrete pavement are typical in Belgium:

Table 1. Typical concrete pavement characteristics in Belgium

Outside of tunnel on soil	Inside the tunnel
25 cm CRCP, with 0,75% of reinforcement, one lift or two lift (wet-in-wet) concrete	21 to 25 cm CRCP
50 mm sandwich layer in dense asphalt	50 mm sandwich layer in dense asphalt 50 mm porous asphalt as drainage layer
25 cm of lean concrete	concrete tunnel floor
> 20 cm drainage sand	
Geotextile on the soil	
Longitudinal reinforcement ratio : 0.75%	
9 cm covering for double layered CRCP	8 to 9 cm covering
Single or double layered	Single layered (except in open trench where a single or double layered CRCP is applied)

2.3 Execution of the concrete pavement in the tunnel

The construction of concrete in a tunnel is similar to the construction of a classic pavement. However, the logistics may be more complicated, due to the limited space available in width and in height. More details are given in (1)

If CRCP is used the concrete needs to be placed in two phases to allow the transport of the material. If the clearance allows it, the transport is done in normal dump trucks. Alternative solutions include the following:

- concrete mixer trucks (although the output may be reduced: the discharge time of a truck with a capacity of 8 m³ can exceed 10 minutes when long delivery chutes are needed)
- side dump trucks (fig. 3)
- ejector trucks, with a box and a piston which expels the concrete into the paver (fig. 4).



Figure 3. Side dump truck (1)



Figure 4. Ejector truck

The concrete pavement can be placed in one or in two layers, wet-in-wet. If space is limited, a mobile transfer conveyors can be used to allow concrete to pass over elements placed in front of the paver (e.g. dowels). A similar option can be adopted when constructing the pavement in two layers simultaneously. For the supply to the rear paver of concrete for the upper layer, a conveyor belt assembled on the front paver can be used (fig. 5).



Figure 5. Two layer concrete pavement, wet-in-wet: supply of concrete of the upper layer over the first slipform paver

The use of concrete with air entrainers is advised inside and outside the tunnels. The air entrainer will not only increase the resistance to scaling in the presence of de-icing salts, but it will also decrease the internal pressure which results from the increase of temperature during a fire, due to the formation of small pores and air bubbles, which act as expansion chambers.

The surface finishing is by preference an exposed aggregate surface in order to decrease the rolling noise as much as possible. The concrete composition has to be adopted to this method of surface finishing, by having at least 20% of aggregates between 4 and 6 mm in the case of a one layered concrete, or by limiting the size of the aggregates in the top layer to 6,3 mm or 10 mm maximum.

2.4 Special requirements for CRCP in tunnels

In Belgium, the standard structure for a heavily trafficked motorway is CRCP. The concept has altered slightly over the years, resulting in the structure as shown in Table 1. The longitudinal reinforcement percentage is 0,75%.

In order to optimize the crack pattern, crack initiating saw cuts are applied just after concreting. These saw cuts are placed every 1,20m and have a depth of 40 mm and a length of 400 mm. The crack initiators have to be sawn within 24 hours after concreting (2).



Figure 6. Cutting of the active crack control immediately after washing of the surface each

1,20 m. At the height of the gully (still covered with plastic), an extra saw cut is applied. In order to reduce the rolling noise, more and more double layered CRCP, placed wet-in-wet, are applied, but also with a single layered CRCP, with an exposed aggregate surface and an optimised aggregate size distribution, low noise levels can be obtained. In tunnels it is advised to use single layered CRCP. The gain in noise reduction will be very limited in the tunnel and the logistics for a two lift pavement are much more complicated in the tunnel as often lateral space is not available.

CRCP has the advantage that it is a continuous pavement, only at the beginning and the end, anchoring abutments need to be foreseen in order to prevent the movement of the CRCP. These abutments are placed outside the tunnel. The anchor lugs are placed in the soil. The transition between the structure in the tunnel and the structure on the soil is made with a raft plate in order to prevent differential settlements at the transition zone.

3. The E34, the access to the harbour of Zeebrugge

3.1 General

The E34 is a new constructed highway, which runs partly next to the harbour and partly through the Polder with his wide views and natural habitat for birds. In order to reduce the impact on the surroundings and especially to preserve the wide views on the polder, a large part of the highway was deepened and put in a tunnel or in an open trench.

The project is a public private project. As traffic is not that dense, the choice for the pavement was made for asphalt. However, for the tunnel and the open trench, the choice was a double layered CRCP. This is not only because of the increased safety due to the higher resistance towards fire, but also because of the increased durability, low maintenance and higher light reflectance. The choice for a double layered CRCP was made as not all parts were covered and therefore the noise abatement needed to be as high as possible.

The CRCP was placed continuously over the different tunnel segments and open trenches without interruption in 2 phases: right lane and safety lane and consequently the left lane. The choice for a double layered concrete pavement, placed wet-in-wet, with a top layer with a maximum aggregate size of 6,3 mm, results in a low noise pavement, comparable to an SMA 0/10.



Figure 7. Construction of the two-layered concrete in the open trench and tunnel

The A11 has two lanes in each direction, 3,75 m wide each and an emergency lane with a variable width. At the left side, a safety lane of 2,02 m wide is foreseen, as shown in Figure 8. The pavement is placed on the 1 m thick concrete floor of the tunnel, with a double asphalt interlayer, 50 mm sandwich layer (dense asphalt concrete ABT) on 50 mm porous asphalt. The tunnel floor is founded on piles and serves as base layer for the concrete pavement.

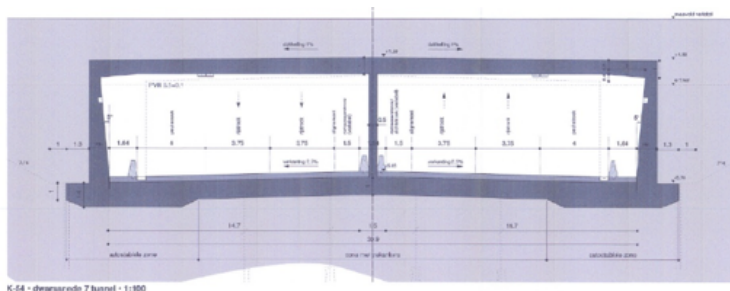


Figure 8. Cross section of the tunnel segment on the E34

3.2 Execution

The execution of the concrete pavement in the trench and the tunnel does not alter significantly from a classic CRCP. As the height of the tunnel exceeded 5 m, no special measures needed to be taken for the transport of the concrete, which was done by open bins. If the height is limited, smaller bins need to be on place to transport the concrete to the slipform paver.

On the tunnel floor, an asphalt interlayer, 50 mm thick, is placed, on which the transverse and longitudinal reinforcement is placed. Beneath that dense asphalt layer, an additional porous asphalt layer was placed.

The construction of the concrete pavement is done in different phases: first the emergency lane and the half of the right lane (as the width of the emergency lane altered significantly over the length of the pavement) and consequently the other half of the right lane and the left lane. No transverse construction joints were placed in the pavement, as concreting went on 24/7. The first pavement, direction of Knokke was placed between March and June of 2016, the second pavement, direction of Antwerp was placed between 20th March and 3rd of April 2017.

The tie bars present at the longitudinal construction joint were automatically inserted in the fresh concrete by the slipform paver during concreting of the bottom layer. No super smoother was used after the first slipform paver in order to obtain a rough surface for better adhesion with the top layer.

The top layer was placed with a second slipform paver, following very closely the first one, Figure 9. The concrete was delivered in mixers. After the second slipform paver, a super smoother was used. As an exposed aggregate surface was asked for, a retarder and consequently a plastic sheet, well secured at the sides, was added on the surface, as can be seen in Figure 10.



Figure 9. Evolution of the construction works: placement of the reinforcement on the asphalt layer – supply of the concrete for the underlayer in a ben– spreading of the concrete with a crane – further spreading and compaction of the concrete for the underlayer with a first slipform paver – supply of the concrete for the top layer in a mixer – spreading of the concrete with crane – further spreading and compaction with slipform paver – spreading of retarder and placing of plastic sheet over the surface



Figure 10. Placing and securing of the plastic sheet with wooden beams

Within 24 hours after concreting, the surface was brushed, as shown in Figure 11. Three passes of the brush were made, first in combination with water, followed by dry brushing. It is important to clean thoroughly the surface of the asphalt layer, as can be seen in Figure 12, next to the freshly placed concrete in order to optimize the adhesion between the concrete and the asphalt. This will increase the life time of the concrete.

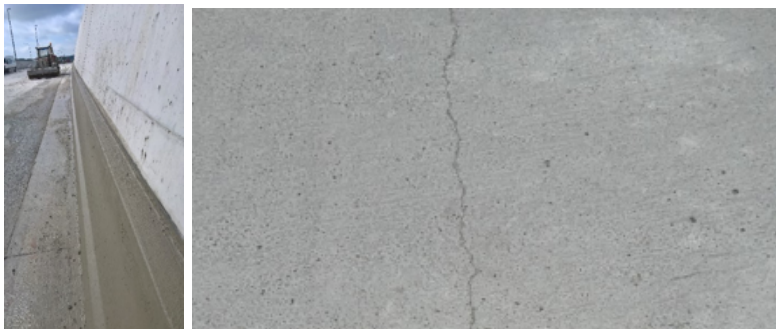


Figure 11. Exposure of the aggregates at the surface of the CRCP



Figure 12. Cleaning of the asphalt layer next to freshly placed concrete after exposure of the aggregates at the surface

The saw cuts for the active crack control are made just after and for the second phase even during the brushing of the surface. This resulted in a very well distributed crack pattern, with 70% up to 85% of the cracks starting from a crack initiator. The average distance between the cracks was between 1,40 m and 2,30 m, with a slightly higher distance between the cracks in the tunnel compared to the open trench, due to the reduced thermal stresses.

4. Oosterweel connection, the direct access to the harbour of Antwerp and the closure of the ring road R1

4.1. General

The Oosterweel link extends over a length of approximately 15 km. By means of several new tunnels under the river Scheldt and the Albert canal, the Oosterweel link will connect the E17 (Ghent) and the E34/N49 (Bruges) on the left bank with the E19/A12 motorways towards the Netherlands and E34/E313 towards Liège, Germany and Luxembourg.



Figure 13. The Oosterweel link, completing the unfinished Ring Road with a new set of tunnels and replacing the current Ring Road Viaduct by tunnels and open trenches to be covered over time

The Oosterweel link has been conceived for heavy truck traffic and will shift important traffic streams of the southern axis, to a more northern, shorter trajectory through the port. Therefore, all pavements are to be made in CRCP, except for the pavements in some particular places, where the structure does not allow a thicker pavement and the weight has to be limited.

To minimize the impact, the Oosterweel link has been designed largely, as an underground infrastructure. This approach will result in a functional road link, giving optimal access to the port and the surrounding industrial and economic clusters, while respecting the demands of an urban region in terms of the environment, quality of life and spatial planning.

This will result in a green corridor around Antwerp, giving space next to the Albert canal back to the city to be used for leisure, bicycle lanes and walking paths.



Figure 14. Rehabilitation of the area above the new tunnels of the Oosterweel link – before (left) and after (right)

4.2. CRCP in the tunnel

The connection between the left bank and the right bank of the Scheldt will be made by a tunnel, with 3 lanes in each direction, an escape route in the middle and a bicycle lane at the other side.



Figure 15. Tunnel under the river Scheldt, with CRCP as road pavement

The CRCP, 25 cm thick is placed on an asphalt sandwich layer, 50 mm thick and a porous asphalt layer beneath to ensure drainage of the water, which could leak through the tunnel elements. The tunnel floor is used as base layer.

The CRCP will be built in one layer, in different phases. First, the right lane and middle lane will be constructed, followed by the left lane. Attention will be put on the position of the longitudinal joint. Especially at the right lane, this joint should not coincide with the wheel path of the heavy traffic.

5 Conclusions

The urge to minimise the environmental impact of road networks drives the designers towards the use of tunnels or trenches, especially in the surroundings of cities, natural reserves,... This implies extra demands for the pavements to ensure the safety in the tunnel and a high reliability and availability of the road.

Concrete pavements and especially CRCP is ideal for the application as pavement in tunnels. The low maintenance, the longevity, the non-combustibility are important parameters in addition to the good ride quality, the reduced noise production and the high light reflectance. Two case studies from the Belgian highway network are presented and demonstrate the feasibility of CRCP in tunnels.

6 References

1. Jofré, Carlos, Romero, Joaquin en Rueda, Rafael. Contribution of concrete pavements to the safety of tunnels in case of fire. sl : EUPAVE, 2010.
2. *Recent developments in the design and construction of CRCP - Towards a more durable concept.* Rens Luc, Beeldens Anne, De Winne Pieter. Prague : International symposium on Concrete Roads, 2015.
3. *Two case studies of two lift CRCP on Belgian highways: the open tunnel on the E34 and the ring road of Couvin (E420).* Beeldens Anne, Vinckier Brecht, Lambert Geert, Balfroid Nathalie. Berlin : International Symposium on Concrete Roads, 2018.

Maintenance of Concrete Pavements According to German Regulations – ZTV BEB-StB 15

Dipl.-Ing. Tim Alte-Teigeler

Otto Alte-Teigeler GmbH, Germany

Abstract

The basic concept for the renovation work on concrete pavements in Germany is based on ‘Additional Technical conditions of contract and directives for the structural maintenance of traffic areas – concrete pavements’ (ZTV BEBStB). The latest version was published in 2015 and has thus been applied for four years. It incorporates the innovations and experiences that have been developed and gained since the launch of the previous version (2002 edition). This presentation focuses on the application of ZTV in real life scenarios and shows how this set of rules facilitates high-quality execution of maintenance and repair activities to ensure lasting durability of traffic areas.

A special innovation is the inclusion of the chapter ‘Preparatory work’. This section describes the removal of slabs, slab sections or entire lanes. It also discusses the necessary measures that need to be taken to prepare for overlaying a concrete pavement. The chapter concludes with an explanation of the removal of concrete pavements across the entire width of the carriageway as part of the renewal project. Otherwise, the structure has been retained as far as possible. As before, there is also a subdivision into maintenance, repair and renewal. The individual chapters describe the construction methods to be assigned and their actual application.

Maintenance involves immediate measures to maintain road safety and smaller-scale work such as joint repairs, edge renovations or surface treatment through grinding or grooving.

Repair activities include larger-scale measures such as joint renovation, lifting and fixing of concrete slabs, replacement of slabs and slab sections or the replacement of entire lanes.

Once the concrete pavement has reached the end of its useful life, all that can be done is to renew the entire concrete pavement, thereby restoring its surface properties and basic structure. This can be done by overlay or replacement in full thickness or through a combination of both, as explained in the chapter ‘Renewal’.

Besides describing the individual renovation methods, ZTV also deals with necessary inspections, claims for defects, including the corresponding periods of limitation, as well as specific billing modalities. In summary, it can be stated that ZTV is an excellent reference work that offers planners, those inviting tenders, construction supervisors as well as contractors a comprehensive overview of the various procedures for maintaining concrete pavements. This simplifies communication between all parties involved and helps to prevent misunderstandings. The latest edition, ZTV BEBStB 15, can therefore be regarded as an excellent tool that can be used successfully in practice.

Keywords: *Concrete pavement maintenance, repair, grinding/grooving, slab lifting*

1 Introduction

Roads are one of the most important components of the infrastructure of any country. Both the transport of goods and the mobility of individual road users require a secure and reliable link between the point of departure and the destination. Traffic routes must be of a high quality and ensure unrestricted use whenever required. All closures and disruptions affect traffic and thus every road user, resulting in enormous economic damage. In 2018, there were around 745,000 traffic jams in Germany alone, with a total length of approximately 1.5 million kilometres. The road users lost about 459,000 hours through standing in traffic. The number of traffic jams increased by 3% compared to the previous year, which is partly due to a 3% increase in road works (Asphalt & Bitumen). These figures show just how important it is to create durable traffic areas in order to avoid or reduce traffic congestion. In this case, concrete pavements have an advantage over bituminous ones due to their long service life and low maintenance requirements. Nevertheless, even with this type of pavement, damage which must be repaired occasionally occurs as a result of incorrect installation, undersizing, normal wear and tear, etc. ‘Additional Technical conditions of contract and directives for the structural maintenance of traffic areas – concrete pavements’ (ZTV BEBStB 15) deal with this topic and serve as an aid for all procedures that are regularly employed within the framework of concrete pavement maintenance. The new 2015 edition incorporates the experiences and developments which have occurred over the 13 years since publication of the previous version. This article deals with the application of the new ZTV BEB-StB in practice and how the set of rules can help to achieve high-quality and sustainable maintenance and repair activities and consequently a highly durable concrete pavement.

2 Content and innovations

ZTV BEBStB 15 is divided into the five main items ‘General’, ‘Execution’, ‘Inspections’, ‘Defect claims’ and ‘Measurement and billing’. Compared to the previous version, the last three items in the structure have thus been removed from the ‘General’ chapter to form separate ones. The sub-item ‘Preparatory measures’ which did not previously exist has been included in the main item ‘Execution’. It describes the procedures that are used during removal in order to replace concrete slabs, slab sections or entire lanes or to renew a carriageway across its entire width. The preparation of concrete slabs for subsequent overlaying is also explained here. Further, this chapter lists the sub-items ‘Maintenance’, ‘Repair’ and ‘Renewal’, which were previously dealt with in separate chapters. These sections list all the measures individually and describes them in more detail according to a uniform structure. Among other things, the sub-chapters also deal with the process-specific aspects of inspections, finished work requirements and billing.

Further fundamental changes to ZTV BEBStB 02 are the inclusion of the additional construction materials silicate resin and polyurethane foam in the repair procedure ‘stabilizing and lifting of concrete slabs’ as well as a more detailed description of the various systems for slab replacement with rapid hardening concretes. Some of the structural measures that were common place in the past but are no longer used today have not been transferred from the 2002 edition to the new version. A few chapters of the new ZTV BEBStB 15 will be examined and illustrated in more detail below.

3 General

Maintenance includes those measures which help to ensure the continued existence of functional properties and the basic structure. This level of maintenance includes ‘operational maintenance’, which consists of checks and minor operational maintenance measures, and ‘structural maintenance’. ZTV BEBStB deals only with ‘structural maintenance’ concerning concrete pavements. This includes maintenance, repair and renewal activities (Table 1).

The term ‘maintenance’ refers to smaller-scale structural measures to maintain the basic structure which are usually carried out immediately with little effort to eliminate minor damage. These include, for example, repairing joints, sealing cracks, subsequent dowelling and anchoring, restoring edges and skimming concrete.

The repair activities cover structural measures to preserve the basic structure or to restore sufficient surface properties of the concrete pavement which are carried out on larger surface areas. These include, for example, renovating joints, stabilizing and lifting slabs and replacing slabs, slab sections and entire lanes.

If the maintenance or repair activities are insufficient, the pavement needs to be renewed. This includes structural measures for the complete restoration of the surface properties and the basic structure. This can be done by overlay or replacement in full thickness or through a combination of both.

ZTV BEBStB 15 should be applied in conjunction with the ‘Technical delivery terms for construction materials and construction material mixtures for the structural maintenance of traffic areas – concrete pavements’ (TL BEBStB), edition 2015.

ZTV BEBStB 15 contains actual contractual terms (thick edge beam) which must be complied with if application of ZTV BEB-StB has been agreed. Furthermore, there are also guidelines (in italics) that must be observed by the client when preparing the invitation to tender, supervising construction work, accepting the finished work, etc.

Although this set of rules is a very good tool and provides an excellent overview of all possible construction methods for maintaining concrete pavements, it does not replace the necessary knowledge of a person with appropriate professional qualifications for planning and supervision as well as for performing the actual maintenance activities.

In the next sections of this article, individual procedures from the various groups of measures are drawn upon in extracts in order to illustrate the procedure in ZTV BEB StB 15 and its application in practice.

Table 1. Term maintenance, source: ZTV BEB-StB 15

Preservation	Operational preservation	Check
		Operational maintenance
	Structural preservation	Maintenance
		Repair
		Renewal

Condition characteristics/ Damage characteristics		Appearance Cause	Structural maintenance
Evenness	<i>Evenness in the longitudinal profile</i>	<i>Slab offset</i> <i>Changed bedding conditions</i>	- Maintenance - Repair - Renewal
	<i>Evenness in the transverse profile</i>	<i>Slab offset</i> <i>Changed bedding conditions</i>	
Roughness	<i>Skid resistance</i>	<i>Polished surface</i> <i>Wear</i>	
Substance characteristics	<i>Longitudinal and transverse cracks</i>		
Damage characteristics	<i>Damaged edges and broken corners</i>		
	<i>Defective joint filling</i> <i>Miscellaneous surface damages</i>		

Image 1. Features for concrete driving surfaces, source: ZTV BEB-StB 15

In order to determine which measures are appropriate to remedy existing damage, it is important to identify the connection between the pattern of damages and their cause. ZTV BEBStB 15 provides supervisors with an overview (Image 1) for this exact purpose. After identifying the cause of damage, a suitable construction method can be determined. Both technical and economic conditions must be taken into account when choosing this method. This means that, in particular, the remaining useful life must be in proportion to the costs incurred by the measure.

4 Execution

4.1 Preparatory work

The new chapter describes the various options for removing the damaged concrete pavement when replacing slabs, slab sections and entire lanes, as well as for preparing the concrete pavement for a suitable overlay. The task of removal for replacing slabs, slab sections and entire lanes shall be briefly taken up here. Preparatory work is very similar in both cases. The full thickness of the damaged section must be cut out and separated from the undamaged, remaining concrete pavement. This might involve cutting through possibly existing dowels and anchors. Parallel to this, at a distance of 10 to 30 cm, auxiliary cuts are then made, also at full depth. These cuts are designed to reduce the risk of damaging adjacent slabs during removal. It is also important to cut through any non-woven fabrics and bound base courses that are to be removed. Overlapping cuts into adjacent slabs that are to be retained are not allowed and those cuts should therefore only be made in the joints. The shortest side length of a part slab must be at least 1.50 m. In the other direction, the entire slab width or length must then be removed. These cutting procedures are to be tendered separately. This does not apply to any further cutting tasks that may be required and which the contractor carries out to facilitate removal and which are included in the scope of removal.

Subsequently, the concrete pavement must be removed as gently as possible to avoid damaging adjacent surfaces and the sub-base. This means that crushing with a chisel excavator or a drop blade is not permitted (slab replacement) or is only permitted with an unbound base course (entire lane replacement). Cutting and lifting or milling are therefore the preferred removal methods.

Measures for enhancing the sub-base such as reprofiling and recompacting unbound base courses or cleaning and repairing damaged areas in bound base courses must be tendered separately.

4.2 Maintenance

In the maintenance section, under ‘Application’, all the associated construction methods are initially listed. To help with selection of the appropriate method, ZTV BEBStB 15 provides a table in which suitability for use can be determined (Table 2). This facilitates planning and tendering, since possible renovation procedures can be directly assigned to any pattern of damage.

Table 2. Maintenance methods, source: ZTV BEB-StB 15

Appearance	Maintenance methods according to Section				
	2.3.3.1 Repairing joint fillings	2.3.3.2 cutting and sealing of cracks	2.3.3.3 Dowelling and anchoring	2.3.3.4 Repairing damaged edges and broken corners	2.3.3.5 Concrete surface work
<i>Polished surface</i>	-	-	-	-	-
<i>Defective joint filling</i>	+	-	-	-	-
<i>Vertical slab movements</i>	-	-	+	-	-
<i>Longitudinal and transverse cracks</i>	-	+	+1)	-	-
<i>Damaged edges and broken corners</i>	-	-	-	+	-
<i>Surface damage</i>	-	-	-	-	+
<i>Insufficient surface drainage</i>	-	-	-	-	+
<i>Step formation at joints and cracks</i>	-	-	-	-	+2)
<i>Noisy surface</i>	-	-	-	O	+3)

+ suitable, O conditionally suitable, - not suitable

4.2. 1 Concrete surface work

As an example, for repair work, the procedure ‘Concrete surface work’ is taken up here. The sub-item ‘General’ initially lists the areas of application. If the surface demonstrates a lack of road grip, surface damage, insufficient drainage capacity, unevenness, step formation or increased noise emissions, there are basically two options available: grinding and grooving.

ZTV BEBStB 15 still uses the German term for grinding. Currently, however, the BASt and the FGSV Working Committee 8.4 ‘Surfaces’ are striving for a change in German terminology. Similar to joint cutting, this process uses diamond blades to cut evenly spaced grooves into the surface (Image 2). Therefore, the German term for ‘cutting’ should be used in the future.

The process can be used to eliminate a lack of road grip, unevenness, step formation, surface damage and increased noise emissions. Grooving is used to improve drainage and differs from grinding only in the groove depth and the space between the individual grooves.

The sub-item ‘Execution’ also exists for the individual construction methods. In this case, the two procedures are described in more detail. Some surface texture requirements are placed on the grinding procedure, e.g. maximum height offsets between two adjacent surfaces and the immediate removal of the cutting slurry. Furthermore, guide values for segment width and distance are given. Guide values are also given for the groove profile when grooving. The following sub-items provide information on the ‘type and scope of inspections’, the ‘requirements placed on the finished work’ with regard to road grip and evenness, the necessary cleaning measures before the ‘road can be reopened to traffic’ and ‘billing’ according to the driving surface involved. All chapters relating to the execution of tasks are structured in the same fashion.



Image 2. Surface structure with fine grinding grooves

4.3 Repair

There is also an overview table under ‘Application’ for repair activities which assigns all potential pattern of damage to applicable construction methods (Table 3) and thus supports the selection of suitable methods. These are larger-scale construction measures on larger surface areas which are mainly carried out mechanically and serve to improve the surface properties.

The ‘principles of construction’ explain that regular road condition assessments can be employed to select the type of repair work necessary and that it must be checked whether various necessary repair measures can be carried out at the same time on closed road sections.

This ultimately serves to determine the nature and scope of the measures and to be able to detail invitations to tender accordingly.

The procedures ‘stabilizing and lifting slabs’ and ‘replacing slabs and slab sections’ are intended to serve as examples for describing ‘execution’.

Table 3. Repair methods, source: ZTV BEB-StB 15

Appearance	Repair methods according to Section					
	2.4.3.1 Replacing joint fillings	2.4.3.2 Surface treatment with reactive resin	2.4.3.3 Surface treatment with reactive resin mortar	2.4.3.4 Stabilizing and lifting slabs	2.4.3.5 Replacing slabs and slab sections	2.4.3.6 Replacing entire lanes
<i>Defective joint fillings</i>	+	-	-	-	-	-
<i>Vertical slab movements/slab offset</i>	-	-	-	+	+	+
<i>Longitudinal and transverse cracks</i>	-	-	-	+	+	+
<i>Broken edges</i>	-	-	-	+	+	-
<i>Locally limited surface damage (e.g. fire damage)</i>	-	-	+	-	-	-
<i>Cracks due to overstressing (undersized concrete pavement)</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Polished surface or pop out of coarse aggregates</i>	-	+	+	-	-	-
<i>Surface texture with high noise emission</i>	-	+	+	-	-	-

+ suitable, - not suitable

4.3.1 Stabilizing and lifting slabs

Pattern of damage for which stabilizing and/or lifting slabs is necessary are defined more precisely under ‘General’. For stabilizing, these are perceptible vertical movements when driving a vehicle over the section, which can also be determined more precisely through load capacity measurements (e.g. falling weight deflectometer). In the case of slab offsets or step formation, the slabs should also be lifted in addition to being stabilized in place.

Compared to the description of ‘Concrete surface work’, the sub-item ‘Construction materials’ is added here due to the use of materials in this procedure. The possible construction materials are silicate resin, polyurethane rigid foam and hydraulically bound injected mortar with the

corresponding applications listed in a table. When selecting the material, care should be taken to ensure that, in addition to suitability and requirements with regard to road closure, the durability of the material corresponds to the remaining useful life. In terms of material requirements and proof of suitability, reference is made to TL BEBStB 15. It should be noted that hydraulically bound injected mortars are virtually no longer used. Higher quality silicate resin and polyurethane foam are used almost exclusively.

The execution of the procedures is described, with particular emphasis on the various aspects of different material choices. For example, drilling patterns, monitoring the position of machined and adjacent slabs (image 3), the potential disconnection from the sub-base, and the possible treatment of joints are described here. This provides users with key basic information on procedures that need to be observed during implementation. In addition, the necessary inspections, requirements placed on the final result, how long roads need to be closed until the materials have hardened sufficiently and billing procedures according to the treated square measure and material consumption are explained.



Image 3. Position monitoring with laser measuring technology and step gauge

4.3.2 Replacing slabs and slab sections

Compared to the 2002 version, the chapter on replacing slabs and slab sections has been greatly revised and supplemented. The volume alone has increased from slightly more than one page to almost eight pages.

In the general part, reference is first made to the validity of ZTV Beton-StB and ZTV Fug-StB before the necessity of references and certificates (e.g. B-StB certificate) to ensure the

qualification of contractors is pointed out. This is intended to meet the increased demands placed on workers and machines as a result of the complex material properties and to ensure high-quality execution. Following this, there is an explanation of applications as they were already available in the previous version. These are supplemented by information that the method can also be used for heat damage and that special attention must be paid to the layout of joints after renovation work. In particular, the longitudinal compression joints must be made outside of rolling marks and the resulting longitudinal compressive stress must be taken into account for the transverse joints. If necessary, expansion joints should be arranged across the entire width of the carriageway in order to prevent heat damage. As guidance, different joint grids are suggested depending on the concrete temperatures at the time of removal. However, the assumption that the zero-stress temperature in concrete is approx. 20 °C is pointed out here. But this zero-stress temperature varies depending on the boundary conditions during the production of the original concrete slab. In order to reduce the risk especially when dealing with older and thinner concrete slabs, the actual zero-stress temperature, if known, should be taken as a base value. Due to the risk of heat damage caused by inadequate compressive stress transmission, it is also explained that the renovation of slabs or slab sections with asphalt does not represent a permanent solution. In particular, if there is no chance of stress relief across the entire width of the pavement due to a lack of expansion joints, it is imperative to replace the bitumen section with concrete before the next hot weather period in order to ensure a uniform and sufficient distribution of longitudinal compressive stress. This shows that the revised ZTV provisions also take account of acute issues such as heat damage, which has received increased publicity in recent years.



Image 4. Vibration-free lifting and removal of the damaged slab

Furthermore, the materials used are road concrete, early-strength road concrete or rapid-hardening concrete, depending on the demands placed on possible road closures. The first two types of concrete are regulated in TL BetonStB. The latter type is regulated in TL BEBStB and is itself divided into three types: A (ready-mixed concrete), B (premixed dry mortar compound to which the coarse aggregate is added in-situ) and C (completely premixed dry concrete to which only water is added).

The chapter ‘Construction materials’ lists all the necessary proof of suitability for all the materials used in connection with this renovation procedure, from concretes to underfilling materials for joints.

The ‘execution’ is described in great detail. The first chapter deals with removal by referring to the aforesaid separate chapter ‘Preparatory work’. Useful sketches are included in Annex A to show the various possible joint, anchor and dowel arrangements depending on the boundary conditions. The following sections deal with the production of in-situ mixed concretes (types B and C), the treatment of the base course and, if necessary, the required separating layers, the paving thicknesses and the inclusion of adjacent slabs (preparatory work on these slabs, permissible slab offset and sealing of the joints against penetrating concrete) as well as permissible unevenness. This sub-item concludes with surface treatment or texturing, which therefore covers the entire process.

This chapter also closes with information on the ‘type and scope of inspections’, ‘requirements placed on the finished work’, the measures required before the ‘road can be reopened to traffic’ and ‘billing’.

5 Summary

The new edition of ZTV BEBStB, first published in 2015, is an excellent and practice-oriented tool that describes in detail the construction methods available for concrete maintenance and repair activities. Compared to the previous version, more information is provided; a fact reflected by the significant increase in the number of pages from 65 to over 100. New knowledge and current topics have been taken up as well as new products and developments. However, it should be noted that there is already a need to revise this edition. This applies, for example, to terms such as grinding as well as to possible areas of application and preferences of materials. Examples include the aforesaid injected materials for which hydraulic binders are no longer used in practice and the other materials that have been improved, thereby reducing the relevant restrictions on suitability. This demonstrates that a set of rules of this nature should always be seen as a snapshot of current practice, but should not restrict further developments. ZTV BEBStB 15 offers ideal guidance for all those involved in construction work. It provides an excellent overview and guidance on how to achieve high-quality, long-term maintenance and repair work; from planning through to construction execution and supervision. Nevertheless, ZTV cannot replace a sound understanding of engineering. It remains imperative to consider all the measures with foresight and logic in order to choose the most economically viable and best method for preserving the basic structure and usage

properties. Nor can the use of the set of rules alone guarantee the best possible execution of work. It is thus essential to always pay attention to the necessary expertise, experience and suitability of the service providers so that the measures lead to the desired level of success.

6 Bibliography

Road and Transportation Research Association (2015): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen (ZTV BEB-StB 15)*. FGSV Verlag, Cologne.

Road and Transportation Research Association (2015): *Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen (TL BEB-StB 15)*. FGSV Verlag, Cologne.

NN (2019): *Noch mehr Staus im letzten Jahr*. In: *Asphalt & Bitumen*, Ausgabe 02/2019, Giesel Verlag GmbH, Hannover

Slipform Paving - Two Lift Concrete Pavement Construction

Bernacchia Alessandro

Slipform Paving Product Manager, Wirtgen GmbH, Italy

Abstract

Concrete pavements on roads and airports can be processed using Slipform Pavers in different methodologies: in single- or dual layer application, with or without fixed forms, automatic dowel- and tie bar insertion or placing the reinforcement on baskets, etc. All these choices have their advantages and disadvantages but they all follow one goal: Highest quality and cost efficient pavements with a compressive strength that resist the increasing loads of vehicles and airplanes of all sizes.

By following the paving process beginning with the concrete mixing & transportation, the (pre-) spreading of the material up to the consolidation, forming and finishing with the paver and the after-treatment, the paving result is influenced by many factors. The aim of this article is to explain the benefits of using slipform pavers in dual layer applications, with a special interest in the German experience. Moreover, several reference projects from around the world, will also be provided that will focus on the following topics:

- Concrete mix and logistics influenced by the choice of dual layer application and the installation of the reinforcement.
- Benefits of dual layer paving, like easier use of two batch plants to increase productivity or cost reduction due to a potentially lower price mix design for the bottom layer. How does single or double layer paving influence the quality of the pavement?
- Pros and cons of using one paver with dual mold or two pavers as well as same mix for both layers versus two different mixes. How to choose?

Keywords: *Slipform Pavers, Dual Lift, Dual Layer construction, concret*

1 Historical Overview

Two-lift concrete paving, also referred to as two-layer concrete pavements (2LCP) involves placing two layers of concrete (wet-on-wet) instead of a single homogeneous layer. 2LCP is not a new concept in the United States. In fact, the first U.S. concrete pavement constructed in 1891 in Bellefontaine, Ohio consisted of a two-layer system [Snell L.M. and Snell B.G., 2002]. In the past, many states in U.S. specified two-layer concrete pavements to facilitate the placement of steel reinforcing mesh. However, in the early 1970's the concrete paving industry began to move away from a jointed reinforced concrete pavement design and the use of mesh has been largely discontinued. However, the high-quality, wear-resistant aggregates used to construct the U.S. pavements that have lasted 50-60 years are becoming scarce. As a result, two-lift paving is returning to the forefront as a sustainable, long-lasting pavement solution. Its potential benefits are attracting the attention of agencies and contractors across the U.S. [Hall K, 2007; Shields-Cook, S. and Taylor, P.C., 2009].

In Europe the use of 2LCP is also not new, and examples of two-lift paving are most prevalent in Austria, Spain, Czech Republic, Poland, Germany, Belgium and several former CIS countries. These countries cited safety, noise, and economic reasons for implementing the two-lift paving method [Cable, J.K. and Frentress, D.P., 2004]. For example in Germany two-lift paving is often used to reduce noise and increase friction. Germany also uses this method to reduce cost and achieve a smoother profile. In addition, Germany has somewhat drastic climatic conditions, which require the use of higher quality mixture and aggregates in the top layer to resist freezing and thawing effects.

Several other countries are also considering the introduction of 2LCP in their concrete paving technology with the goal of getting smoother and more durable roads while reducing overall construction costs.

The term dual layer pavement describes a broad spectrum of applications of two layers of concrete on top of each other as part of a "wet on wet" process. Depending on the pavement design, its geography and tradition there may be several differences in the mix design, application of the layers and ultimately achieved benefits. The vastest majority of two layer projects have been executed in Europe with Germany making it the standard on their motorway and airports when automatic dowel bar insertion is employed. The US experience is still quite limited but the application is starting regaining interest in particular due to the cost savings that can be achieved in comparison to a single layer pavement especially when recycled concrete or recycled asphalt is used in the bottom layer. We will just briefly touch on the experience acquired on the Illinois tollway, where they have been successfully using fractionated recycled asphalt pavement (FRAP) in the lower lift and high-quality virgin stone in the top lift (recycled concrete typically goes into the base, although contractors have the option to use it in the lower lift as well). The main focus will be on the German/European experience which generally doesn't utilize recycled materials and exposes the aggregates of the top layer as opposed to longitudinal tining primarily seen on the US projects.

Slipform Pavers (SP) have become through the years the preferred tools to construct concrete pavements (both single and dual layer). This is due to the high productivity, compaction

ability, smoothness achievements and overall cost efficiency they bring to the paving operation when compared to manual or other mechanized/semi mechanized pavement processes (roller finishers, screeds etc.).

Slipform pavers can be used in the construction of two lift JPCP (Jointed Plain Concrete Pavements), where normally dowel bars are inserted at the contraction joints as well CRCP (Continuously Reinforced Concrete Pavements), where steel reinforcement is present. JPCP are more prevalent and are the general standard in Germany while CRCP has been successfully utilized in Belgium especially on heavy load arteries. We will primarily focus on describing German best practices of constructing 2L JPCP pavements as they are they are more commonly used and trust the reader will be able to translate the principles to construction of CRCP since various practices will be the same. Two lift construction with SPs is a proven technology utilized on both motorways as well as airfields.

2 Material and Pavement Requirements

2 layer JPCP (2L-JPCP) pavements are the standard in German motorways. The bottom layer generally contains “lower quality” concrete and the top layer is made of the highest quality concrete with exposed aggregates. By use of a retarder the top surface aggregates are exposed by brushing out the cement slurry from the surface (for high skid resistance and noise reduction).

Paving width can vary from 5 to 15.25m, typical thicknesses of the bottom layer oscillate between 17-22cm and top layer between 5-7cm.

Natural sand and crushed aggregates are most commonly used but depending on the availability of preferred materials, crushed sand and non-crushed/round stones can be utilized. The use of recycled aggregates in the bottom layer is permitted but often avoided to have better materials control and prevent the risk of ASR (Alkali-Silica reactions), aka “concrete cancer” which affected several pavements in the region. None the less the use of recycled materials is one of the most interesting aspects of 2L pavements both from a cost perspective and from a sustainability perspective for better utilization of scarce resources as high quality aggregates are becoming increasingly harder to find.

Aggregate sizes and number of piles vary and differ between bottom and top layer. In the bottom layer the typical range is 0-32mm but often capped at 22mm. The use of 4-6 different aggregate piles in the bottom layer is not uncommon. Top layer with exposed aggregates ranges between 0-11mm and normally only sand and one size chipped aggregate are employed. Smaller size aggregates in the top layer have proven the ability to produce quieter pavements, better evenness, while maintaining good friction/skid resistance.

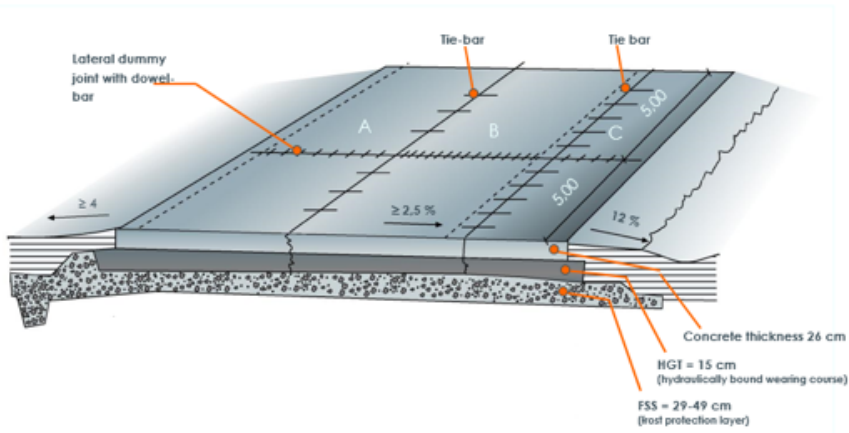
In German mix designs the use of slag and fly ash is generally prohibited and Portland Cement is exclusively used. In the bottom layer cement content traditionally oscillates in the 350-380 kg/m³ while in the top layer the cement content grows to 400-450kg/m³. W/C ratios are typically in the 0.40-0.45 range. Moreover, the use of air entraining agents (to help in freeze-thaw cycles) is prevalent in both layers; bottom layer 3-6% and top layer 4-8%. Table below presents a typical concrete mix design and aggregate characteristics from a German project.

Table 1. Sample Mix Design from a German Project

Ingredient	Bottom Layer	Top Layer
Cement	380 kg/m ³	465 kg/m ³
Sand (0/2 mm)		420 kg/m ³
Sand (0/4 mm)	710 kg/m ³	
Crushed Aggregate (4/8 mm)		1325 kg/m ³
Crushed Aggregate (8/16 mm)	1150 kg/m ³	
Water	151	171
W/C	0.40	0.37
Entrained Air		
Minimum	4.0%	4.5%
Target	4.5%	5.0%
Aggregate Characteristic	Bottom Layer	Top Layer
Resistance to Polishing	PSV > 53	PSV > 48
Grain Shape	SI / FI20	SI / FI15

2L-JCPC pavements on German highways contain smooth dowel bars at the transverse joints and corrugated steel tie bars at the longitudinal joints (Figure 1). The bars are most commonly inserted by means of automatic inserters, i.e. dowel bar inserter (DBI) and tie bar inserter (TBI) as shown in Figure 2b.

One of the reasons for the wide adoption of 2L technology is related to the automatic dowel bar insertion. When inserting the bars with DBI in a single layer, cases of inhomogeneous concrete and air voids on top of the bars resulting in reflective cracking were detected (Figure 3). Although these cracks didn't necessarily constitute a failure of the pavement, they were deemed unacceptable and the placement of a full layer of concrete on top of the first layer, where the bars are inserted, guarantees perfect homogeneity.



(a) Dowels and tie bars on baskets (b) Automatic dowel and tie bar inserter

Figure 2. Dowel Bar and Tie Bar Placement



Figure 3. Problems on single layer JPCP by the use of an automatic DBI

3 Basic Differences Between Single Layer (SL) vs Dual Layer (2L)

Concrete Pavements can be successfully constructed as one lift pavements utilizing a single mix design and one slipform paver. Alternatively pavements can be constructed as two lifts with either the same or different concrete mixes for the different layers and with a train of two slipform pavers following each other at close distance or by a single SP equipped with two molds.

In single layer technology generally the paver is fed by a single plant while with dual layer there is the option to use a single batching plant for both lifts (by switching recipes – if two different mixes are employed - in between batches) or by using two different plants for the two different lifts. As previously mentioned, the German standard prescribes the use of exposed aggregate concrete in the top surface.

Single-layer (one concrete mix and one pass)

Advantages of single layer (one concrete mix and one pass) are the initial lower capital investment, since only one machine and plant are needed and the easier logistics (easier to mix a single recipe and operate one paver, as long as automatic dowel bar inserters – DBI - are employed). Disadvantages of SL are the time consuming and costly placement of dowel baskets, the already mentioned “higher” risk of air pockets and reflection cracks on top of the bars (when using DBI) as well as possible inaccuracies in dowel positioning (due to the increased difficulty of pushing bars in a thicker layer of concrete compared to a “thinner” bottom layer). But the greatest disadvantage is the higher cost of concrete due to the need to utilize the higher quality mix throughout the entire pavement thickness.

Dual-layer with one concrete mix

The advantages of Dual-Layer with one concrete mix are that we can still avoid installing dowels on baskets by utilization of DBI (for better alignment and installation cost savings) without the risk of air pockets or reflective cracks, while having “easy” logistics having to deal with mixing and delivering one type of concrete to both layers. The biggest disadvantage of this solution is that by using the higher quality concrete for both layers the material/concrete cost will be higher. Of course the slipform paving equipment will require an initially higher investment and additional logistic efforts when compared to a single layer operation.

Dual-layer with two different concrete mixes

The advantages of Dual-Layer with two different concrete mixes are that we can still avoid installing dowels on baskets by utilization of DBI (for better alignment and installation cost savings) without the risk of air pockets or reflective cracks, while realizing the significant material/concrete savings derived by using the higher quality concrete only on the thinner top layer. The major disadvantage of this solution is in the greater logistic effort of having possibly multiple plants and two mixes to be delivered to the paver. Of course also the slipform paving equipment will require an initially higher investment and additional logistic efforts when compared to a single layer operation.

Given the great difference in concrete cost between the two layers, contractors can realize significant savings by paving in two layers with two mixes as shown in the example below. The biggest savings obviously come from the lower quantity of cement required in the bottom layer (350kg/m³ vs 420kg/m³), as well as lower quality and cost aggregates (even more in

case of recycled aggregates) due to the absence of skid resistance requirements and high resistance to polishing (only present in the top layer).

Cost savings with two different concrete mixes

Highway project - 10km length - 14.5m width in two directions - paving height bottom layer 23cm - paving height top layer 7cm (total 30cm)

	One concrete mix	Two concrete mixes
Project length [m]	10.000	10.000
No. of directions	2	2
Width per direction [m]	14,5	14,5
Thickness bottom layer [m]	0,23	0,23
Thickness top layer [m]	0,07	0,07
Total paving thickness [m]	0,30	0,30
Concrete amount bottom layer [m ³]	66.700	66.700
Concrete amount top layer [m ³]	20.300	20.300
total [m ³]	87.000	87.000
Price per m ³ of bottom layer concrete	85,00 €	70,00 €
Price per m ³ of top layer concrete	85,00 €	85,00 €
Cost bottom layer concrete	5.669.500,00 €	4.669.000,00 €
Cost top layer concrete	1.725.500,00 €	1.725.500,00 €
Total concrete cost for this project	7.395.000,00 €	6.394.500,00 €
Saving with two different concrete mixes on this project:		-1.000.500,00 €

Figure 4. Costs associated with one or two concrete mix utilization

4 Equipment and Construction Requirements

A successful concrete pavement operation starts at the batching plant, where the concrete is produced. Most contractors utilize high production twin shaft mixers to produce their own concrete to specifications. It's not uncommon to have the same plant produce both mixes. Good stockpile management (to be sure the materials are kept separate and clean) as well as proper labeling of trucks is necessary to avoid confusions.



Figure 5. A concrete batching plant with different stockpiles of aggregates

The concrete batch size/capacity and number of trucks need to be determined correctly in relation to the pavement thickness and width to guarantee the pavers constant forward speed necessary to reach the necessary daily productivity goals as well as to obtain best smoothness results (constant stop/go and creation of construction joints may cause unnecessary roughness in the pavement).

The following is an easy calculation of batch plant size:

$$\text{Plant Capacity} = (\text{Width} \times \text{Thickness} \times \text{aimed paving speed}) / \text{“Reality Factor”}$$

With “Reality Factor” which represents combined inefficiencies and it’s traditionally taken approximately as 0.75.

Loads & trucks requirements can be estimated as follows:

$$\text{Loads per hour} = (\text{Width} \times \text{Thickness} \times \text{exp. Length per hour}) / \text{Truck Capacity}$$

$$\text{Required Trucks} = (\text{Loads per hour} \times \text{Exp. Cycle Time}) / 60 \text{ min/h}$$

Dual Layer Pavement with two machines:

There are various models of pavers available to accommodate paving widths up to 16m. Concrete is delivered in front of the first layer paver directly by dump trucks. An excavator is generally present to help with the concrete pre-spreading operation (so that the paver sees an even load). The first layer paver is generally equipped with a spreader plow (or auger) to further spread the concrete. The concrete compaction is done by the bent high frequency vibrators (electrical or hydraulic) mounted in front of the paving mold and behind the metering gate (which controls the level of concrete in the liquification hopper, aka compaction chamber). The first layer paver is also generally equipped with the automatic dowel bar inserter (DBI) and with the rear tie bar inserter(s).

The full layer of concrete placed on top of the first one wet on wet will guarantee perfect closure of the holes left by the bar inserters. The concrete for the second layer paver is normally being conveyed by means of a back-pass conveyor mounted on top of the first layer paver and dumped in front of the second layer paver which generally follows the first layer paver at a distance of 2-4m in between the crawler tracks. The operator of the second layer machine controls the flow of concrete by actuating the back pass conveyor. This is a delicate operation and requires constant attention not to starve the second layer paver. The back pass conveyor has a large receiving hopper and a dedicated excavator is responsible to transfer the upper layer concrete from the dump truck to the hopper. The second layer paver is also equipped with a spreading plow to distribute concrete as needed but the vibrators are of T shape (instead of bent) to only vibrate the thin (5-7cm) layer of upper layer concrete and not to disturb the bottom layer and possibly displace the bars already inserted in the concrete.

Behind the second layer paving mold there is an Oscillating Correcting Beam (OCB) which is responsible to finish the concrete surface by creating a concrete roll by means of constant oscillating movement perpendicular to the direction of paving. The final finishing touch to the concrete is given by the super smoother which is a floating ski mounted in the back of the correcting beam and moves both transversely as well as longitudinally.



Figure 6. Two layer paving with two machines

Dual Layer Pavement with one machine

Dual layer paving with a single machine is in principle very similar to a two machine operation but all the tools are mounted on the tractor of a large 4 tracks paver (Figure 7). The dual layer in one paving machine is equipped with the two paving molds, Dowel Bar Inserter, Tie Bar Inserters, Back pass conveyor to bring the concrete to the second layer paving mold, Oscillating Correcting Beam and Super Smoother.

There are significant disadvantages in the use of a single paver with dual paving molds as opposed to two separate ones: given the size and weight of the machine it becomes extremely difficult to move it on the site or between sites. It requires extensive disassembly to move

which may take several days. While the separate train of pavers allow for high mobility intra and inter sites with minimal disassembly. Certain models of machines specifically designed for dual layer paving can be transported in a single load without the need of removing the DBI due to their narrow transport width and their compact design. That is obviously not possible in the case of a “dual layer in one” concrete paver.



Figure 7. Two layer paving with one machine

Following the pavers the Texturing and Curing Machine (TCM) is responsible for creating the texture that will give skid resistance to the concrete as well as to spray the curing compound. In the case of the German specs the texture is created by exposing the aggregates. In this case the TCM will spray the curing compound mixed in with a sugar based retarding agent.

After approximately 5-8 hours the concrete surface is brushed by means of a rotating brush and the slurry removed exposing the top aggregates to create the desired top surface. A second layer of curing compound is then sprayed by the TCM and concrete is let curing before the sawing operation can commence (at approx. 6-8h and when the saws can get in without raveling the concrete).

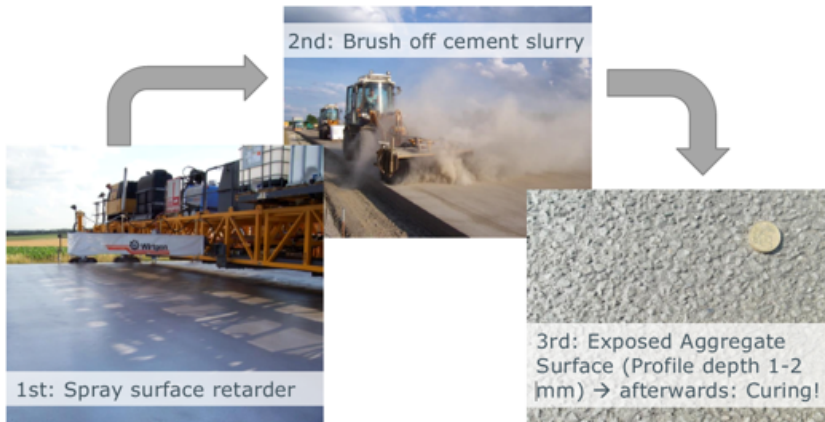


Figure 8. Exposed aggregate concrete surface

When required by the specifications the TCM can also produce the texture as longitudinal tine/rake (predominantly used in USA and proven to provide low noise results), transverse tine, longitudinal or transverse brush, burlap drag and turf texture. The machine can be also equipped with a poly roll to place a plastic film on top of the concrete to help with curing and for protection from the elements (rain, wind and sun).



Figure 9. Different surface characteristics of pavements

5 Application Examples

Two layer construction has been successfully employed in the construction of both highways and airports worldwide. Generally airport specs (especially in Germany) call for the installation of fixed forms.

Airport – Ulaanbataar International Airport – Ulaanbataar, Mongolia

3,600m Runway construction with two layer in one machine, 38cm pavement (27+11cm), same mix for both layers, dowels inserted by DBI, Steel mash manually placed in between layers, no fix forms.

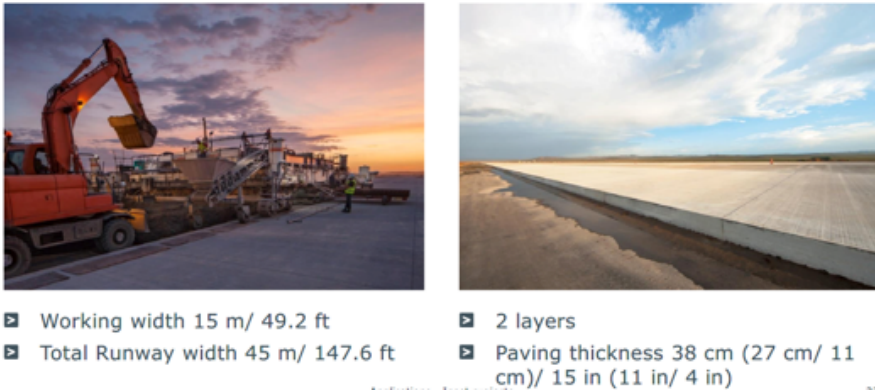


Figure 10. Airport runway pavement construction

Airport – BBI Berlin Airport – Germany

4,000 m runway -240,000m² Two layers, two pavers and TCM, 15m wide and 40cm thick pavement on fixed forms with sinus profile.

Highway – A81 Germany

Two layer concrete pavement with two machines and TCM, Paving width – 10.75m, Bottom Layer – 220 mm, Concrete grade – M 42, Cement – OPC 43, cement Qty: 350-370 kg, Aggregates: 32 mm down, Top Layer – 60mm, Concrete grade – M 42, Cement – OPC 43, Cement Qty: 425-450 kg, Aggregates: 11mm down

Highway – Chicago I-90 toll road

First layer concrete placed with material placers and striked off. No high frequency vibration / compaction on the bottom layer. Top layer placed by slipform paver. Longitudinal texture done by TCM. Top layer virgin aggregate, bottom layer recycled aggregates. Top layer 5 cm concrete, bottom layer 15 cm, pavement width 6ft. Different combinations FRAP and RCA allowed (as long as from controlled/specified sources). Fly ash and slag allowed.

6 Concluding Remarks

There are several potential advantages to the utilization of two layer technology to be summarized as follows:

Paving Quality/Smoothness:

Top layer paver only has to pave a thin layer of concrete, with higher chances to get better eveness/smoothness

Dowel Bars and Tie Bars:

- Efficient and correct bar location when using DBI
- Proper consolidation of material around the Bars
- No Air pockets above the bars due to inconsistent mix
- Elimination of reflective cracks over the bars

Surface Texture – Exposed Aggregates:

- Better Grip – Less wear & tear compared to normal texturing
- Less Noise – reduces 2-3 dB compared to normal texturing

Dual layer with two different concrete mixes:

- Cost reduction - Bottom layer can be used with low grade concrete or recycled materials – Cost reduction
- Eco Friendly – When recycled materials or less cement used in the bottom layer.

References

- Snell, L.M. and Snell B.G. “Oldest Concrete Street in the United States.” Concrete International, March 2002, p. 72 -74. American Concrete Institute, 2002.
- Hall, K. Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada. Publication No. FHWA-PL-07-027. Federal Highway Administration, Washington D.C., 2007.
- Shields-Cook, S. and Taylor, P.C. “Working a Double Lift.” Roads and Bridges, January 2009, p. 32-35.
- Cable, J.K. and Frentress, D.P., “Two Lift Portland Cement Concrete Pavements to Meet Public Needs”, CP Tech Center, 2004.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Sürdürülebilir Karayolu Üstyapı Kaplamaları İçin Çatlaksız, Dayanıklı ve Sünek Beton Tasarımı

Prof. Dr. Mustafa Şahmaran

Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Özet

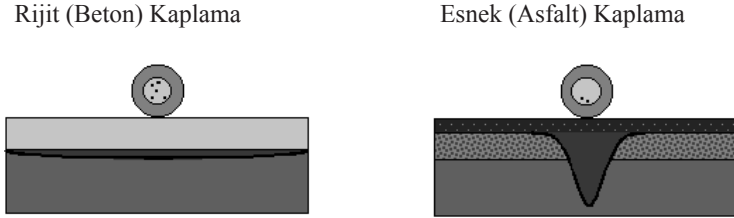
Geleneksel beton doğası gereği özellikle çekme yüklemeleri altında gevrek bir davranış sergilemektedir. Ayrıca, betonun gevrekliği basınç dayanımı yükseldikçe artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı yapısal uygulamalarda çimento esaslı yüksek sünekliliğe sahip bir kompozit malzemenin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler (YP-LDK) adlı özellikle çekme yüklemeleri altında metallere benzer sünek davranış sergileyen yeni nesil bir kompozit malzeme geliştirilmiştir. Bu çalışmada özellikle atık malzemelerin geri dönüşümünün sağlanması konusunda da katkı sağlamak amacı ile endüstriyel atık olan uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanımı ile YP-LDK geliştirilerek, bu kompozitlerin karayolu üstyapı kaplaması olarak kullanılabilirliği açısından özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilmiş olan çalışmaların nihai amacı olan uygulamaya konulmasıyla endüstriyel atıkların kullanımı artırılarak karayolu üstyapı kaplaması olarak kullanılabilen YP-LDK karışımları ile sektöre daha çevreci ve yüksek performanslı bir kaplama malzemesi kazandırılmış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Karayolu üstyapı kaplamaları, yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler (YP-LDK), yansıma çatlağı, bağ dayanımı.

1 Giriş

Karayolu üstyapıları, trafik yükünü taşımak üzere yüzeye yapılan dayanıklı yol yapısıdır. Bu yapının temel fonksiyonu, üzerine gelen tekerlek yüklerini geniş alanlara yayarak alt tabakalara iletmektir. Üzerine gelen yükü dağıtma çeşidine göre iki farklı tipte karayolu üstyapısı vardır. Bunlar, rijit (beton) ve esnek (asfalt) kaplamalar olarak adlandırılırlar (Şekil 1). Rijit kaplamalar, portland çimento, su ve agregadan imal edilir; esnek kaplamalar ise, asfalt

bağlayıcısı (bitüm) ve agregadan oluşur. Tekerlek yükü rijit kaplamalarda bütün alana düzgün bir şekilde dağılırken, esnek kaplamalarda tekerleğin altında koni şeklinde dağılır (Şekil 1) (Atkinson, 2003).



Şekil 1. Karayolu üstyapı çeşitleri

Kaplamaların kullanım ömürlerini belirleyen çok sayıda tahribatlar vardır. Bu tahribatlar hem rijit hem de esnek kaplamalarda görülebilir. Tekrarlı ağır trafik yükleri, sıcaklık ve nem değişimi ile imalat sırasındaki hatalar; yorulma çatlakları, boyuna çatlaklar, kasma, tekerlek izi, faylanma ve kavlama gibi tahribatların oluşmasındaki en önemli etkenlerdendir. Ayrıca yansıma çatlakları da karayolu üstyapılarında karşılaşılan önemli problemlerden biridir (Şekil 2) (Miller ve Bellinger, 2003).

Altta bulunan tabakadaki çatlakların yansımalarının ya da birleşim yerlerinin sonucu oluşan kırılmalar üstyapı kaplamalarındaki yansıma çatlakları olarak tanımlanır (Sherman, 1982). Bu çatlaklar özellikle rijit üstyapı kaplamaları üzerine yerleştirilen rijit veya esnek kaplamalarda oluşur. Alttaki rijit kaplamanın çatlak ve birleşim yerlerindeki dikey hareketler üstyapı üzerine uygulanan ağır trafik yükleri nedeniyle oluşur. Bu trafik yükleri üstyapı sisteminde oluşan kesme ve bükülme gerilmelerine neden olur (Blankenship, 2007). Alttaki kaplamada oluşan bu tip hareketlerin bir nedeni birleşim yerlerindeki yük transferinin zayıflığıdır. Alttaki rijit kaplamanın termal genişleme ve büzülmesi yatay hareketlere sebep olur (Aleis, 2004). Yansıma çatlakları genellikle alttaki kaplamanın, hava sıcaklığındaki bir sıçramadan dolayı büzüldüğü zaman oluşur. Ayrıca, rijit kaplamalardaki sıcaklık meyili alttaki kaplamada kırılmalar oluşmasına neden olur (Cleveland vd., 2002). Temel tabakasındaki nem değişiklikleri de alttaki rijit kaplamadaki hareketi arttıracaktır. Bununla beraber, üstyapı kaplamalarındaki paralel hareketler nadirdir (Mukhtar, 1996). Bu hareket, üstyapı kaplaması kararsız durumlarda oluştuğu zaman meydana gelir ve kaplamada kayma, çekme ve bükülme gerilmelerini meydana getirir (Von, 2007). Yansıma çatlakları esnek ve rijit kaplamaların bu gerilmelere dayanamamasından dolayı oluşur (Cleveland vd., 2002).



Şekil 2. Yansıma çatlakları

Yorulma ve sıcaklık yansıma çatlaklarıyla birleşince kaplamanın sadece kullanım ömrünü azaltmakla kalmaz, aynı zamanda rijit kaplamanın üzerindeki esnek veya rijit kaplamada birçok probleme neden olur. Yansıma çatlakları kaplamaların yüzey pürüzlülüğünü ve bakım maliyetini artırır (Blankenship, 2007). Bu çatlaklar ayrıca üstyapı sistemlerinin temel ve alt temeline suyun nüfuz etmesine imkan verir (Kallas, 1983). Üstyapı sistemine suyun sızması, kaplamanın erkenden tahrip olmasına, yansıma çatlağı bölgelerinde tabakalanmaya, üstyapı sisteminin ömrünün kısalmasına ve üstyapı mukavemetinin temel ve alt temelin destek kaybından dolayı azalmasına sebep olur (Button, 1989; Jacob 1990). Bu nedenle; mekanik, dayanıklılık ve yapılabirlik taleplerini karşılayabilecek yeni bir kaplama malzemesi geliştirmek önemli bir ihtiyaç olmuştur.

Bu bilgiler ışığında, karayolu üstyapı kaplamaları problemlerini önlemek için çatlaksız, dayanıklı ve sünek beton tasarımı yapılması bu çalışmanın temel amacıdır. Bu amaç doğrultusunda yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler (YP-LDK) geliştirilerek bu tasarımların üstyapı kaplaması olarak kullanılabilirliği açısından literatürdeki mevcut bilgiler doğrultusunda kaplamalar için kabul edilmiş performans kriterleri ile karşılaştırılmış, bağ dayanımı ve yansıma çatlağı özellikleri araştırılmıştır.

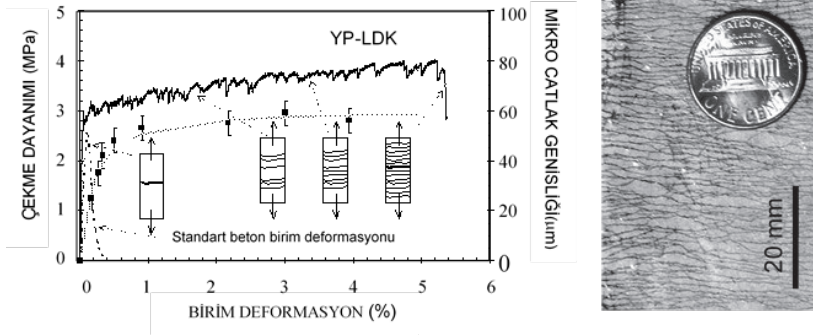
2 Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitler

Avrupa Tasarım Kodlarında, beton kullanılarak inşa edilen kamu yapılarından 75 yılın üzerinde bir servis ömrü istenmektedir. Ancak, tecrübeler mekanik yüklerin ve çevre koşullarının etkileri birleşince birçok alt yapının sadece 20 ya da 30 yıl sonra bozulmaya başladığını göstermiştir. Bozulmuş alt yapıların değiştirilmesi ya da tamiri için malzeme üretimi esnasında trafik sıklığıyla alakalı araç emisyonu ve yakıt tüketiminden dolayı portland çimentolu betonunun kullanıldığı alt yapıların kısa kullanım ömrü, önemli etkiye sahiptir. Beton çatlakları ile birlikte donatılı portland çimentolu betonunun dayanıklılığındaki zayıflık, beton altyapıların kısa kullanım ömrünün temel sebeplerinden biridir. Çatlaklar genellikle beton ve çevre koşulları arasındaki çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimlerin sonucudur ve çatlaklar yapının kullanım süresi boyunca farklı aşamalarda oluşabilir. Çatlak genişliği kontrolü olmayan kırılğan betonlarda çatlakların yapısı öncelikle iki olağanüstü hasarlardan sorumludur. Bu hasarlar, betonun mukavemeti ve rijitliğinin düşmesi ve korozyon, alkali-silika reaksiyonları, donma-çözülme hasarları ve sülfat saldırıları gibi diğer beton bozulma tiplerine önderlik eden zararlı kimyasalların girişinin hızlanmasıdır. Bu nedenle, dayanıklılık

bütün beton yapılar için son derece önemlidir ve bu özellik betonun gevrek doğasıyla ilgili olabilir.

Yüksek basınç dayanımına sahip betonlar geçmiş yıllardan bu yana yapısal amaçlarda kullanılmaktadır. Fakat yüksek dayanıma sahip betonlar gevrek bir davranış sergilemektedir (Taşdemir vd., 1998). Ayrıca, betonun gevrekliği basınç dayanımı yükseldikçe artmaktadır. Bu durum ise yapısal uygulamalarda olası tehlikeler meydana getirmektedir. Günümüzde sık sık karşılaşılan dayanıklılık problemlerinin ve beton ömrünün az olmasının en önemli sebeplerinden birisi de betonun bu gevrek davranışdır (Li vd., 2008). Oysaki yüksek sünekliliğe sahip betonların kullanımı ile betonun deprem yüklerine vereceği tepkilerde ve çevresel koşulları altındaki dayanıklılığında kayda değer bir biçimde iyileşmeler olacaktır.

Bu nedenlerden dolayı yapısal uygulamalarda çimento esaslı yüksek sünekliliğe sahip bir kompozit malzemenin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. 2000'li yıllarda, Michigan Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar sonucunda ECC adlı yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı bir kompozit malzeme geliştirilmiştir. YP-LDK birçok özellik bakımından orta ve yüksek dayanımlı betona benzemektedir. Örneğin basınç dayanımı 30 ila 100 MPa aralığında olabilmektedir. Fakat, diğer normal ve yüksek performanslı betonlardan farklı olarak bu kompozit malzemenin çekme şekil değiştirme kapasitesi oldukça yüksektir (%3-5 aralığında) (Şekil 3) (Li vd., 2008; Li, 1998; Li vd., 2001). Birçok sünek malzeme için %6 ila %8 arasında olan bu değer göz önüne alındığında YP-LDK sünek bir malzeme olarak değerlendirilebilir. YP-LDK'nin çekme şekil değiştirme kapasitesi normal betonun çekme şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ila 500 katıdır (Li vd., 2008; Li, 1998). Öte yandan, YP-LDK şiddetli eğilme yükleri altında da sünekliliğini korumaktadır (Li ve Kanda 1998).



Şekil 3. Çekme şekil değiştirme sertleşmesi davranışı (YP-LDK) (Li, 2003)

YP-LDK'nin gösterdiği yüksek sünekliliğin ana sebebi, mikro-mekanik tabanlı tasarımı sayesinde YP-LDK'nin ilk çatlak oluşumundan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemesidir (Şekil 3) (Li ve Kanda, 1998). Yükleme sırasında oluşan ilk çatlak genişlikleri ortalama 60 µm civarına kadar artmakta ve yüklemeye devam edildiğinde ise oluşan çatlakların genişlemesi yerine çatlak sayısı artmaktadır (Şekil 3). Bu şekilde ilk çatlaktan sonra malzeme bir yandan deformasyona uğrarken bir yandan da taşıdığı yük malzemenin nihai dayanımı elde

edilinceye kadar artmaktadır (Şekil 3). Numunenin göstereceği maksimum deformasyonda bile ortalama çatlak genişliği 60 µm seviyelerinde sabit kalmaktadır. Bir başka deyişle YP-LDK, artan yükler altında kendi kendine çatlak kontrolü yapabilmektedir.

Özetlemek gerekirse, YP-LDK'in sünek bir davranış göstermesi ve çok sayıda ama küçük genişlikte çatlama davranışı ile şekil değiştirme sertleşmesi sergilemesi için matrisin tokluğunun mümkün olduğunca düşük olması, ilk çatlak oluşma gerilmesinin düşük olması, lif ve matris arayüzeyindeki kimyasal bağın düşük olması ve kimyasal bağ koştuktan sonra lif ve matris arasındaki sürtünmenin yeteri miktarda olması gerekmektedir. Tabi bu parametreleri etkileyen tüm faktörler de ayrı ayrı incelenmektedir. Örneğin, su/çimento oranı, kum miktarı ve boyutu, mineral katkı miktarı, lif yüzey özellikleri, lif miktarı, lif boyutları, vb.

3 Karayolu Üstyapı Kaplaması Olarak Belirlenen YP-LDK Karışımları ve Bu Karışımlara Uygulanan Deneyler

Literatür incelemelerinde en iyi performansı gösteren rijit üstyapı kaplaması olarak bilinen mikro-silis betonu (MSB) karışımı belirlenmiştir. Özyıldırım ve Gomez (1999), Sprinkel (2000), Alhassan (2007) ve Mokarem ve diğ. (2008) MSB'nin kaplama olarak kullanılabilirliği ve performansı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda MSB'nin mekanik ve dayanıklılık özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmalardan Özyıldırım ve Gomez (1999)'in çalışmasındaki MSB karışımı en iyi performans gösteren karışımlardan biri olması münasebetiyle bu projede kontrol karışımı olarak seçilmiştir. Bu karışımın malzeme oranları Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu çalışmada bulunan basınç dayanımları irdelenerek uçucu kül ve cüruf içeren iki YP-LDK karışımı, karayolu üstyapı kaplaması olarak seçilmiştir. Bu karışımlardan uçucu kül içeren YP-LDK karışımı UK_YP-LDK ve cüruf içeren YP-LDK karışımı ise C_YP-LDK olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada karayolu üstyapı kaplaması olarak kullanılan MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışım oranları ve temel özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışım oranları ve temel özellikleri

Malzeme (kg/m ³)	MSB	UK_YP-LDK	C_YP-LDK
Portland Çimento	454	566	593
Mikro-silis (Silis Dumani)	45	-	-
Uçucu Kül	-	680	-
Cüruf	-	-	712
Su	150	331	347
Kaba Agrega	1068	-	-
İnce Agrega	699	-	-
Kum (0-400µm)	-	453	474
PVA	-	26	26
Su/Bağlayıcı	0.3	0.27	0.27
Süper Akışkanlaştırıcı (g/m ³)	5.5	5	6
Hava Sürükleyici (g/m ³)	0.43	-	-
Slamp (mm)	-	815	670
Hava Boşluğu (%)	4.7	6.9	6.3
Elastisite Modülü (GPa)	35.2	19.7	24.9

3.1 Karışımların Karayolu Üstyapı Kaplaması Açısından Performans Özelliklerinin Belirlenmesi

Seçilen MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarının karayolu üstyapı kaplaması açısından değerlendirilmesine yönelik yapılan bağ dayanımı ve yansıma çatlağı deneyleri için alt tabaka betonu (ATB) karışımı hazırlanmıştır. Bu karışım hazırlanırken ülkemizde rijit kaplamalar için herhangi belirlenmiş bir standart olmadığından dolayı Amerika Karayolları Ofisi (AKO)'nin belirlediği beton otoyol ve köprü döşemesi kriterleri referans alınmıştır. Michigan Köprü Dizayn Kılavuzu (2009)'na göre beton köprü döşemeleri için gerekli olan koşullar Tablo 2'de belirtilmiştir. ATB karışımı 28 günlük basınç dayanımı 31 MPa olacak şekilde dizayn edilerek beton köprü döşemeleri için gerekli olan koşullar kontrol edilmiştir.

Tablo 2. AKO beton köprü döşemeleri koşulları ve ATB değerleri (MDOT, 2009)

Özellikler	İstenen özellikler	ATB
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	31	31.9
Minimum çimento oranı (kg/m ³)	390	400
Sürüklenmiş hava (%)	4.5±1.5	5.3
Slump (mm)	25-150	65
28 günlük eğilme dayanımı (MPa)	5	5.7

3.1.1 Karışımların Karayolu Üstyapı Kaplaması Açısından Performans Özelliklerinin Belirlenmesi

Eğik kesme bağ dayanımı deneyi laboratuvar ortamında kolayca uygulanabilen ve kaplama ile alt tabaka arasındaki bağ dayanımını ölçmede yaygın bir şekilde kullanılan bir testtir (Wall ve Shrive, 1988; Silfwerbrand, 2003). Bu test ASTM C1042 standartlarına göre uygulanmaktadır.

Eğik kesme bağ dayanımı deneyi için ATB karışımı hazırlanarak 100×200 mm ölçülerindeki silindir kalıplara dökülmüştür. 24 saat sonra kalıplardan çıkartılan silindir numuneler 27 gün kirece doymun suda kür edilmişlerdir. Bu sürenin sonunda kür havuzundan çıkartılan numuneler sıcaklığı 23 °C ve bağıl nemi %50 olan kür odasında 5 ay boyunca muhafaza edilmişlerdir. Daha sonra numuneler elmas uçlu testere yardımıyla 30 ve 45 derecelik açılarda kesilerek Şekil 4'deki gibi deneye hazır hale getirilmişlerdir.



30 derece



45 derece

Şekil 4. 30 ve 45 derecelik açılarla kesilmiş ATB numuneleri

ATB numuneleri hazırlandıktan sonra her üstyapı kaplama karışımı için 24 adet 30 derecelik ve 24 adet de 45 derecelik olmak üzere toplam 48 numune 100×200 mm'lik silindir kalıplara yerleştirilmiş ve üzerlerine MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımları hazırlanıp dökülmüştür. Bu şekilde oluşturulan yeni silindir numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılarak deney gününe kadar % 95±5 bağıl nemde ve 23±2 oC sıcaklıktaki özel hava geçirimsiz poşetlerde kür edilmiştir. Numunelere, 1, 7, 28 ve 90 günlük yaşlarında, 3000 kN kapasiteli test cihazı ile ASTM C39 standardına göre Şekil 5'de görüldüğü gibi basınç dayanımı testi uygulanmıştır.



Şekil 5. Basınç yükü altındaki eğik kesme bağ dayanımı deney numunesi

3.1.2 Yarmada Çekme Bağ Dayanımı Deneyi

Direk çekme bağ dayanımı deneyinde istenilen sonuçlara ulaşılamadığı için yarmada çekme bağ dayanımı deneyi yapılmıştır. Bu deney ASTM C496 standardına göre silindirik beton numuneler üzerine yapılan yarmada çekme deneyine çok benzemektedir. Numunelerin hazırlanma prosedürü bir önceki bölümde direk çekme bağ dayanımı deneyi için numune hazırlama prosedürü ile birebir aynıdır. MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarının her biri için 8 adet numune yarmada çekme bağ dayanımı deneyi için hazırlanmıştır. Numuneler Şekil 6'daki gibi test cihazına yük birleşim bölgesine gelecek şekilde yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Deney sonrasında yarmada çekme bağ dayanımı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T = \frac{2P}{\pi A}$$

Formülde T, bağ dayanımı; P, maksimum yük ve A ise bağ bölgesinin alanı anlamına gelmektedir.



Şekil 6. Yarmada çekme bağ dayanımı deneyi

3.1.3 Dört Noktalı Eğilmede Çekme Deneyi

Karayolu üstyapı kaplaması olarak seçilen karışımların tabakalı olarak eğilme dayanımlarını ve optimum kaplama kalınlığını tayin etmek amacıyla dört noktalı eğilmede çekme deneyi yapılmıştır. Bu deney öncelikle 400×75×80 mm boyutlarındaki demir kiriş kalıplarına ATB karışımları dökülerek 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkartılıp 27 gün boyunca kirece doygun suda bekletilmişlerdir. Bu sürenin sonunda kür havuzundan çıkartılan numuneler sıcaklığı 23 °C ve bağıl nemi % 50 olan kür odasında 5 ay boyunca muhafaza edilmişlerdir. Daha sonra numuneler 30 mm kalınlığı elde etmek için elmas uçlu testere yardımıyla

kesilmişlerdir. Bu kesim yüzeyi aynı zamanda her tabakalı numune için alt tabakada aynı yüzey durumunu sağlamıştır. Hazırlanan ATB numunelerinin üzerlerine MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarının her biri için 25, 35 ve 50 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta hazırlanarak dökülmüştür. Bu şekilde hazırlanan tabakalı numunelerle üstyapının onarımı modellenmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan ve deney gününe kadar özel hava geçirimsiz poşetlerde % 95±5 bağıl nemde ve 23±2 °C sıcaklıkta deney gününe kadar kür edilmişlerdir. Hazırlanan tabakalı numunelerin eğilme performanslarını belirlemek için arazideki durum göz önüne alınarak kaplama yüzeyi altta (çekme yükünde) ATB yüzeyi ise üste (basınç yükünde) olacak şekilde dört noktali eğilmede çekme testi 1, 7 ve 28 günlük yaşlarda yapılmıştır.

3.1.4 Yansıma Çatlağı Deneyi

Kaplamalar genellikle, köprü üstü yolu, otopark, havaalanı ve fabrika zeminleri gibi yapılarda, yüzey kusurlarının onarımı için üstyapının üzerine uygulanır. Bu kusurlu yapılar çatlaklar ya da birleşim yerleri içerebilirler ve bunlar onarım sistemlerinde çökmenin başlangıç noktaları olabilirler. Üstyapıda bulunan çatlakların ya da birleşim yerlerinin üzerindeki kaplamalarda en çok karşılaşılan problem yansıma çatlağıdır. Yansıma çatlağının laboratuvar ortamında modellenmesi için daha önce Lim ve Li (1997), Kamada ve Li (2000) ve, Zhang ve Li (2002)'nin çalışmalarında kullandıkları deney metodu bu projede de kullanılmıştır. Bu deney metodu hazırlanan kompozit kirişin dört noktali eğilme yüküne maruz bırakılarak değerlendirilmesidir. Öncelikle 400×75×80 mm boyutlarındaki demir kiriş kalıplarına ATB karışımları dökülerek 24 saat sonra numuneler kalıptan çıkartılıp 27 gün boyunca kirece doymun suda bekletilmişlerdir. Bu sürenin sonunda kür havuzundan çıkartılan numuneler sıcaklığı 23 °C ve bağıl nemi %50 olan kür odasında 5 ay boyunca muhafaza edilmişlerdir. Ardından numuneler elmas uçlu testere ile kesilerek 400×75×30 mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bu numuneler tam ortalarından ikiye kesilerek alt tabakada daha önce meydana gelmiş olan bir çatlak oluşturulmuştur (Şekil 7). Bu numunelere mevcut çatlağın davranışının laboratuvar ortamında modellenmesi için çatlağa su geçirimsiz şeffaf bant yapıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan ATB numuneleri 400×75×80 mm boyutlarındaki kalıplara elmas uçlu testere ile kesilen yüzeyleri üste gelecek şekilde yerleştirilerek üzerlerine 25, 35 ve 50 mm kalınlığındaki MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımları dökülmüştür. 24 saat sonra kalıptan çıkartılan ve deney gününe kadar %95±5 bağıl nemde ve 23±2 oC sıcaklıktaki özel hava geçirimsiz poşetlerde kür edilen numunelerin 7 ve 28 günlük yaşlarda dört noktali eğilmede çekme testi yapılarak yansıma çatlağı performansları test edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Yansıma çatlağı deneyi için hazırlanan ATB numunesi



Şekil 8. Yansıma çatlaklı deneyi için dört noktalı eğilmede çekme testi

4 Karayolu Üstyapı Kaplaması Açısından Performans Özellikleri

4.1 Eğik Kesme Bağ Dayanımı Deney Sonuçları

Eğik kesme bağ dayanımı deneyi için hazırlanan numuneler basınç yüklemesine maruz kalarak deney sonunda Şekil 9'da görüldüğü gibi bir duruma gelmişlerdir. Eğik kesme dayanımı deneyi sonuçları Tablo 3'de özetlenmektedir. 30 derecelik ve 45 derecelik açıyla kesilerek hazırlanan numunelerin ikisi için de, 1 günlük bağ dayanımları MSB karışımı için en yüksek, UK_YP-LDK karışımı için ise en düşük değerde iken 7 günlük yaşta ve daha sonraki yaşlardaki testlerde bağ dayanımları C_YP-LDK karışımı için en yüksek, MSB karışımı için ise en düşük değeri almıştır. Dolayısıyla eğik kesme bağ dayanımı deneyi sonuçlarına göre en yüksek bağ dayanımına C_YP-LDK karışımı, en düşük bağ dayanımına ise MSB karışımı sahip olmuştur.



Şekil 9. Eğik kesme bağ dayanımı deneyi için hazırlanan numunelerin deney sonrası görünümü

Tablo 3. Eğik kesme bağ dayanımı deney sonuçları

Karışım	Bağ Dayanımı (MPa)			
	1 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün
UK_YP-LDK-30	7.1	14.7	21.7	25.0
C_YP-LDK-30	8.3	17.4	24.3	26.4
MSB-30	10.4	15.2	18.9	21.0
UK_YP-LDK-45	11.8	20.6	30.5	33.1
C_YP-LDK-45	14.2	24.7	32.9	35.5
MSB-45	19.6	22.5	26.1	30.4

*30 ve 45 kesme açılarını (30° ve 45°) göstermektedir

4.2 Yarmada Çekme Bağ Dayanımı Deney Sonuçları

Yarmada çekme bağ dayanımı deneyine maruz kalan numuneler Şekil 10'da 1, 7 ve 28 günlük deney sonuçları ise Tablo 4'de görülmektedir. Hem pürüzlü hem de pürüzsüz yüzey yapısı için, MSB karışımı 1 günlük deney sonuçlarına göre en yüksek bağ dayanımı değerine sahip olmasına rağmen, 7 ve 28 günlük deney sonuçlarına göre YP-LDK karışımları MSB karışımından daha yüksek bağ dayanımı değerlerine ulaşmışlardır. 28 günlük deney sonuçları irdelenecek olursa en yüksek bağ dayanımını C_YP-LDK karışımı, en düşük bağ dayanımını ise MSB karışımı göstermektedir. Dolayısıyla yarmada çekme bağ dayanımı deneyine göre en iyi bağ dayanımı performansını C_YP-LDK karışımı göstermiştir. Ayrıca, beklendiği üzere, pürüzlü yüzey yapısı pürüzsüze göre daha yüksek bağ dayanımı performansı sergilemiştir.



Şekil 10. Yarmada çekme bağ dayanımı deneyi sonrasında pürüzsüz ve pürüzlü numunelerin görünümü

Tablo 4. Yarmada çekme bağ dayanımı deney sonuçları

Karışım	Bağ Dayanımı (MPa)		
	1 Gün	7 Gün	28 Gün
UK_YP-LDK-S	1.82	2.88	3.20
UK_YP-LDK-R	2.00	3.15	3.58
C_YP-LDK-S	2.00	3.02	3.43
C_YP-LDK-R	2.17	3.34	3.75
MSB-S	2.12	2.77	2.96
MSB-R	2.40	2.91	3.11

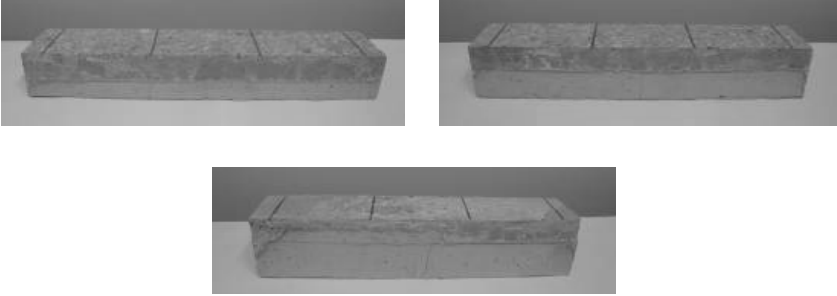
*S: Pürüzsüz yüzey, R: Pürüzlü yüzey anlamında kullanılmıştır.

4.3 Dört Noktalı Eğilmede Çekme Deneyi Sonuçları

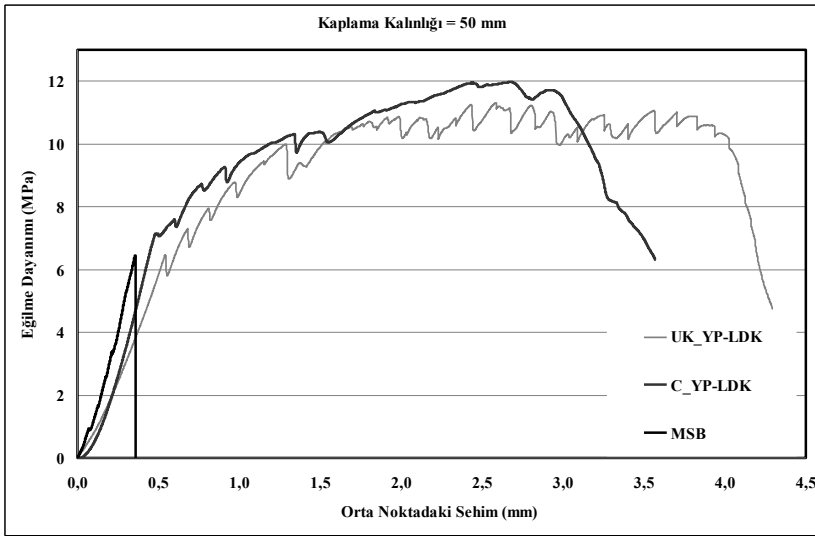
Hazırlanan alt tabaka beton (ATB) numunelerinin üzerlerine MSB, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarının her biri için 25, 35 ve 50 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta dökülerek hazırlanan tabakalı numunelerin eğilme performansları test edilmiştir. Numunelere 1, 7 ve 28 günlük yaşlarda uygulanan dört noktalı eğilmede çekme deneyi sonuçları Tablo 5’de, deney sonrası numunelerin görünümü ise Şekil 11’de görülmektedir. 50, 35 ve 25 mm kaplama kalınlıklarına göre eğilme dayanımı – sehim grafikleri de sırasıyla Şekil 12, 13 ve 14’de verilmiştir.

Tablo 5. Tabakalı numunelerin dört noktalı eğilmede çekme deneyi sonuçları

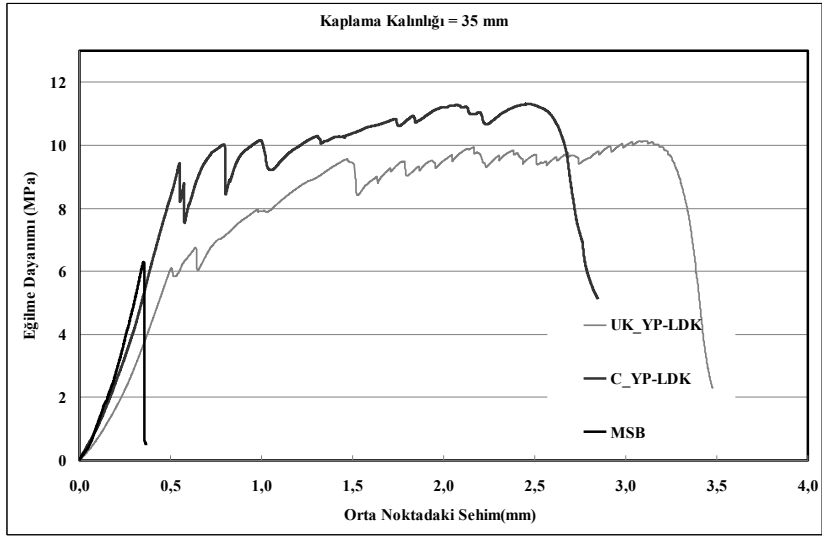
Karışım	Kaplama Kalınlığı (mm)	Eğilme Dayanımı, MPa		
		1 gün	7 gün	28 gün
UK_YP-LDK	25	4.83	7.55	9.46
S-YP-LDK		6.30	8.94	10.88
MSB		4.64	5.33	6.07
F-YP-LDK	35	5.12	8.12	9.98
S-YP-LDK		6.31	9.90	11.00
MSB		4.80	5.59	6.22
F-YP-LDK	50	5.29	8.50	11.31
S-YP-LDK		6.58	10.48	11.98
MSB		4.85	6.11	6.51



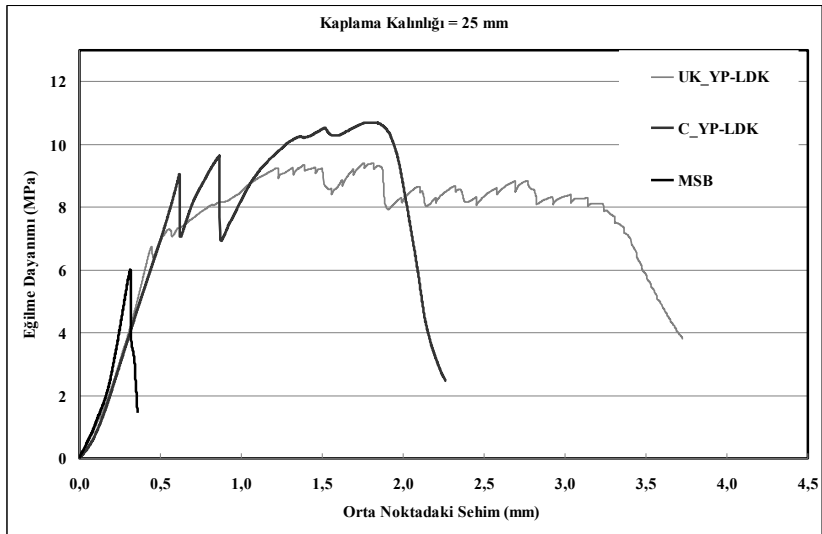
Şekil 11. Farklı kalınlıklarda hazırlanan tabakalı kiriş numuneleri



Şekil 12. Kaplama kalınlığı 50mm olan UK_YP-LDK, C_YP-LDK ve MSB karışımlarının eğilme dayanımı-sehim ilişkisi



Şekil 13. Kaplama kalınlığı 35mm olan UK_YP-LDK, C_YP-LDK ve MSB karışımlarının eğilme dayanımı-sehim ilişkisi



Şekil 14. Kaplama kalınlığı 25mm olan UK_YP-LDK, C_YP-LDK ve MSB karışımlarının eğilme dayanımı-sehim ilişkisi

Dört noktalı eğilmede çekme deneyi sonuçlarına göre kaplama kalınlığı ile eğilme dayanımı ve sehim arasında doğru orantı bulunmaktadır. Yani UK_YP-LDK, C_YP-LDK ve MSB karışımlarının kalınlıkları arttıkça eğilme dayanımları ve sehimleri artmaktadır. UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımları şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergileyerek eğilme yükü altında kırılırken MSB karışımı kırılğan bir davranış göstermiştir. Dolayısıyla bütün kaplama kalınlıkları için YP-LDK karışımları MSB karışımına göre çok daha yüksek sehim değerlerine sahip olmuştur. En yüksek sehim değerlerini ise UK_YP-LDK karışımı göstermiştir. Dört noktalı eğilmede çekme deneyi sonuçları kaplama kalınlığı açısından değerlendirilirse, Tablo 5’de görüldüğü gibi 28 günlük eğilme dayanımlarına bakıldığında 50 mm kalınlıktaki MSB karışımının eğilme dayanımı 6.62 MPa iken sadece 25 mm kalınlıktaki UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarının ise sırasıyla 9.46 ve 10.88 MPa olarak bulunmuştur. 25 mm kalınlıktaki UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarının 7 günlük deney sonuçlarına bakıldığında ise eğilme dayanımları sırasıyla 7.55 ve 8.94 MPa olduğu görülmüştür ki bu değerler dahi 50 mm kalınlıktaki MSB karışımının 28 günlük eğilme dayanımı değerinden daha yüksektir. Dolayısıyla YP-LDK karışımlarının MSB karışımı yerine kullanılması hem eğilme performansını yaklaşık en az %43 oranında arttıracak hem de kaplama kalınlığını %50 oranında azaltacaktır.

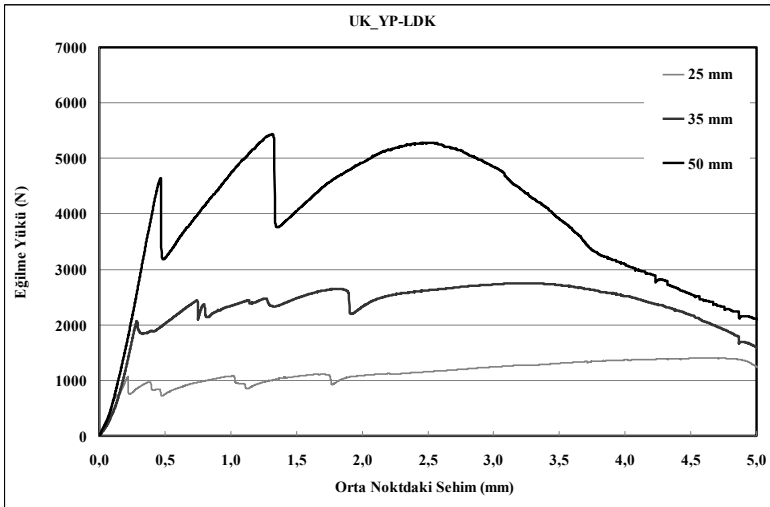
4.4 Yansıma Çatlağı Deneyi Sonuçları

Yansıma çatlağı deneyi için hazırlanan numuneler eğilme yüküne maruz bırakılarak test edilmiştir. Numunelere 7 ve 28 günlük yaşlarda uygulanan yansıma çatlağı deneyi sonuçları Tablo 6’da özetlenmektedir. Yansıma çatlağı deneyi sonuçlarına göre her iki numune yaşı için MSB karışımı en düşük eğilme yükü değerini alırken C_YP-LDK karışımı en yüksek eğilme yükü değerini almıştır. Kaplama kalınlıkları açısından deney sonuçları değerlendirilecek olursa kaplama olarak kullanılan MSB karışımının 50 mm kalınlığında 28 günde göstermiş olduğu eğilme yükü taşıma değeri 3334 N iken C_YP-LDK karışımının 35 mm kalınlığında 28 günde göstermiş olduğu eğilme yükü değeri 3652 N olarak bulunmuştur. Dolayısıyla 50 mm kalınlığında MSB karışımının kaplama olarak kullanılması yerine 35 mm kalınlığında C_YP-LDK karışımının kullanılması yansıma çatlağı deneyi sonuçlarına göre MSB karışımından çok daha iyi performans göstereceği anlamına gelmektedir.

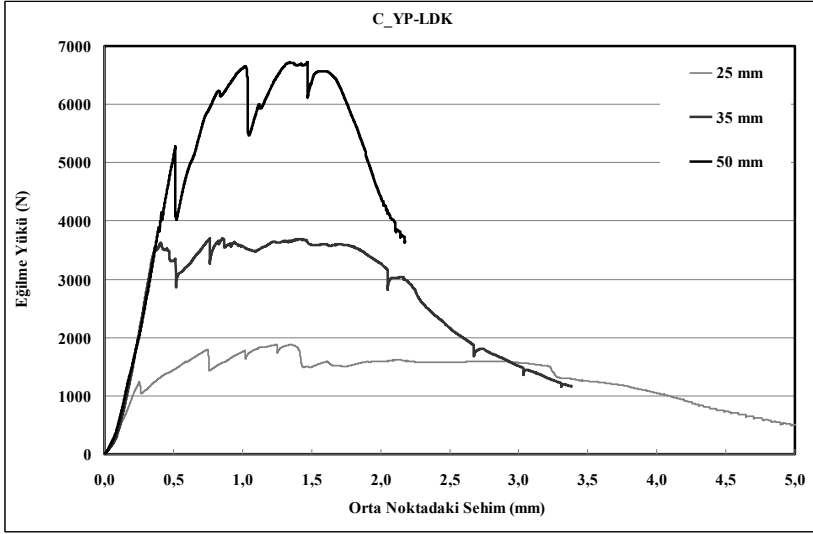
Tablo 6. Yansıma çatlağı deneyi sonuçları

Karışım	Kaplama Kalınlığı (mm)	Maksimum Eğilme Yüğü (N)	
		7 Gün	28 Gün
UK_YP-LDK	25	1066	1414
C_YP-LDK		1409	1839
MSB		959	1278
UK_YP-LDK	35	2330	2857
C_YP-LDK		3219	3652
MSB		1903	2108
UK_YP-LDK	50	4096	5486
C_YP-LDK		5469	6780
MSB		3144	3334

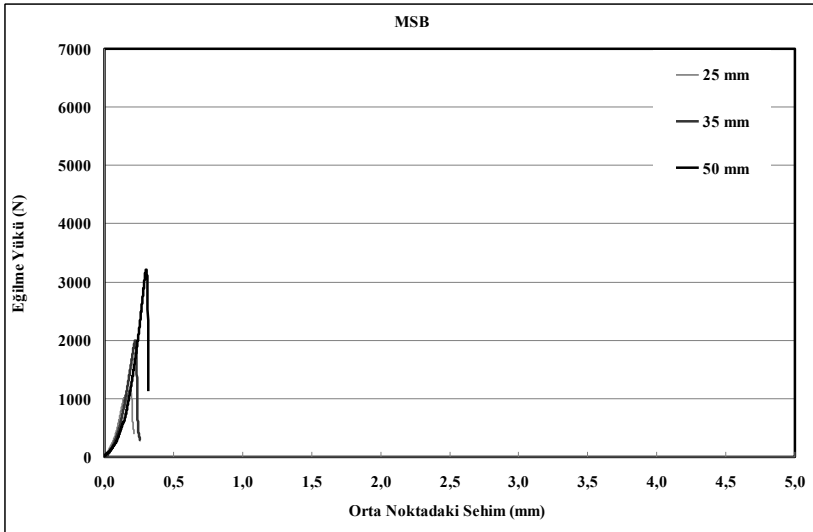
Yansıma çatlağı deneyi sonrasında UK_YP-LDK, C_YP-LDK ve MSB karışımları için elde edilen eğilme yükü – sehim grafikleri sırasıyla Şekil 15, 16 ve 17’de görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere YP-LDK karışımlarının maksimum eğilme yükü seviyelerindeki sehim ile MSB karışımının maksimum eğilme yükü seviyelerinde göstermiş olduğu sehim değeri arasında büyük bir uçurum gözlemlenmektedir. Bu uçurumun temel nedeni malzemelerin kırılma davranışlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. YP-LDK karışımlarında kırılma çok sayıda mikro-çatlaklar oluşarak gerçekleşirken, MSB karışımında tek bir çatlak oluşmuştur. Dolayısıyla MSB karışımında yansıma çatlağı üst tabaka da tekil olarak kendini gösterirken, UK_YP-LDK ve C_YP-LDK karışımlarında çok sayıda mikro-çatlaklar oluşarak yansıma çatlağı minimize edilmiştir.



Şekil 15. UK_YP-LDK karışımının farklı kalınlıklardaki eğilme yükü-sehim ilişkisi



Şekil 16. C_YP-LDK karışımının farklı kalınlıklardaki eğilme yükü-sehim ilişkisi



Şekil 17. MSB karışımının farklı kalınlıklardaki eğilme yükü-sehim ilişkisi

5 Sonuçlar

Bu araştırmada elde edilen sonuçlara göre YP-LDK karışımları beton kaplamalar için kabul edilmiş performans kriterlerini başarıyla sağlayarak literatürde kullanılan en iyi performans gösteren kaplamalardan biri olan MSB karışımından daha iyi bir performans sergilemişlerdir. Özellikle bağ dayanımı, yansıma çatlağı ve eğilme dayanımı gibi karayolu üstyapı kaplamaları için büyük önem arzeden özelliklerdeki yüksek performansları, karayolu üstyapı kaplaması olarak çığır açacak yeni bir malzemenin doğuşunu müjdelemektedir. Üstelik bu yüksek performansı MSB karışımına göre çok daha ince (yaklaşık %50) kaplama kalınlığı ile gerçekleştirmeleri daha ekonomik ve verimli bir malzeme olarak kullanılabilceği anlamı taşımaktadır. Ek olarak, YP-LDK karışımlarının içerdikleri uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu hem endüstriyel atıkların kullanımı açısından hem de çimento tüketiminin azaltılması açısından daha ekonomik ve daha çevreci bir malzeme üretilmesine de imkan sağlamaktadır.

Referanslar

- Aleis, K.A., (2004). Evaluation of the Interlayer Stress-Absorbing composite (IS AC) to Mitigate Reflective Cracking in Asphaltic concrete Overlays Wisconsin Department of Transportation, Report Number: WI-09-04, November.
- Alhassan, M.A. (2007). Performance-Based Aspects and Structural Behavior of High Performance Fibrous Bonded Concrete Overlays. PhD Thesis. University of Illinois, Chicago, Illinois.
- Atkinson, H.N. (2003). Highway materials, soils and concretes (4th ed.). USA: Prentice Hall.
- Blankenship P., (2007). Reflective Cracking Relief Interlayer for Composite Pavement. Asphalt, Vol. 22 No.2 Asphalt Institute.
- Button J.W., (1989). Overlay Construction and Performance Using Geotextiles. Texas Transportation Institute, Transportation Research Record 1248.
- Cleveland G.S., Button J.W. & Lytton R.L, (2002). Geosynthetics in Flexible and Rigid Pavement Overlay Systems to Reduce Reflection Cracking. Texas Transportation Institute, October.
- Jacob, T.R., (1990). Design Parameters for Use of Reinforced Stress-Absorbing Membrane Interlayers. Transportation Research Record 1272.
- Kallas, B.F. (1983). Pavement Maintenance and Rehabilitation. ASTM Publication Code Number (PCN) 04-881000-08, December.
- Kamada, T., Li, V.C. (2000). The effect of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system. *Cement and Concrete Composites*. 22 (6), 423– 431.
- Li V.C., Fischer G., Kim Y.Y., Lepech M., Qian S., Weimann M., Wang S., (2003). Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-hardening Cementitious Composites. Report for Michigan Department of Transportation RC-1438.
- Li V.C., Lepech M.D., Şahmaran M. (2008). Engineered Cementitious Composites For Durable Construction: Recent Developments And Applications. *Concrete International*.
- Li, V.C., (1998). Engineered Cementitious Composites – Tailored Composites Through Micromechanical Modelling, in *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*. Eds. N. Banthia et. al., CSCE, Montreal, 64-97.

- Li, V.C., Wang, S., Wu, C., (2001). Tensile Strain-Hardening Behaviour of PVA-ECC. *ACI Materials Journal*. 98(6), pp 483-492.
- Li, V.C., Kanda, T. (1998). Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. Innovations Forum in ASCE J. Materials in Civil Engineering, 10(2), 66-69.
- Lim, Y.M., Li, V.C. (1997). Durable repair of aged infrastructures using trapping mechanism of engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 19 (4), 373–385.
- Michigan Department of Transportation Bridge Design manual. (2009). Michigan Department of Transportation.
- Miller, J.S. ve Bellinger, W.Y. (2003). Distress identification manual for the long-term pavement performance program. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Mokarem, D.W., Lane, D.S., Özyıldırım, H.Ç. And Sprinkel, M.M. (2008). Measurement of early age shrinkage of Virginia concrete mixtures. Final Report, VTRC 08-R9.
- Mukhtar, M.T., (1996). Interlayer stress absorbing composite (ISAC) for mitigating reflection cracking in asphalt concrete overlays Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, June.
- Özyıldırım, Ç. and Gomez J.P. (1999). High-performance concrete in a bridge in Richlands, Virginia. Final Report, VTRC 00-R6.
- Sherman, George (1982). Minimizing reflection cracking of pavement overlays. National Cooperative Research Program Synthesis of Highway Practice 92.
- Silfwerbrand, J., (2003). Shear Bond Strength in Repaired Concrete Structures. *Materials and Structures*. V. 36, No., July, pp. 419-424.
- Sprinkel, M. (2000). Evaluation of latex-modified and silica fume concrete overlays placed on six bridges in Virginia. Final Report, VTRC 01-R3.
- Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A.D., Lydon, F.D. & Barr, B.I.G. (1998). Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Model Approach. *Cement and Concrete Composites*. 20, 301-318.
- Von Quintus H.L. (2007). Techniques for Mitigation of Reflective Cracking. *Applied Research Associates, Inc.*, April 2007.
- Wall, J.S. ve Shrive, N.G. (1988). Factors Affecting Bond between New and Old Concrete. *ACI Materials Journal*. V. 85, No., March-April, pp. 117-125.
- Zhang, J., Li, V.C. (2002). Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system. *Cement and Concrete Research*. 32, 415–423.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Concrete Road Safety Barriers: A flexible solution for safer roads

Martin Page, Delta Bloc, France

Introduction

The WHO *Global Status Report on Road Safety*, 2018, states that there are 1.35 million road traffic deaths around the world every year. Despite the ever widening use of technologically advanced active safety systems in road vehicles, which help to avoid vehicle run-off road incidents, road safety barriers remain an essential part of road infrastructures. There remains, despite the increasing use of active systems, a very real risk of vehicles running off the road and this can result in serious consequences for vehicle occupants or third parties in other vehicles or in proximity to the road. Road safety barriers play an important role in mitigating the consequences of errant vehicles exiting the carriageway. Such consequences include impacts with obstacles present near the roadside, crossover into the path of oncoming traffic, roll-over or falling into voids or collisions with third parties present near the roadway. Of course, the cost of installing more or better performing barriers has to be considered in the light of the resulting benefits from the significant reduction in accidents, or in their severity, that can be achieved.

Road safety barriers are designed to achieve a range of different restraint performances which allow road designers and national and local road authorities to specify the type of barrier that will be best adapted to any given site. Consequently, there are many different barrier types available on the market. In some cases, especially in the past, some national road authorities developed their own generic barriers which would then be defined in national standards and manufactured in accordance to these standards by different suppliers. Nowadays, competing, proprietary designs are developed and placed on the market by different suppliers. This provides a wider choice of barrier and encourages continuous development resulting in better performances and optimized designs.

This article outlines the use, and opportunities for use of concrete road safety barriers within the context of the European standard EN 1317.

Different types of concrete road safety barrier

The European standard, EN 1317, is a performance based standard. Consequently, the standard imposes no restrictions on the materials used or the design of the barriers. Whatever the design or the materials used, the standard identifies an appropriate level of performance.



Figure 1. A concrete hard-shoulder barrier

One of the most common materials used is concrete, and concrete barriers are commercially available for the whole range of performances that are defined and used on road networks around the globe.

The most commonly used category of barrier is the hard shoulder barrier. Installed next to the hard shoulder of a road, or on the verge at the side of a roadway, these barriers are used to avoid errant vehicles running off of the road where they may collide with rigid obstacles or pedestrians present in proximity to the road. They are also used to prevent vehicles straying into dangerous environments, such as falling into precipices, running into water courses or running onto rough terrain that could lead to vehicles rolling over.

The second most widely used barrier type is the median, or central reserve, barrier. In many cases, national road authorities will require a higher containment capability of a median barrier given the potentially catastrophic consequences of a vehicle crossing to the opposite side of a road and running into oncoming traffic. Median barriers may also consist of a double-line of barrier elements to increase resistance to rupture. In some cases, the space between the two barriers may also be filled with earth.



Figure 2. A concrete central reserve or median barrier

Bridge barriers are another specific type of barrier system. Whether used on the median of a bridge roadway, or on the edge of the bridge deck (bridge parapets), these barriers have to be designed specifically to be fixed to the bridge structure and it is often a requirement to determine the forces that may be transmitted to the bridge structure, through a barrier, in the case of vehicular impact. Indeed, some bridge systems are designed with load-limiting, frangible anchorages that are designed to break away before the loads transmitted to the bridge structure become high enough to potentially damage this structure. The containment capacity of bridge parapets is also often higher than those demanded of other barrier types in view, as with median barriers, of the possible consequences of an errant vehicle breaking through the barrier and falling off of the bridge.



Figure 3. A concrete bridge parapet

As well as the three main types of barrier mentioned above, there are many types of special systems that are required to maintain protection at specific sites or in certain situations. One example, transition systems, are important for safely connecting together different barrier designs with different dimensions and performances. Usually, the transition is required to have a similar performance to the barriers being connected and the transition will also be designed to avoid any potentially dangerous features. Several European Union countries are now requiring the testing and certification of any transitions installed on their roads (e.g. France, Germany). Another example of a special system is a removable barrier section allowing a median barrier to be opened temporarily to allow contraflows during roadworks or to allow emergency vehicle access. Other examples of special systems or elements include those used to protect lighting columns, systems for connecting single-line to double-line installations and systems combining a safety barrier function with that of a noise barrier.



Figure 4. Special systems - a transition between two different barriers



Figure 5. Special systems - a removable barrier section

All of the above are examples of permanent barrier applications, for all of which concrete systems can be an excellent choice. However, another application to which concrete barriers are also particularly adapted is the temporary barrier, providing protection for the personnel and equipment in close proximity to traffic in work zones.

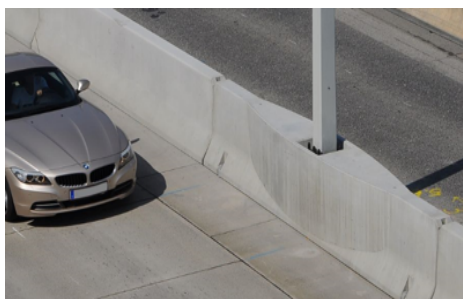


Figure 6. Special systems - lighting column adapter



Figure 7. Temporary solutions - workzone protection

Determining the performance of road safety barriers

The European standard, EN 1317, allows the determination of the performance of all types of road safety barrier. The standard takes into account a number of different criteria in order to do this. The manufacturer of a barrier will decide on the level of containment that is targeted and then the barrier will be subjected to crash tests: the test conditions being determined in relation to the required containment. The principal aspects taken into account in determining the barrier performance are outlined below. First of all, various containment levels are defined in the standard as follows:

- T1 to T3: primarily for temporary barriers – relatively low energy impacts
- N1 to N2: “normal” containment – designed to retain passenger cars
- H1 to H4a/b: “high” level containment – designed to retain heavy vehicles (truck/bus)
- L1 to L4a/b: as H levels but with an additional car test.

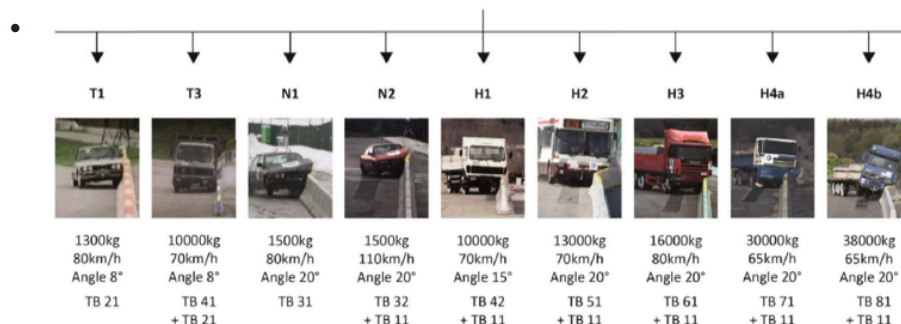


Figure 8. Defining containment levels in EN 1317

Having chosen the containment level, the appropriate crash tests are performed. For most levels, a “containment test” is performed, with the vehicle mass (and impact energy) corresponding to the size of vehicle that the barrier is required to restrain. Vehicles specified for containment tests range from a 1300 kg passenger car to heavy vehicles from 10 tonnes to 38 tonnes in mass.

In most cases, a “severity test” is also performed with a 900 kg car. This test is used to evaluate the severity of an impact or, in other words, the risk of injury for the occupants of an impacting light vehicle. Three severity levels are defined: A (least severe), B and C (most severe).



Figure 9. the EN 1317, “TB11” test to determine impact severity

The “working width” of the barrier is the distance between the front face of the undeformed barrier before the test and the rearmost point of the deformed barrier during the test (based on all tests although, obviously, the higher result is generally obtained from the containment test). This value shows how much space is needed for the barrier to function during an impact. The Working Width indicates the width of the zone behind the installed barrier which should be kept clear. Working Width is categorized as WN1 (smallest) to WN8 (largest).

It is commonly the above three aspects: containment, severity and Working Width, (in addition to the cost and other practical issues) which are taken into account when choosing the barrier best adapted to a particular site. Generally, a compromise is found between the three aforementioned aspects. For example, in the case of a temporary barrier protecting a work zone with a reduced traffic speed and a wide zone free of personnel behind the barrier, a low-weight, modular barrier may provide a suitable containment level and a low severity. The resulting high working width due to the displacement of the elements over the road surface would be considered to be acceptable. On the other hand, for a major road with high levels of traffic and a narrow central reserve, high containment and low Working Width would be a priority in order to avoid encroachment into oncoming traffic in the case of an impact. In this case, a high severity level may have to be accepted as a trade-off allowing the necessary containment level and Working Width to be achieved.

Other aspects of the barrier's behaviour, evaluated by the tests, are related to the structural integrity of the barrier after the test and the vehicle post-test behaviour.



Figure 10. a TB51 test (13T, 70 km/h, 20°)



Figure 11. a TB81 test (38T, 65 km/h, 20°)

The crash tests performed, according to EN 1317, in order to evaluate the performance of barriers involve installing a sample barrier on a test site, after which the test is performed by propelling the test vehicle towards the barrier in order to impact at a speed and angle determined by the test configuration as defined by the standard. The test configurations include impact angles from 8° to 20°, impact speeds from 65 km/h to 110 km/h and the vehicle mass. It is important to install the barrier in the same way, and on the same type of ground, as for the barrier's intended final use. Information on vehicle and barrier behaviour can be obtained from high-speed films of the crash tests whilst data allowing the determination of the impact severity of the barrier is measured by accelerometers and angular-rate sensors fitted to the test vehicle (in the case of car tests).

CE marking – accessing different markets and ensuring constancy of performance

A successfully tested barrier can be CE marked by a notified certification body. The CE marking provides a means to establish a product performance which is common for all states that have adopted it. This means that a product can be placed on the market in all of these countries without the need to apply for an approval in each individual country.

In order for the CE marking to be obtained, and then maintained, regular audits are carried out by the certification body to ensure that adequate measures are being taken at the product production facilities to ensure a constant performance of the safety barrier from the test, throughout the commercial life of the product.

Concrete road safety barriers – advantages and opportunities

Flexible or rigid

Not only are concrete solutions available for the entire range of barrier applications, but concrete allows the greatest range of barrier stiffness: a light-weight pre-cast, modular lane divider, with its elements simply placed on the road surface with no anchorage can provide a highly flexible, low-severity solution. On the other hand, for high containment and low working width, concrete solutions are available which remain perfectly undeformed in the case of impact. In addition, as mentioned above, concrete barriers offer the possibility of filling in with soil the space between two barrier lines.



Figure 12. Flexible concrete system



Figure 13. Anchored, semi-rigid system

Low whole-life costs

In August 2007, G. L. Williams (TRL, UK) concluded, in his published project report: Whole Life Cost-Benefit Analysis for Median Safety Barriers, that whole-life costs for concrete barriers are lower than for their steel counterparts. He reached this conclusion by taking into account the following factors:

- Lower accident costs as a result of reducing median crossover accidents (which generally have a higher fatal and serious injury rate, and hence accident cost);
- No repairs generally being required following an impact;
- Lower routine maintenance costs;
- Longer working life (50 years compared to 25 years for steel guardrails);
- Reduced initial installation costs due to reduced installation times, and hence resulting traffic management and traffic delay costs (which can exceed the installation costs themselves).

To the above points can be added the relative ease of maintenance. Following a severe impact, when repairs are necessary, the appropriate number of pre-cast elements can be simply removed and replaced

High Safety Levels

It is of interest to note that one of the conclusions noted above from the Williams study in the UK is that concrete median barriers offer higher levels of safety due to their lower associated levels of crossover accidents. In fact, Highways England now requires that all median barriers be rigid concrete designs with a minimum containment level of H1.



Figure 14. Highly rigid embedded precast elements meeting UK central reserve barrier requirements

Another way in which concrete barriers can be considered to improve safety is that since they suffer less damage in all but the most severe collisions, and since the replacement of individual modular elements is a relatively simple operation, the time spent on site by maintenance teams is reduced thus reducing their exposure to risk from the adjacent traffic.

Another safety benefit is linked to the “L” containment levels cited above. L-levels were added to EN 1317 after it was observed that some high-containment steel barriers consisted of very stiff posts and two rails: the higher of which was intended to restrain heavy vehicles and the lower of which was “tuned” to reduce severity by attenuating the impact of a light car (particularly the 900 kg test vehicle). One of the most important requirements of the lower rail was to avoid the car impacting the stiff post. However, it was found that, on the road, severe accidents were occurring when heavier cars would crush the absorbing elements of the lower rail more easily, resulting in extremely severe impacts with the stiff posts. The L-levels add a test with a 1500 kg car to ensure that protection is also afforded for this type of vehicle. The smooth, solid surface of a concrete barrier generally precludes this type of risk so most concrete H-level barriers can easily achieve the corresponding L-level.



Figure 15. Installation of concrete barrier elements

Anti-glare for medians

At many sites, anti-glare systems are fitted to the top of barriers to avoid glare from the headlights of oncoming traffic. In some cases, relatively high concrete barriers (with a high containment level) have been installed with the double advantage of combining an anti-glare function with maximum crossover, or run-off, protection.

Eliminating ejected parts

Whether a road safety barrier is constructed from concrete, steel, or other materials, there is always a danger of parts of the barrier being ejected during an impact. These ejected parts can represent a hazard to road users or other persons present close to the barrier. EN 1317 recognises this potential hazard and requires that ejected parts of more than 2 kg are reported following each crash test. We are now starting to see the development of advanced concrete barrier systems which all but eliminate entirely the ejection of barrier parts during impact. This type of barrier can be the ideal solution for sites where ejections can be hazardous.

EN 1317 is evolving and in its next revision it will include the additional classification of barriers with respect to the ejections resulting from an impact. This change reflects the increasing importance attached by road authorities to the potential risk from ejected parts.

Motorcyclist safety

Although road safety barriers can restrain powered two-wheelers, avoiding run-off or crossover accidents, it has to be said that barriers themselves can be a danger to PTW riders in the case of high-speed impacts. The most significant risk for PTW riders comes from direct impact with the posts of post-and-rail barriers, unless these systems are fitted with protection

features that avoid direct impact with these posts. Concrete barriers, whilst being rigid, can be seen as being preferable to a standard post-and-rail system with no motorcyclist protection system as they present a smooth surface with no aggressive localised components such as posts. They also offer continuous containment whereas a fallen rider could slide off of the road if projected between the posts of a standard post-and-rail system. CEN TS 17342 (formerly CEN TS 1317-8) contains test methods for the evaluation of motorcyclist protection systems for road safety barriers.

Conclusions

Concrete road safety barriers are an attractive, cost-effective solution which are paving the way towards increased safety and reduced whole-life costs for road networks.

Concrete products are available for all types of road safety barrier, whether permanently or temporarily installed.

The continuing development of new concrete safety barrier technology is keeping pace with (or, in some cases, even leading) changing regulatory and normative requirements.

New Jersey Tipi Beton Bariyerlerin Tasarımında Çarpma Şiddetini (ASI) Etkileyen Şekil Faktörlerinin Tespit Edilmesi

Dr. Sedat Özcanan, Prof. Dr. Ali Osman Atahan

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Özet

New Jersey tipi beton bariyerler yol güvenliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. NJ tipi bariyerin kesit geometrisinin, güvenlik performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Latin Hiperküp deney tasarım yöntemi ile belirlenen geometrik noktalar için sınır değerleri ve değişkenler türetilmiştir. Bu türetilen değişkenler yardımıyla yeni modeller oluşturulmuş ve bu modeller doğruluğu sınanmış sonlu elemanlar yardımıyla analiz edilmiş ve EN1317 ölçütleri ve ASI (acceleration severity index) temel alınarak kritik noktalar tespit edilmiştir. NJ tipi bariyerin geometrik ve mekanik olarak güvenlik ölçütleri üzerinde %25 etkili olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: NJ beton bariyer; EN1317; ASI/Yaralanma seviyesi

1 Giriş

Trafik kazaları günümüz ulaşım problemlerinin başında gelmektedir. Trafik kazaları yol, hava koşulları ve sürücü algısı olumsuzlukları temelinde meydana gelmektedir. Karayolu trafik kazaları, ilgili fiziksel acı, yaşamsal kayıplar ve finansal yükler nedeniyle insan toplumu üzerinde büyük duygusal ve ekonomik yükler oluşturmaktadır. Trafik kazalarının sayısını ve etkilerini azaltmak, anlaşılmasını ve öngörülmesini iyileştirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Mannering and Bhat, 2014). Bununla beraber iyi tasarlanmış bir bariyerin meydana gelen kazalarda can ve mal kaybını azaltmaya yardımcı olduğu bilinmektedir (Holdridge et al. 2005). Bariyerler yol kenar güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Rijit, yarı-rijit ve esnek olarak sınıflandırılmaktadırlar. Beton bariyerler rijit, çelik otokorkuluklar yarı-rijit ve çelik halatlı otokorkuluklar esnek otokorkuluk sistemlerine örnektir. Özellikle rijit otokorkuluk sistemleri hafif araçlar için ciddi güvenlik problemi yaratmaktadır.

Bu sistemlerin genellikle EN1317 (2014) güvenlik standardında ASI değerleri B/C seviyesinde olmaktadır. Beton bariyerler, kaza anında araçların yoldan ayrılmasını engellemek ve/veya trafik güvenliğini ihlal etmeyecek şekilde yönlendirmek için kullanılan hareketli, yola paralel koyulan engellerdir. Bunlar, araç ve yaya trafiğini çalışma alanlarından uzak tutmak, işçileri korumak, iki yönlü trafiği ayırmak ve karayolu çalışma alanlarındaki inşaat donanımlarını korumak için sıklıkla kullanılan en yaygın yol kenarı donanım türlerinden biridir. Taşınabilirliği ve çok yönlülüğü, öncelikle ihtiyat payı az olan alanlarda avantaj sağlar.

Tipik olarak, bölümlendirilmiş bariyerler, bir yük taşıyıcı bağlantı ile uçtan uca tutturulur. Bariyerin bölümlendirilmesi, çalışma alanında kolayca kurulmalarını ve sökülerek yeniden konumlandırılmalarını sağlar. Beton bariyerlerin yardımcı bir aparat ile yere yarı kalıcı uygulamalarda mevcuttur. Yukarıda bahsedildiği üzere farklı uygulama amaçları için kullanılan beton bariyerlerin ilgili standartlardaki güvenlik kıstaslarını sağlamaları gerekmektedir.

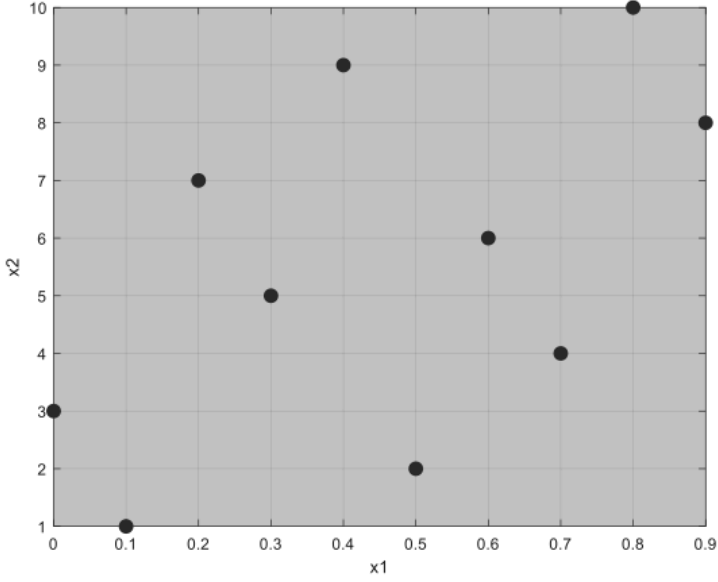
Özellikle yol kenar güvenliği amacıyla tasarlanan bariyerlerin sağlaması gereken minimum güvenlik ölçütleri, dünyada referans olarak alınan MASH (2009) ve EN1317 (2014) standartlarında belirtilmiştir. Bariyer tasarımı süreci baştan sona, hem nümerik hemde gerçek çarpışma testi gerektiren maliyetli bir süreçtir. Bu anlamda tasarıma etki eden parametrelerin bilinmesi, tasarım sürecinde avantaj sağlayacağı açıktır. Bu amaçla yapılan bu çalışmada yaygın olarak kullanılan NJ tipi beton bariyerin ASI tabanlı güvenlik/yaralanma değerine etki eden şekil ve diğer parametreler araştırılmıştır. Bunun için öncelikle NJ tipi bariyer için kritik noktalar belirlenmiştir. Belirlenen bu noktalar için sınır değerleri ve değişkenler deney tasarım yöntemiyle türetilmiş ve daha sonra LS-DYNA yardımıyla modellenmiştir. Yapılan analizler EN1317 ölçütleri ışığında değerlendirilmiş ve kritik noktalar tespit edilmiştir.

2 Yöntem

2.1 Latin Hiperküp Deney Tasarım Yöntemi

Daha az benzetimle eniyi koşulları belirleme işlemlerindeki adımlardan biri olan deneysel tasarım yöntemi, temsili tasarım noktaları oluşturmak için etkili bir yol sağlar. Benzetim tabanlı eniyileme çalışmalarının tasarım uzayında örnekler üreten yaygın olarak kullanılan deneysel tasarım yöntemleri, tam faktöryel tasarımı, Latin hiper küp tasarımı, merkezi kompozit tasarım ve Taguchi ortogonal dizisidir (Hou ve diğ. 2013, 2014; Yin ve diğ. 2016, 2017).

Bu çalışmada çeşitli örneklem noktaları için Latin hiper küp tasarımı kullanıldı. Şekil 1'de gösterildiği gibi, Latin Hiperküp, istatistiksel örneklem bağlamında, örnek sıralarını içeren bir kare ızgara, Latin karesindeki her satırda ve her sütunda yalnızca bir örnek olmasıdır.



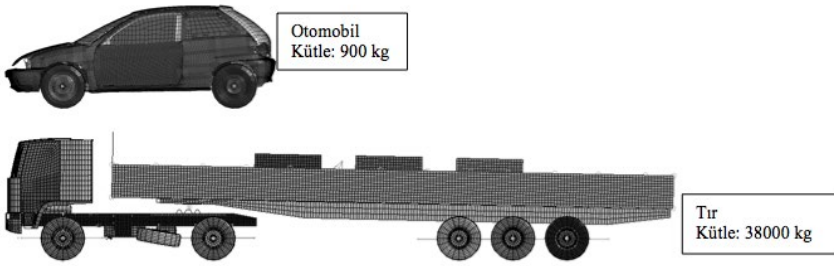
Şekil 1. Latin Hiperküp tasarım örnekleme (Özcanan, 2019)

2.2 Sonlu Elemanlar Modellerinin Doğrulanması

NJ tipi bariyerin kritik tasarım noktalarının belirlenmesinde kullanılmadan önce, sonlu elemanlar (SE) modelleri, daha önce yapılan (CSI, 2018) bariyer tasarımı işinin tam ölçekli çarpışma test sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çarpışma testlerinde 900 kg'lık binek araç ve 38000 kg'lık tır modelleri sırasıyla TB11 ve TB81 testleri için kullanılmıştır. Tablo 1'de EN1317 test kabul ölçütleri, Şekil 2'de ise kullanılan araçlar verilmiştir. Kritik tasarım noktaları ve etki faktörleri belirlenecek beton bariyerin geometrik detayları ve SE modeli Şekil 3'te görülmektedir.

Tablo 1. H4b bariyeri için EN1317 test kabul ölçütleri (Özcanan, 2019)

Sistem	Test	Çarpma hızı (km/sa)	Çarpma açısı (°)	Kütle (kg)	Araç tipi
H4b	TB11	100	20	900	Car
	TB81	65	20	38000	Tır



Şekil 2. TB11 ve TB81 testlerinde kullanılan araçların SE modelleri (NCAC 2008)

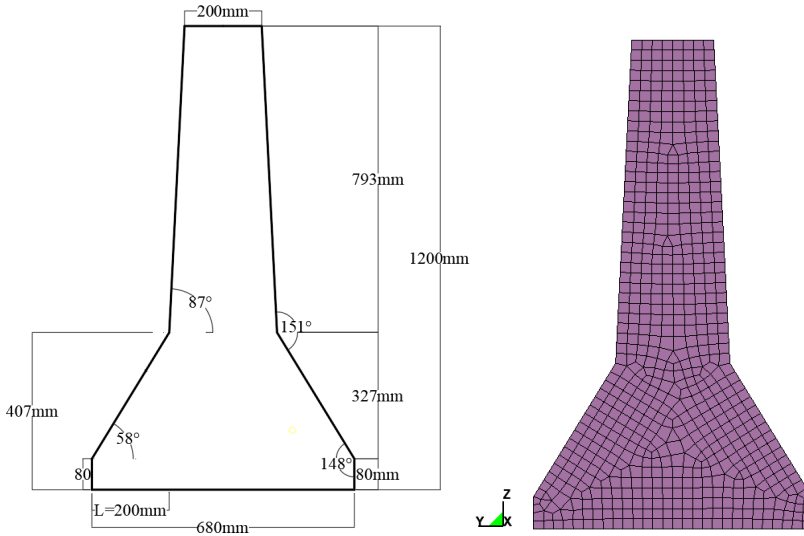
Tablo 2’de NJ tipi beton bariyerin kritik tasarım noktaları etki faktörlerinin bulunması için kullanılacak EN1317 güvenlik ölçütleri verilmiştir. Bu ölçütlerden çıkış açısı (ÇA) ve çıkış kutusu EN1317 standardına göre belirlenmiştir. Standartta verilen ölçütler ışığında çıkış kutusu ölçüleri ve detaylar Şekil 4’te verilmiştir. En büyük emniyetli çıkış açıları (ÇA) binek araç için 19°, tır için 22° olarak hesaplanmıştır. Dönme açısı (DA), aracın takla atması ile birebir ilgili olduğu için, bariyer performansını ve güvenlik derecesini belirlemede önemli bir parametredir. Daha büyük değerler alınmakla beraber, bu çalışmada en büyük dönme açısı güvenli tarafta kalmak amacıyla 20° olarak alınmıştır. Hızlanma/çarpma şiddeti endeksi (ASI) değeri ise gerçek çarpışma testinden beton bariyer için hesaplanan indeks değeridir. Verilen bu değerlendirme ölçütleri ışığında, SE modelleri gerçek çarpışma testleri ile karşılaştırılarak doğrulaması yapılmıştır.

Tablo 2. H4b bariyeri için EN1317 test değerlendirme ölçütleri (Özcanan, 2019)

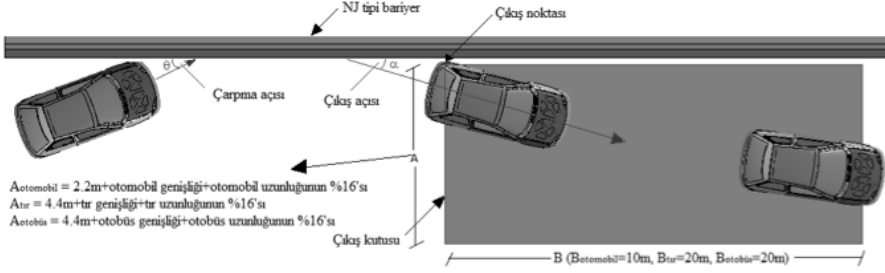
Sistem	Test	Çıkış kutusu (en (A) x boy (B)) (m)*	Çıkış açısı (ÇA) (°)**	Dönme açısı (DA) (°)	ASI
H4b	TB11	4.3x10	≤19	≤20	≤1.42(B)
	TB81	9.5x20	≤22	≤20	-

*EN1317/2 standardına göre hesaplanmıştır

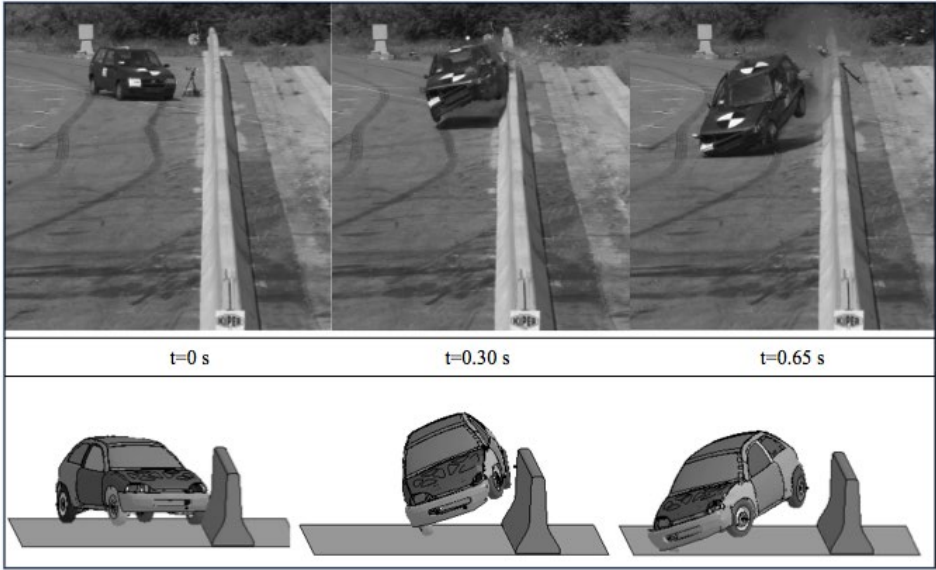
**Çıkış kutusu uzunluğu temel alınarak hesaplanmıştır

**Şekil 3.** H4b beton bariyerinin kesit ölçüleri ve SE modeli (Özcanan, 2019)

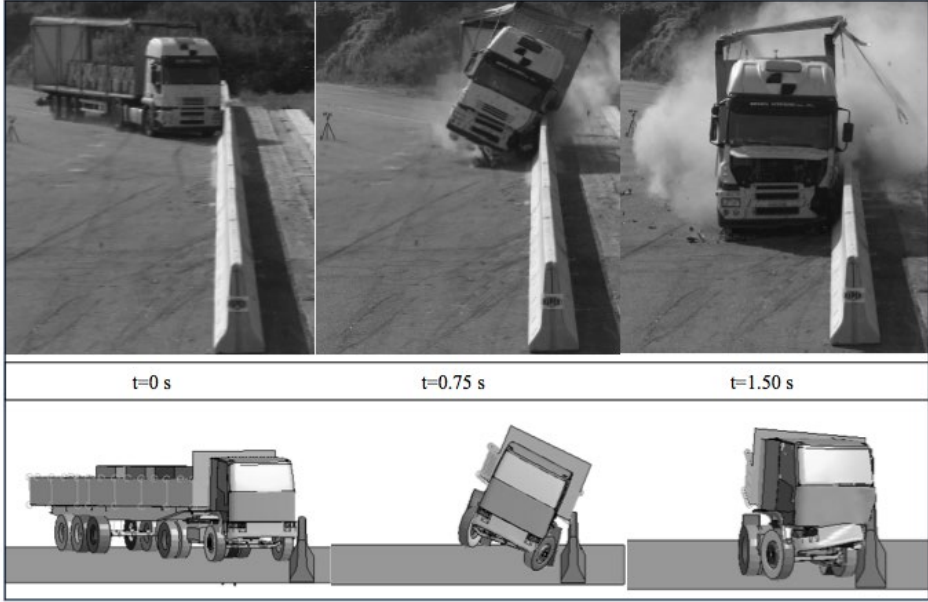
Şekil 5 ve 6'da, 900 ve 38000 kg'lık araçların sırasıyla TB11 ve TB81 testleri olarak LS-DYNA (LSTC, 2014) ortamında modellenmesi ile elde edilen SE analiz sonuçlarının, gerçek çarpışma testleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Araç tepkilerinin önden görünüşlerini görülmektedir. Niteliksel (qualitative) karşılaştırmalardan, SE analiz sonuçlarının gerçek çarpışma test sonuçları ile benzer ve uyumlu araç tepkileri ürettiği gözlenmiştir. Tablo 3'te niceliksel (quantitative) yönden karşılaştırma yapılmış, elde edilen nicel değerler arasındaki göreceli hata payı (GHP) 0-5% olarak ölçülmüştür. Hata paylarından SE benzetim sonuçlarının test verileriyle iyi bir uyum içinde olduğu görülebilir. Ayrıca TB11 testi için gerçek test ile SE modelinden elde edilen ASI grafikleri, sırasıyla Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Bu grafiklerden uyumlu sonuçlar elde edildiği okunabilir. Yukarıda verilen karşılaştırmalara dayanarak, FE modellerinin NJ tipi beton bariyerinin kritik tasarım noktaları ve etki değerlerinin bulunmasında kullanılması için uygun olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4. EN1317 bölüm 2'deki çarpışma testi ayrıntılarının gösterimi (Özcanan, 2019)



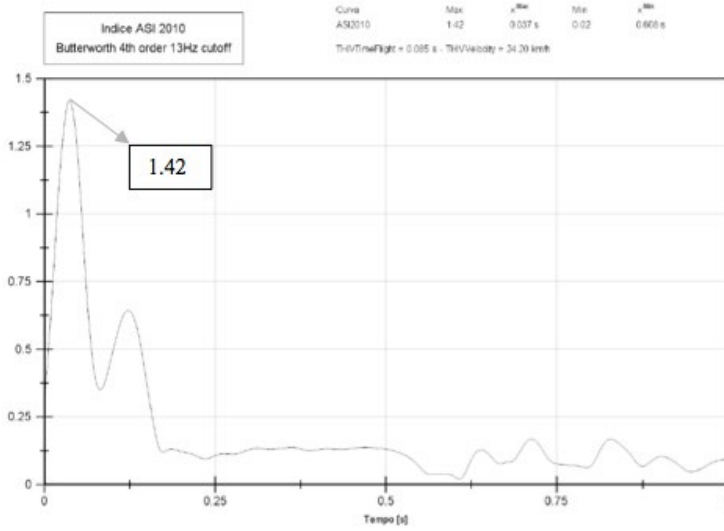
Şekil 5. H4b bariyeri gerçek TB11 çarpışma testi (CSI 2018) ile SE modelinin niteliksel karşılaştırması (Özcanan, 2019)



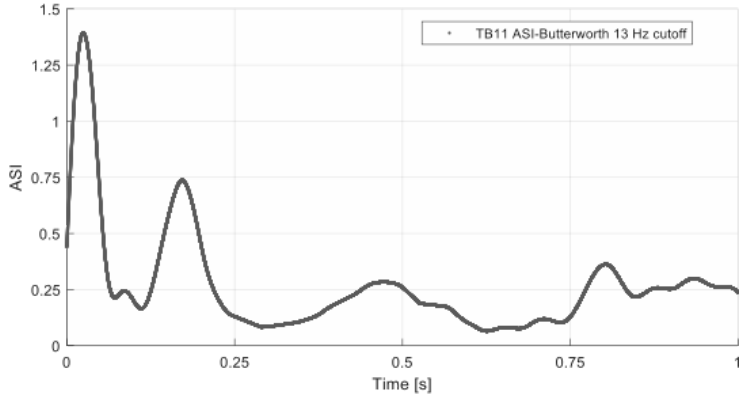
Şekil 6. H4b bariyeri gerçek TB81 çarpışma testi (CSI 2018) ile SE modelinin niteliksel karşılaştırması (Özcanan, 2019)

Tablo 3. Çarpışma testleri ile SE analizleri için niceliksel karşılaştırma (Özcanan, 2019)

Değerlendirme ölçütü	Gerçek çarpışma testi		SE analizi		TB11 için GHP (%)	TB81 için GHP (%)
	TB11	TB81	TB11	TB81		
ÇA	12.5	0.0	12.0	0.0	4.0	0.0
DA	10.0	39.0	10.5	38.0	5.0	2.6
ASI	1.42	-	1.39	-	2.1	-



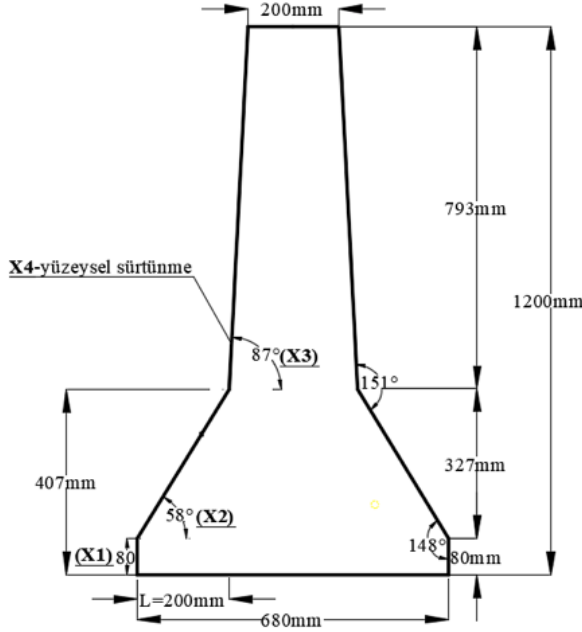
Şekil 7. H4b bariyeri TB11 test raporunda belirlenen ASI değeri ve grafiği (CSI 2018)



Şekil 8. SE analizi sonucunda TB11 için elde edilen ASI değeri ve grafiği (Özcanan, 2019)

3 NJ Tipi Bariyerin Kritik Noktalarının Tespit Edilmesi

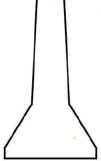
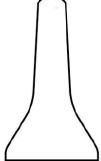

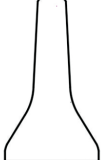
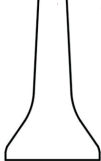
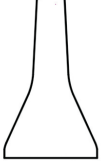
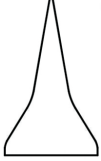
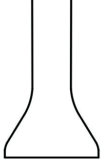
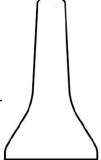

Bilindiği üzere otokorkuluklar güvenlik derecesine ve hizmet sınıfına göre adlandırılırlar. Yol kenar güvenliğini sağlayan pasif güvenlik elemanları olarak otokorkulukların maksimum düzeyde sürücü güvenliğini sağlamaları istenir. Fakat sistemler rijitleştikçe bu pek mümkün olmamaktadır. Özellikle rijit sistemler olarak beton bariyerin güvenlik dereceleri düşüktür. NJ tipi bariyer için güvenlik derecelerini etkileyen kritik tasarım parametrelerinin araştırılarak, bu parametreler yardımıyla güvenlik derecesi yüksek bariyer tasarımı hedeflenmiştir. Kritik tasarım noktaları ve etki değerleri belirlenecek NJ tipi beton bariyer Şekil 9'da verilmiştir. Görüldüğü üzere tasarım için kullanılacak noktalar şekil üzerinde belirtilmiştir. Bu noktalar bariyerin üzerindeki köşe noktaların yuvarlatılması, x1 kenarı, x2 açısı, x3 açısı ve x4 bariyer yüzeyi sürtünme katsayısıdır. Bu noktaların ASI değerine bağlı olarak yaralanma riski ve tasarım üzerinde ki etki değerleri araştırılmıştır. Bu noktaların araştırılmasında ki amaç NJ tipi bariyerlerde hangi parametrelerin ASI üzerinde ne kadar etkisinin olduğu ve tasarım için kritik noktaların belirlenmesidir.



Şekil 9. NJ tipi beton bariyerin kritik tasarım noktaları (Özcanan, 2019)

Şekil 9’da NJ tipi beton bariyerin standart kesit ölçüleri verilmiştir. Çalışma için değişken olarak belirlenen noktaların standart ölçüleri temel alınarak, bu noktalar için tasarım kritik aralığı belirlenmiştir. Belirlenen tasarım kritik aralığı, bariyerin işlevini yitirmeyeceği kombinasyonlar ve sınır değerleri olarak alınmıştır. Bu değerler x1 için 0-10 cm, x2 için 55-65°, x3 için 80-90° ve x4 için ise 0-1.0 yüzey sürtünme değeri alınmıştır. Bu ara değerler için yapılan SE analizlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir. Tablo incelendiğinde özellikle ASI değeri üzerindeki %39.21 etki değeri bakımından x4-sürtünme faktörünün, tasarımda göz önünde bulundurulması gerekli en kritik faktör olduğu, köşe yuvarlatma faktörü ve x3 faktörleri ise % 0.84 etki değerleri ile en az etkili faktörler olduğu görülebilir. Geometrik tasarımı etkileyen x1, x2 ve x3 faktörlerinden x1 ve x2 faktörlerinin toplam yaklaşık %25 etki değerleri bakımından NJ tipi beton bariyer şekil tasarımını etkileyen en kritik bölgeler olduğu anlaşılmaktadır. Bahsedilen bu bölgeler, Şekil 9’da iki faktörün standart ölçülerinin toplamının 407 mm olarak verildiği bölgelerdir. Bu çalışmada ASI yaralanma indeksi tabanlı optimizasyon amaçlansa da, çıkış açısı-ÇA ve dönme açısı-DA güvenlik açısından önemli iki parametredir. Bu iki parametre değerleri de tabloda verilmiştir. Çıkış açısı-ÇA açısından dikkat edildiğinde x4 faktörü 1.00 sürtünme katsayısı değeri hariç, diğer tüm faktör değerlerin Tablo 2’de verilen test değerlendirme ölçütleri için belirlenen sınır değerleri içinde kaldığı görülmektedir. Çıkış açısını-ÇA en çok etkileyen faktör çarpan araç ile bariyer arasındaki yüzeysel sürtünme katsayısını gösteren x4 faktördür. Diğer x1, x2 ve x3 gibi şekil faktörlerinin alt ve üst sınır değerleri değişiminde çıkış açısının fazla etkilenmediği görülmüştür. Dönme açısı-DA güvenliği açısından faktörler incelendiğinde x2 faktöründe yüksek açısının, x3 faktöründe düşük açısının ve x4 faktöründe ise yüksek sürtünme değerinin, takla atmaya neden olduğu belirlenmiştir. En istikrarlı DA değeri x2’nin düşük açısı ile elde edilmiştir.

Tablo 4. NJ tipi beton bariyerin kritik tasarım noktaları ve etki faktörleri (Özcanan, 2019)

Kritik noktalar	Sınır değerler		Etki faktörü (%)
Köşeler	<u>Dik</u>	<u>Yuvarlak</u>	0.84
	 ASI(t) 1.39 ÇA 12 DA 10.5	 ASI(t) 1.38 ÇA 12 DA 18	
X1	<u>0 cm</u>	<u>10 cm</u>	11.66
	 ASI(t) 1.74 ÇA 4 DA 14	 ASI(t) 1.56 ÇA 2 DA 26	
X2	<u>55°</u>	<u>65°</u>	13.19
	 ASI(t) 1.70 ÇA 2 DA 0	 ASI(t) 1.50 ÇA 1 DA Devrildi	
X3	<u>80°</u>	<u>90°</u>	0.84
	 ASI(t) 1.57 ÇA 0 DA Devrildi	 ASI(t) 1.58 ÇA 4 DA 25	
X4	<u>fs=0</u>	<u>fs=1.0</u>	39.21
	 ASI(t) 1.38 ÇA 12 DA 18	 ASI(t) 1.92 ÇA 90 DA Devrildi	

4 Sonuçlar

Yapılan çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Sürtünme katsayısı-x4 değeri büyüdükçe ASI değerinin büyüdüğü ve aracın takla atma olasılığının arttığı anlaşılmış olup, bu değer ne kadar küçük olursa o kadar iyi oldu tespit edilmiştir.
- Geometrik tasarımı etkileyen x1, x2 ve x3 faktörlerinden x1 ve x2 faktörlerinin toplam yaklaşık %25 etki değerleri bakımından NJ tipi beton bariyer şekil tasarımı etkileyen en kritik bölgeler olduğu anlaşılmaktadır. Bahsedilen bu bölgeler, Şekil 9'da iki faktörün standart ölçülerinin toplamının 407 mm olarak verildiği bölgelerdir.
- Çıkış açısını-ÇA en çok etkileyen faktör çarpan araç ile bariyer arasındaki yüzeysel sürtünme katsayısını gösteren x4 faktördür. Diğer x1, x2 ve x3 gibi şekil faktörlerinin alt ve üst sınır değerleri değişiminde çıkış açısının fazla etkilenmediği görülmüştür.
- Yatış açısı-DA güvenliği açısından faktörler incelendiğinde x2 faktöründe yüksek açısının, x3 faktöründe düşük açısının ve x4 faktöründe ise yüksek sürtünme değerinin, takla atmaya neden olduğu belirlenmiştir. En istikrarlı DA değeri x2'nin düşük açısı ile elde edilmiştir.

Tüm yukarıda bahsedilen ölçütler ve tespitler temel alınarak belirlenen kritik tasarım noktaları ve etki değerleri ile ÇA ve DA ölçütlerinin güvenliği sağladığı minimum ASI değerini veren bir tasarıma ışık tutacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- AASHTO MASH-1., 2009. Manual for assessing safety hardware (MASH). 1st ed. Washington (DC): American Association of State Highway Transportation Officials.
- CEN., 2014. European Committee for Standardization. European Standard EN1317, Testing and Evaluation of Road Restraint Systems, Brussels.
- CSI., 2018. Crash testing of KİPER-H4b-DS6.0 barrier systems. 0089\ME\HRB/18, Bollate, Italy.
- Holdridge, J., Shankar, V., Ulfarsson, G., 2005. The crash severity impacts of fixed roadside objects. Journal of Safety Research 36(2), 139-147.
- Hou S, Zheng Y, Xie J, Han X., 2014a. Optimization design of NJ shaped guardrail based on collision safety consideration, Int J Comput Methods., 11:1350083-1-1350083-20.
- Hou S, Tan W, Zheng Y, Han X, Li Q., 2014b. Optimization design of corrugated beam guardrail based on RBF-MQ surrogate model and collision safety consideration. Adv Eng Softw., 78:28-40.
- LSTC, 2014. A general purpose dynamic finite element analysis program, LS-DYNA version 971 user's manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, USA.
- Mannering, F. L., and Bhat, C. R., 2014. Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. Analytic Methods in Accident Research 1, 1-22.

- NCAC., 2008. Finite element model archive, George Washington University FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, Virginia (Accessed 2008).
- Özcanan, S., 2019. Radial basis function surrogate model-based optimization of road restraint systems: three case studies. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Yin H, Fang H, Wang Q, Wen G., 2016. Design optimization of a MASH TL-3 concrete barrier using RBF-based metamodels and nonlinear finite element simulations. *Eng Struct.*, 0141–0296.
- Yin H, Xiao Y, Wen G, Fang H., 2017. Design optimization of a new W-beam guardrail for enhanced highway safety performance. *Adv Eng Softw.*, 112; 154-164.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Geçirimli Beton Uygulaması: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesi Uygulaması

Barışcan Akbelen¹, Mustafa Uslu², İsmail Özgür Yaman³

¹ Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, Türkiye

² OYAK Beton, Ankara, Türkiye

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Özet

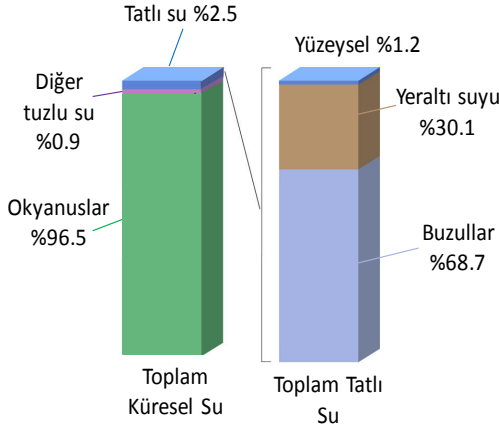
Her ne kadar Dünya'nın 4'te 3'ü sularla kaplı olsa da, kullanılabilir tatlı su miktarı sadece yüzde üç civarındadır. Bunun ise sadece %30'u yeraltı suyu olup, temiz yağmur suyunu yer altı kaynaklarıyla buluşturmak büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde şehirlerimizde kullanılan mevcut altyapı sistemleri nispeten geçirimsiz bir tabaka olmaları nedeniyle temiz yağmur sularının yer altına taşınmasına imkân vermemektedir. Bu sebeple, su kaynaklarımız hızla tükenmekte ve aynı zamanda yoğun yağışlarda sel felaketleri maalesef kaçınılmaz olmaktadır. Geçirimli beton, doğal su döngüsünü koruyan, aynı zamanda erozyon ve sel felaketleriyle mücadelede katkıda bulunan çevreci bir beton türü olarak göze çarpmaktadır. Bu bildirinin amacı geçirimli beton özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgi vermek ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesinde yapılan geçirimli beton uygulama çalışmalarını aktararak Ülkemizde bu tür yenilikçi uygulamaların yaygınlaşmasına katkı sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler: Geçirimli Beton, Sürdürülebilirlik, Drenaj Sistemleri

1 Giriş

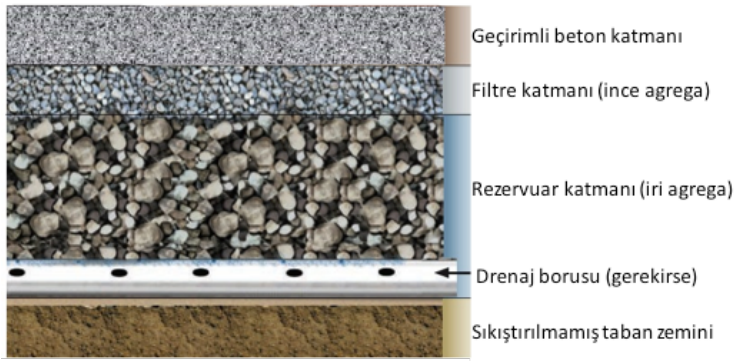
Dünya yüzeyindeki suyun dağılımı son derece dengesizdir. Yüzeydeki bu suyun yalnızca % 2.5'i tatlı suların oluşuyorken kalan % 97.5'i ise deniz ve okyanuslarda bulunan tuzlu suların ibarettir [Glecik P.H., 1993]. Tatlı suların ise % 68.7'si buzullarda, %30.1'i yeraltında bulunur ve sadece %1.2'si göllerde, nehirlerde ve bataklıklarda bulunur (Şekil 1). Dolayısıyla, Dünya'daki toplam suyun yalnızca binde sekizinin kullanılabilir tatlı su kaynaklarından ibaret

olduğu ve temiz yağmur sularını yer altı kaynaklarıyla buluşturmanın büyük bir öneme sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 1. Dünya'daki suların dağılımı [Glecik P.H., 1993]

Geçirimli beton birbirine bağlı boşluklar içerdiği için hava ve su geçirirliği sağlayan, kentsel drenaj sistemleri uygulamalarıyla sürdürülebilir tasarım ve uygulamalara yönelik çözümler üreten özel bir beton türüdür. Yağmur suyunu toplaması ve toprağa sızmasına izin vermesi nedeniyle geçirimli beton yeraltı suyunun yeniden gerikazanımı ve yağmursuyu akışını azaltmada oldukça etkilidir. Tipik bir uygulama örneği Şekil 2'de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği üzere geçirimli beton uygulaması tek bir katmandan oluşmamakta, kullanıldığı amaca göre çeşitli katmanlar içermekte ve yapılacak hidrolojik bir modellemenin gereksinimine göre tamamen geçirimli, yarı-geçirimli ve geçirimsiz olmak üzere çeşitli şekillerde tasarlanabilmektedir [Eisenberg, B., et al. 2015].



Şekil 2. Tipik bir geçirimli beton uygulaması kesiti [Eisenberg, B., v.d. 2015]

2 Geçirimli Beton Kullanım Alanları ve Üstünlükleri

Geçirimli beton sağlamış olduğu pek çok avantaj sayesinde dünyada pek çok ülkede yaygın bir şekilde kullanılmakta olup kullanıldığı alanlar şu şekilde sıralanabilir (şekil 3):

- Kaldırımlar ve yaya yolları
- Bisiklet yolları
- Otoparklar
- Yağmur bahçeleri
- şev stabilizasyonu
- Seralar
- Hidrolik yapılar
- Kaldırım kenar drenajı
- Mahmuzlar ve kıyı duvarları
- Gürültü bariyerleri
- Spor tesisleri alt yapıları
- Peyzaj düzenlemesi ve dekoratif amaçlı kullanımlar.



şekil 3. Geçirimli betonun kullanım alanları [Tennis, P.D., v.d., 2004]

Geçirimli betonun sağlamış olduğu üstünlükler genel olarak şu şekilde sıralanabilir [ÇŞB ve THBB 2018];

- Yağmur suyunu yer altı su kaynakları ile buluşturur.
Geçirimli beton, üzerine gelen yağmur suyunun kaplama altına geçişine izin vererek yer altı su kaynakları ile buluşturur. Bu sayede hem yağmur suyunun değerlendirilmesini sağlar hem de yer altı su kaynaklarını besler. Doğal su döngüsünün korunmasına yardımcı olmanın yanı sıra sel felaketleriyle mücadelede önemli katkıda bulunur.
- Yağmur suyunu filtreler.
Geçirimli beton, yağmur suyunun yapısında bulunan kirleri suyun kaplama altına geçişi esnasında filtreleyerek yer altı su kaynaklarının kirlenmesini önler ve bu sayede çevreyi korumada yardımcı olur.
- Küresel ısınma ve benzeri olumsuz etkilere karşı mücadelede kolaylık sağlar.
Geçirimli beton, sürekli olarak su geçişine izin vererek kaplama ve kaplama çevresinin sıcaklıklarının aşırı yükselmesine engel olur. Sıcaklık dengesinin korunmasına ve kentsel ısı adası etkisinin indirgenmesine katkıda bulunur. Böylece küresel ısınmayı olumsuz etkilerine karşı mücadelede eder.
- Geçirimli bir alt tabaka görevi görür.
Geçirimli beton, üzerine yapılacak herhangi bir yol üstyapı kaplaması seçeneği için geçirimli bir temel görevi görür. Bu sayede su etkisi altında şişmeye müsait zemin tiplerinde (killi zeminler vb.) yaşanan ve yol üstyapısını bozan olumsuz etkileri en aza indirerek üzerindeki üstyapının servis ömrünü uzatır.
- Maliyet etkin bir drenaj sistemi veya sulama sistemi olarak kullanılabilir.
Geçirimli beton, yağmur suyu yönetiminde gerekli olan ve suyun kontrollü bir şekilde akışına izin veren pahalı drenaj sistemleri yerine kullanılabilir. Bu sayede hem geçirimli betonun diğer avantajlarından faydalanıp hem de drenaj sistemi kurulumuna gerek olmaksızın yağmur suyu kontrolü sağlanabilir.
Aynı zamanda, geçirimli beton altına oluşturulacak geçirimsiz bir tabaka ve drenaj boruları vasıtasıyla yağmur suyunun toplanıp istenilen alanlarda (yeşil alan sulaması vb.) kullanılabilmesine olanak tanır.
- Gürültü kirliliğini azaltır.
Geçirimli beton boşluklu yapısı sayesinde diğer kaplama tiplerine göre daha fazla gürültü emilimi sağlayarak gürültü kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlar.
- Donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklıdır.
Geçirimli beton, boşluklu yapısı ve bu sayede yüzeyinde su tutmaması nedeniyle geleneksel geçirimsiz kaplamalara göre daha yüksek donma-çözülme direncine sahiptir. Bu sayede soğuk iklime sahip bölgelerde de başarılı bir performans gösterir.
- Trafik güvenliğini artırır.
Trafik kazalarının önemli nedenlerinden bir tanesi yağmurlu havalarda geçirimsiz kaplamalarda suyun drenajının istenilen düzeyde sağlanamamasından dolayı oluşan ve fren mesafesini artırarak araçların kaymasına neden olan su filmi oluşumudur. Geçirimli beton suyun etkin drenajını sağlayarak su filmi oluşumunu engeller ve bu sayede trafik güvenliğini yükseltir.
- Elektrik tasarrufu sağlar.
Geçirimli beton, tüm beton kaplamalarda olduğu gibi doğal olarak açık yüzey rengine sahiptir. Bu sayede karanlıkta aydınlatma ihtiyacını azaltarak elektrik tasarrufu sağlar.

2.1. Geçirimli Beton Bileşenleri ve Özellikleri

Geçirimli beton üretiminde geleneksel beton ile aynı malzemeler kullanılmakta olup, bir istisna olarak ince agregalar genellikle kullanılmamaktadır. Böylece agregalar arasında boşluk kalmakta ve bu da kendisinden beklendiği üzere suyun geçişine izin vermektedir. Ancak bu durum betonun karıştırılması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması aşamalarında bazı zorluklar yaratmakta ve geleneksel betona kıyasla çok daha özen gerektirmektedir. Tipik geçirimli beton bileşen ve oranları aşağıdaki tabloda bilgi vermek amacıyla paylaşılmıştır. Gerçek oranlar ve karışım tasarımı geçirimli betondan beklenen performansa göre belirlenmelidir.

Tablo 1. Tipik Geçirimli Beton Bileşen ve Oranları [Tennis, P.D., v.d., 2004]

	Bileşen Miktarı (kg/m³)
Bağlayıcı Malzemeler	270-415
Agregalar	1190-1480
Su/Çimento Oranı	0.27 – 0.34
Agrega:Bağlayıcı (kütlece)	4:1 – 4.5:1
İnce Agregalar:İri Agregalar (kütlece)	0:1 – 1:1

Geçirimli beton genellikle oldukça düşük bir kıvamına sahip olup slump değeri 20 mm'nin altındadır. Daha yüksek kıvamlarda çimento şerbeti agregalardan ayrışmakta ve alt katmanda birikerek geçirimsizliği olumsuz olarak etkilemektedir. Sertleşmiş özellikler bakımından geçirimli betonun birim hacim ağırlığı genellikle 1600-2000 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu şekilde üretilmiş bir geçirimli betonun basınç dayanımı ise genellikle 3.5 MPa ile 28 MPa arasında kalmaktadır. Geçirimli betondan beklenen bir başka performans göstergesi ise su geçirimsizliği olup 0.2 cm/s ile 0.54 cm/s arasında değişmektedir [Tennis, P.D., v.d., 2004]. Bu durumda geçirimli betonun her bir metrekaresinden geçen su miktarı dakikada 120 ile 320 litre arasında olmaktadır. Elbette betonun basınç dayanımı arttıkça geçirimsizliği düşmektedir.

Geçirimli betonda gelişen rötre genellikle geleneksel betona göre hızlı ancak düşük seviyede olmaktadır. Karışım tasarımına göre değişebilecek olan rötre miktarı üzerine çok fazla bir araştırma olmamakla birlikte 200×10^{-6} seviyelerinde ölçüldüğü çalışmalar mevcuttur [Malhotra, 1976]. Geçirimli betonun donma/çözülme çevrimlerine karşı performansı betondaki doygunluk durumuyla ilişkilidir. Betonun boşlukları tamamen suyla dolduğunda zayıf dayanıma sahip bir geçirimli betonun çok çabuk bozulacağı düşünülse de, pratik olarak bu derece büyük boşlukların tamamen suyla dolup doygunluk derecesinin üst sınırına ulaşması oldukça zordur. Yine hızlandırılmış deney yöntemleri yerine yavaş donma/çözülme çevrimlerine tabi tutulmuş geçirimli betonların performanslarının daha yüksek olduğu bildirilmiştir [Neithalath, 2003]. ABD'de de kar yağışının olduğu yerlerde 10 yılı aşkın süreyle iyi performans göstermiş geçirimli beton uygulamalarının olduğu bilinmektedir [Tennis, P.D., v.d., 2004].

2.2. Geçirimli Beton Tasarımı

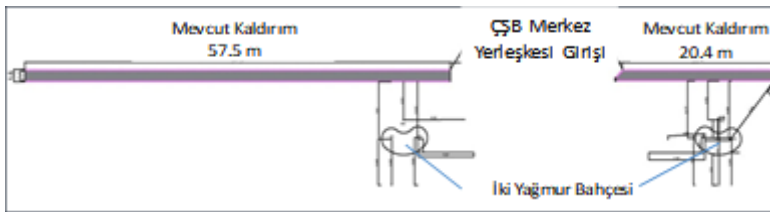
Geçirimli beton üstyapıların tasarımı, her şeyden önce amaca uygun olmalıdır. Beton dayanım ve geçirimsizlik özelliklerinin yanında, geçirimli beton altında yer alacak tabakaların mühendislik özellikleri, çevre ve iklim koşulları ile drenaj detayları, yük ve malzeme seçimi tasarımı dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardır.

Öte yandan geçirimli beton üstyapılarının tasarım kalınlığını iki faktör belirler: su geçirimsizliği ve boşluk hacmi gibi hidrolik özellikler ile dayanım ve rijitlik gibi mekanik özellikler. Dolayısıyla, herhangi bir yol üstyapısı sistemlerinde kullanılması durumunda geçirimli beton, amaçlanan trafik yükünü desteklemek ve sahaya özel yağmur suyu yönetimi stratejisine olumlu katkıda bulunmak için tasarlanmalıdır ayrı ayrı tasarlanmalıdır.

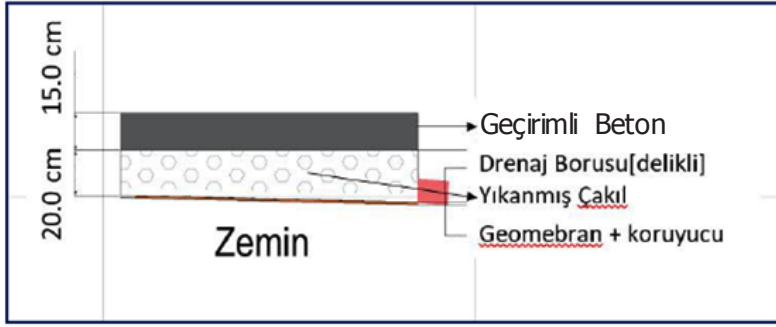
3 Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesi Uygulaması

Geçirimli beton uygulaması tüm dünyada yaygın şekilde kullanılmasına rağmen ülkemizde henüz yaygın bir kullanım alanına sahip değildir. Ülkemizde geçirimli beton uygulamasının tanıtılması ve yerel yönetimler başta olmak üzere tüm kamu/özel sektör kurum ve kuruluşlarına örnek olması amacıyla 2018 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesinde bir geçirimli beton örnek uygulaması yapılmıştır. Uygulama, çevreyi ön plana çıkaran ve doğal kaynakların en verimli şekilde kullanımı fikrini vurgulayan konsept bir proje olarak hayata geçirilmiştir. Projede, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesinde iki adet yağmur bahçesi ve bu bahçelerin yağmur suları ile sulanmasını sağlayan geçirimli beton ile yapılmış kaldırımlara yer verilmiştir. Projenin amacı geçirimli beton üst yapısı ile yapılan kaldırımlara düşen yağmur sularının, geçirimli beton altındaki geçirimsiz tabaka sayesinde drenaj boruları vasıtasıyla toplanıp yağmur bahçesini beslemesidir. Bu sayede hem doğal su döngüsü korunmuş olacak hem de yağmur suları değerlendirilerek yağmur bahçesi sulanacaktır.

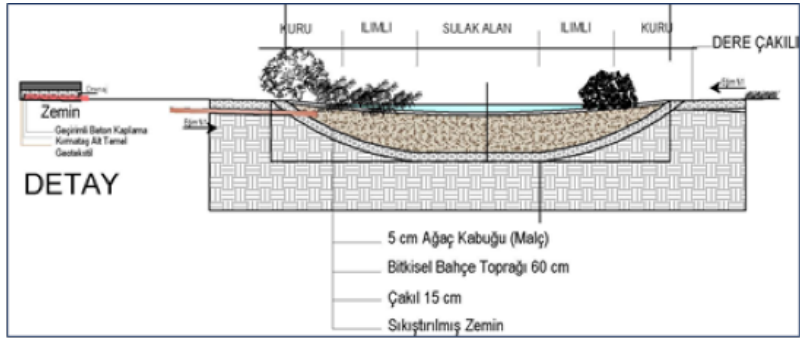
Proje kapsamında mevcut durumda var olan andezit taş kaldırım sökülüp yerine geçirimli beton uygulaması yapılmıştır. Geçirimli beton üstyapıya ait kesit ve tabaka kalınlıkları aşağıda verilmektedir.



Şekil 4. Yağmur Bahçesi ve Geçirimli Beton Yerleşim Planı



Şekil 5. Geçirimli beton üst yapı tabaka kalınlıkları ve kesiti



Şekil 6. Proje detayı

Proje kapsamında yapılacak olan geçirimsiz beton üst yapısı için üç farklı beton karışımı denenmiş olup, yapılan bazı testler sonucunda uygulanacak karışıma karar verilmiştir. Kullanılan karışıma ilişkin veriler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Tablodan da görüleceği üzere betonun 28 günlük basınç dayanımı 19 MPa olarak tespit edilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan Geçirimli Beton Karışımı ve Özellikleri

	Bileşen miktarı (kg/m³)
Çimento (CEM I 42.5R)	300
Su	75
İri agrega (4-12 mm)	1610
<i>Sertleşmiş Özellikleri</i>	
Kuru Birim Ağırlık (kg/m³)	1780
Basınç Dayanım (MPa)	
1 gün	4.2
3 gün	10.5
7 gün	15.6
28 gün	18.9
Boşluk Oranı (%)	21.2

Uygulama aşamasında yapılan işlemler aşağıda verilmektedir (Şekil 7-10).

- Mevcut kaldırımın 40 cm sökülerek, hafriyat sahasına nakledilmesi
- Geçirimli beton üstyapı tabanının tesviyesi ve eğimlerinin verilmesi,
- Tabana tesviye betonunun atılması
- Geçirimsiz bitüm esaslı membranın serilmesi, ek yerlerinin yapılması
- Membran koruyucu tabakanın yerleştirilmesi
- Delikli drenaj borusunun yerleştirilmesi
- Yıkanmış elenmiş çakıl ile temelin serilmesi ve rezervuar yapımı
- Derz plakalarının yerleştirilmesi ve sabitlenmesi
- Geçirimli betonun serilmesi ve sıkıştırılması
- Geçirimli betonun kuru
- Geçirimli beton yüzeyine cila uygulanması



Şekil 7. Geçirimli beton uygulaması öncesinde yapılan işlemler



Şekil 8. Geçirimli beton uygulamasından genel bir görünüm



(a) İri agrega ile temel ve rezervuar katmanı yapımı



(b) Derz plakalarının yerleştirilmesi ve sabitlenmesi



(d) Betonun silindir master ile yüzeyinin düzeltilmesi



(c) Geçirimli betonun serilmesi ve titreşimli master ile sıkıştırılması



(e) Plastik bir örtü ile betonun bakımının yapılması

şekil 9. Geçirimli beton uygulama aşamalarından görünüm



şekil 10. Uygulama sonrası görünüm

4 Değerlendirme, Sonuç ve Öneriler

Geçirimli beton uygulaması, doğal su döngüsünü koruyan, yağmur sularını yer altı su kaynaklarıyla buluşturan, erozyon ve sel felaketleriyle mücadeleye katkıda bulunan çevreci bir beton uygulamasıdır. Ülkemizde her gün artan bir hızla inşalarına devam edilen Millet Bahçeleri, kaldırımlar, bisiklet ve yaya yolları gibi alanlarda geçirimli beton uygulaması tercih edilebilir ve bu sayede sağlamış olduğu tüm avantajlardan faydalanılabilir. Ülkemizde henüz çok yaygın olmamakla birlikte Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yapılan örnek uygulamanın yanı sıra Denizli Büyükşehir Belediyesi bu uygulamada öncü kurumların başında gelmektedir. 2014 yılından bu yana farklı üst yapı tipleriyle (beton kilitli parke taşı vb.) kombine şekilde de yapılan uygulamalar tüm kurumlara örnek teşkil etmektedir. Deneme uygulamasına ek olarak, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı geçirimli beton uygulamasının teknik altyapısını oluşturmak amacıyla 2018 yılında “Geçirimli Beton Uygulama Kılavuzu” yayını çıkarmış ve bu kılavuzda geçirimli betona dair karışım-kalınlık tasarımları, uygulama teknikleri, kalite kontrol testleri gibi pek çok konuda bilgilere yer vermiştir.

5 Kaynaklar

- Gleick, P.H. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Freshwater Resources*, Oxford University Press, UK.
- Eisenberg, B., Lindow, K.C. and Smith, D.R. (2015). *Permeable Pavements*. The American Society of Civil Engineers, Virginia, USA.
- Tennis, P.D., Leming, M.L., and Akers, D.J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*, Portland Cement Association, USA
- Malhotra, V. M., “No-Fines Concrete — Its Properties and Applications,” *ACI Journal*, November 1976, pages 628 to 644.
- Neithalath, N., *Development and Characterization of Acoustically Efficient Cementitious Materials*, Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2003, 242 pages.
- Marks, A. (2018). *Pervious Concrete Pavement*. Puget Sound Concrete Specification Council
- Nassiri, S. (2018). *Mechanistic Thickness Design of Pervious Concrete Pavements*. International Society for Concrete Pavements
- Federal Highway Administration (2012). *Pervious Concrete*. FHWA-HIF Tech Brief-13-006
- California Department of Transportation Division of Design Office of Storm Water Management (2013). *Pervious Pavement Design Guidance*. Caltrans Storm Water Quality Handbook
- Michigan Concrete Association (2017). *Michigan Specifiers' Guide for Pervious Concrete Pavement With Detention*.
- Colorado Ready Mixed Concrete Association. *Specifier's Guide for Pervious Concrete Pavement Design*
- ÇŞB ve THBB (2018). *Geçirimli Beton Uygulama Kıl*

Doğu Karadeniz Bölgesindeki Beton Yollarının Düşey Deplasmanlarının Hızlandırılmış Yol Testinde İncelenmesi

Dr. Muhammet Çelik¹, Dr. Mehmet Tefvik Seferoğlu², Prof. Dr. Muhammet Vefa Akpınar²

¹Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Trabzon, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Trabzon, Türkiye

Özet

Dünya genelinde Beton yol asfalt kaplamanın ciddi bir alternatifi olarak bilindiği halde Türkiye’de beton yol ağı, asfalt kaplamalı yollara oranla oldukça düşük seviyelerdedir. Buna rağmen özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi mahalle ve köy yollarında beton yol, diğer bölgelere nazaran daha fazla kullanılmaktadır. Ancak özellikle uygulama sahasında teknik personelde tecrübesizlik nedeniyle beton yollarda çeşitli imalat hataları ve hasarlar ortaya çıkmaktadır. Oysa beton yolun davranışı ile ilgili bilgi birikimi bu hataların oluşmasını en alt seviyede tutacaktır. Bu çalışma genelinde Türkiye’de en uzun beton yol ağına sahip bölgesi olan Doğu Karadeniz Bölgesindeki beton yollar incelenmiş elde edilen veriler ışığında beton yol çeşitleri tespit edilmiştir. Daha sonra Hızlandırılmış Yol Testi Tesisinde bu yollar modellenerek yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu yükleme sırasında farklı tipteki beton yollarda oluşan düşey deplasmanlar incelenmiştir. İnceleme neticesinde elde edilen veriler beton yollarda çeşitli sıkıntılarının kaynağı olan düşey deplasman hakkında bilgi elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Hızlandırılmış Yol Testi, Beton Yollar, Yansıma Çatlakları, Düşey Deplasman, Kaplama Hasarları

1 Giriş ve Literatür

Doğu Karadeniz Bölgesi Türkiye’nin en fazla yağış alan bölgesidir (Bahadır ve Özdemir, 2011). Ayrıca topografyası eğimli ve engebelidir (Güçlü, 2010). Bu durum iki önemli sıkıntıyı beraberine getirmiştir. Birinci sıkıntı yol ağının çok fazla olması (URL-1) ikincisi ise yol üst yapı kaplama tipinin diğer bölgelere nazaran daha kısa sürede hasara maruz kalmasıdır. Bu sıkıntılar bölgede bulunan idareci ve teknik personelini ulaşım yapılarında uzun ömürlü

imalatlar arayışına itmiştir. Bu arayışlar neticesinde seksenli yılların başlarından itibaren beton yol yapımını başlatılmıştır. (Daha önce bölgede birkaç noktada NATO tarafından yapılmış beton yollar mevcuttur ancak bu yollar km olarak fazla bir yekûn tutmamaktadır.) Bölgede yapılan beton yollar incelendiğinde ise farklı tiplerde beton yol uygulamalarına rastlanılmaktadır. Zira bölgede iller hatta ilçeler arasında teknik özellikler bakımından farklı birçok beton yol yapılmıştır. Bu farklılıklar tasarım gereği oluşan farklılıklar olmadığı, dönemin asgari şartlarını sağlamak ve az malzeme ile daha uzun yol yapmak için yapılan imalat eksikliklerinden kaynaklandığı görülmüştür. Özellikle eksik dozaj ve kırılmamış dere agregası kullanımı ile az olan kaynaklar ile daha uzun yol yapımı sağlandığı tespit edilmiştir (Çelik ve Akpınar, 2015).

Tasarımı ve işçiliği iyi olan rijit kaplamalar uzun yıllar, bakım onarım ihtiyacı duymadan hizmet verebilmektedir (plaklar arasındaki derzlere koyulan derz dolgu malzemelerinin yenilenmesi hariç) (Tunç, 2004; Ağar vd., 1998). Rijit kaplamaların mukavemet değerleri her ne kadar esnek kaplamaların değerlerine göre yüksek olsa da yapıldığı andan itibaren çeşitli nedenlerden dolayı hasar oluşturabilecek gerilmeler ve deformasyonlar oluşabilmektedir (Tunç, 2004; Kozak, 2011; Ecevit, 2007). Bu deformasyonların ve gerilmelerin temel kaynakları şunlardır;

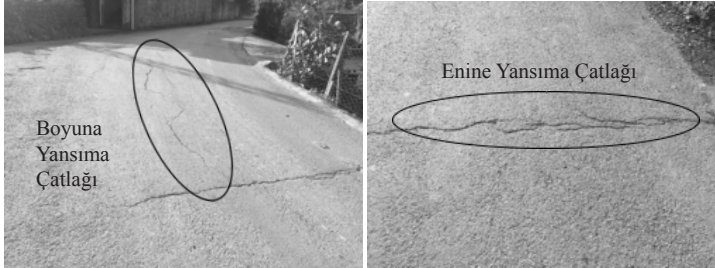
- Kötü tasarım, kötü imalat (işçilik)
- Kullanılan malzemelerde teknik yetersizlikler
- Kullanılan malzemelerin özelliklerinin iyi bilinmemesi
- Trafik Yükleri (Tekerlek yükleri ve lastik basınçları)
- Tekerler arası mesafe
- Teker yüklerinin plak üzerindeki konumu
- Zemin reaksiyonu
- Çevresel etkenler, donma çözülme bozulmaları
- Kimyasal bozulmalar, tuzlama çalışmaları ve diğer etkenler (Puyan, 2003; Bolat vd., 2010; FHWA, 2007).

Doğu Karadeniz Bölgesinde yapılan çalışmalar sırasında tespit edilmiş çeşitli hasarlardan birkaçını örnek olması için aşağıda incelenmiştir. Buna göre Bölgede en sık rastlanan hasar tiplerinden biri boyuna çatlaklardır. Boyuna çatlaklar trafik yönü boyunca oluşan, derzlere dik çatlaklardır. Boyuna çatlaklar belirli bir genişliğe ulaşana kadar yol performansını fazla etkilemezler (Tunç, 2004). Şekil 1'de görülen boyuna çatlaklar birçok nedenden kaynaklanabilir. Donmadan kaynaklı kabarmalar, zeminin şişmesi, iyi sıkışmaması veya homojen yapıda olmaması boyuna çatlaklara neden olabilir. Geniş yollarda yeterli boyuna derz yapılmaması veya boyuna derzlerin donatı ile aşırı güçlü yapılması boyuna çatlaklara neden olabilir (Tunç, 2004; FHWA, 2007). Boyuna çatlaklara benzer nedenlerden dolayı enine çatlaklar da oluşabilir. Enine çatlaklar genellikle derz bölgelerine yakın yerlerde, döşeme kalınlığının lokal azaldığı veya çeşitli nedenlerden dolayı beton altında temel malzemesinin eksildiği yerlerde görülebilir.



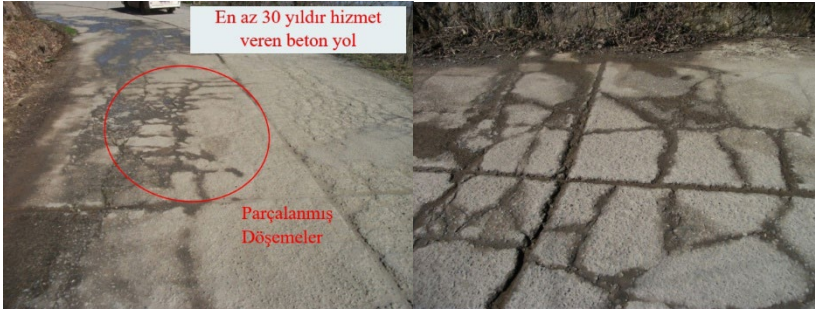
Şekil 1. Trabzon Bulak Mahallesinde beton yollarda boyuna çatlaklar.

Boyuna ve enine çatlaklara önlem alınmadan beton kaplamaların üzerine iyileştirme amaçlı asfalt kaplama yapılması durumunda altta bulunan çatlak yansımaya çatlağı olarak asfalt üzerine çıkmaktadır (Buttlar, 2009). Bölgede uzun yıllar boyunca kullanılmış (yaklaşık 20-30 yıl ve üstü) beton yollarda asfalt kaplama ile iyileştirme çalışması oldukça sık yapılmaktadır (Çelik, 2019), bu çalışmalarda aşağıda Şekil 2’de görüldüğü gibi yansımaya çatlakları oluşmaktadır.



Şekil 2. Beşikdüzü Akköse Mahallesinde yansımaya çatlakları.

Bölgede sık rastlanan diğer bir hasar türü de, parçalanmış döşeme hasarlarıdır. Enine ve boyuna çeşitli çatlakların beraber görüldüğü ve bu nedenle beton plağın birkaç parçaya ayrıldığı hasar tipidir. Bu hasar tipinin birçok nedeni vardır. Ancak en sık görülenler aşırı yükleme veya döşeme kalınlığının az olmasıdır. Bölgede beton yol imalatını daha uzun yapabilmek için özellikle kalınlıkta yapılan inceltmeler bu hasarın çok fazla rastlanmasına neden olmaktadır. Şekil 3’de beton yol üzerinde parçalanmış döşeme çatlakları görülmektedir, bu yolda beton kaplama kalınlığı 14 cm olarak ölçülmüştür (Çelik ve Akpınar, 2015).



Şekil 3. Ortahisar Kavala Mah. parçalanmış döşeme, enine ve boyuna çatlaklar.

Bölgede drenaj eksiklikleri nedeniyle de sık sık hasarlar olduğu tespit edilmiştir. Drenaj eksikliği hasarları bütün üstyapı türlerini etkilemektedir. Hatta beton yollar bu eksiklikten dolayı en az etkilenen kaplama tipi denilebilir. Ancak yağışlar beton yollarda da farklı şekillerde hasar tiplerine neden olmaktadır. Yağan yağışlar doğru bir yöntem ile ortamdan uzaklaştırılmadığında Şekil 4’de görüldüğü gibi eğimli arazilerde temel ve alttemellerde çökmelere neden olmaktadır. Bu çökmeler kaplamaların parçalanmasına neden olmaktadır. Birçok yerde beton yolların alt şevinde oluşan akmalarda, beton yolun en azından tamir olana kadar fırsat verdiği de tespit edilmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi beton yol altında oluşan kopmalardan sonra beton yol yerinde kırış gibi çalışmaya devam etmekte ve kısa sürede tamir edilirse ayrıca bir kaplama imalatına gerek duyulmadan trafiğin açılmasını sağlamaktadır. Bu tarz yollarda önlem alınmaması durumunda altında yük iletimi sağlanacak tabaka olmaması çekme gerilmeleri oluşturmakta ve bu gerilmeler yorulma çatlaklarına dolayısıyla kaplamanın bozulmasına neden olmaktadır (Özcanan ve Akpınar 2014).



Şekil 4. Dernekpazarı Zincirlitaş mahallesinde oturmaldardan kaynaklı hasarlar.



Şekil 5. Trabzon'da çeşitli mevkilerde yağışlar sonrası oluşan beton yollarda alt şev kayması ve beton kaplamanın kısa sürede tamir olana kadar bu kaymalardan oluşabilecek hasarları tolere etmesi

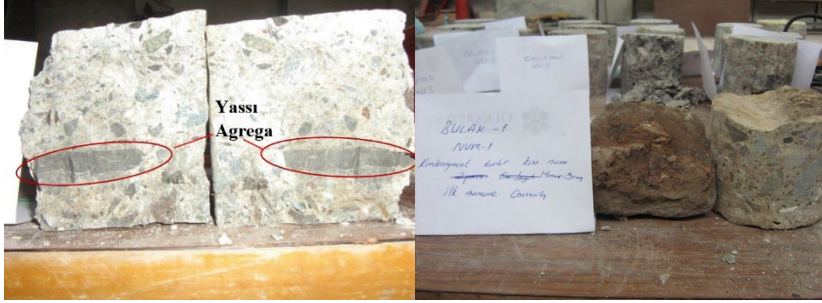
Esnek veya rijit kaplamalı yollarda yol kenarı hendeği bulunmadığında veya hendek gibi drenaj yapılarında oluşan tıkanmalarda su yol kaplaması üzerinde akmakta ve yollar açık kasis gibi çalışarak suyun üzerinden aktığı dereler haline gelmektedir. Yol üstünde toplanan bu tarzda sular rastgele insanların ev veya bahçelerine doğru döndüğünde ise büyük hasarlara neden olmaktadır. Ayrıca yol kaplaması üzerinde akan sular şekilde görüldüğü gibi çeşitli çukur veya kopmalara neden olmaktadır. Beton yollarda kısmen daha az oluşan bu hasar, asfalt kaplamalarda veya beton üstü asfalt kaplamalarda daha büyük sorunlar oluşturmaktadır. Zira asfalt tabakaları arasına giren su asfaltta çeşitli hasar tiplerine neden olmaktadır.



Şekil 6. Çeşitli ilçelerde beton yollar üzerinden akan suyun verdiği hasar. Fotoğrafın ikinci kısmında beton ile asfalt arasına giren suyun oluşturduğu hasar görülmektedir.

Bölgede bulunan yollardan ve alınan numuneler incelendiğinde işçilik ve malzeme kusurları da oldukça sık rastlanıldığı görülmüştür. Özellikle düşük dozaj çimento kullanımı, kırılmamış dere agregası kullanımı, kötü agrega seçimi gibi istenilmeyen özelliklerde beton üretimi ve bunun neticesinde kötü beton yol kaplamaları yollarda oldukça sık rastlanılmaktadır. Aşağıda Şekil 7'de yollarından alınan iki numune görülmektedir. Birinci numune yassı agrega ikinci

numune de ise beton içerisine girmiş kil malzemeleri dikkat çekmektedir. Bu örneklerin çok daha fazlası önceki çalışmalarda detaylı verilmiştir (Çelik ve Akpınar, 2015).



Şekil 7. Numunelerde görülen yassı agrega ve killi malzemeler.

Literatürde beton yollarda kullanılacak agrega granülometresi, diğer beton kullanımlarına göre daha kaba olmasının faydasından bahsedilmektedir (Ağar vd., 1998) Ancak bölgede yapılan bazı beton yollardan Şekil 8’de görüldüğü gibi insan yumruğundan daha büyük agregalar kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu agregaların kırılmamış yani yüzeyi pürüzlendirilmemiş dere taşı olması nedeniyle çimento ile yeterince bağ sağlamaması çeşitli çatlakların oluşmasına neden olduğu görülmüştür.

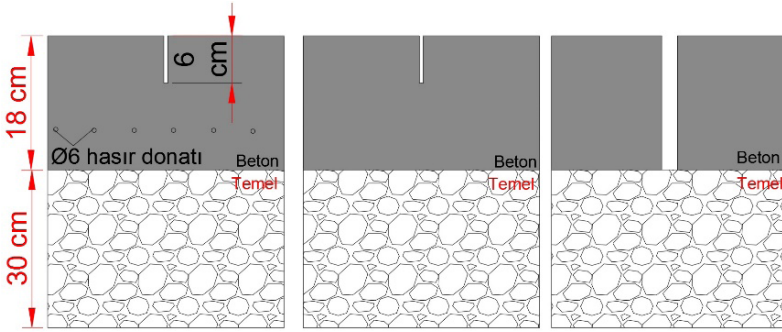


Şekil 8. Of ilçesinde hasarlardan dolayı sökülmiş beton yollarda kaba agregalar.

2 Yöntem

Doğu Karadeniz Bölgesinde beton yolların genel bir değerlendirilmesi yapıldığında, yollarda dozaj eksikliği, kalınlık yetersizliği, derz uygulamalarının doğru yapılmaması, yanlış agrega seçimleri gibi çeşitli nedenlerden dolayı birçok hasar tespit edilmiştir. Buna rağmen bölgede beton yollar en az 30 yıldır hizmet verdiği görülmüştür. Beton yolların davranış hakkında daha fazla bilgiye sahip olunmasının beton yol tecrübelerinin artırılması için faydalı olacaktır. Bu nedenle beton yolların yüklemeler sırasında düşeyde yaptığı deplasmanın bilinmesinin

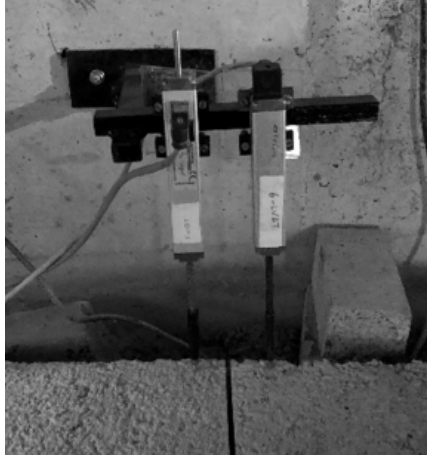
bazı hasarların da nedeninin anlaşılması sağlayacağı düşünülmüştür. Bu nedenler Karadeniz Teknik Üniversitesi Bünyesinde bulunan Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) tesisinde, bölgede kullanılan beton yolların özelliklere göre Şekil 9’da detayı verildiği gibi 3 farklı modeli oluşturulmuş ve yüklemeye tabi tutulmuştur. Her bir model iki beton plaktan oluşmaktadır. Beton plakların her biri 2*2 m boyutlarına sahiptir. Bütün modeller bir biri ile iletişimi olmayacak şekilde hazırlanmıştır. Birinci model tam derz ile ayrılmış iki plaktan, ikinci model yarım derz ile ayrılmış iki plaktan ve son model ise yarım derz ile ayrılmış ancak arasına bir sıra Ø6 hasır donatı yerleştirilmiş 2 plaktan oluşmaktadır. Beton kalınlığı olarak 18 cm seçilmiştir. Bu bölgede en sık tespit edilen beton kaplama kalınlığıdır. Yarım derzler beton plak kalınlığının 1/3’ü kadar yani 6 cm olarak kesilmiştir. Tam derz ise 2 cm aralık olacak şekilde oluşturulmuştur. Beton plağın altında ise 30 cm temel malzemesi bulunmaktadır.



Şekil 9. Bölgenin yollarına göre modellenmiş deney düzenekleri.

Her model için HYT tesisinde hazırlanan plaklar üzerinde yükleme deneyi yapılmıştır. Yükleme deneyinde plaklar üzerinden 20 kez yük geçmiştir. Plakların derzlerinin sağına ve soluna Şekil 10’da görüldüğü gibi düşey deplasman ölçerler (LVDT’ler) yerleştirilmiştir. Yük geçerken LVDT’lerde oluşan düşey deplasman verileri veri toplayıcılar tarafından toplanılmıştır. LVDT’ler, milimetrenin 100’de biri hassasiyette düşey (yerleştirildikleri yönde) mesafe ölçmektedir. Bu deney kapsamında OPKON markasına ait, LPS 150 D 10K model LVDT kullanılmıştır. Bu model LVDT -20 ° C’den +80 ° C aralığında 150 mm’ye kadar yüz milyon hareketi ölçme kapasitesine sahiptir. Derzin sağında ve solunda bulunan LVDT’ler birbirine göreceli ölçüm alabilmesi için aynı profil üzerine yerleştirilmiştir. Böylelikle her derzde iki ayrı LVDT tarafından düşey deplasman ölçümü yapılmıştır. Profillerde perde duvara ankastre şekilde sabitlenmiştir.

Yükler beton plakta Şekil 11’de görüldüğü gibi tek tekerde 32 kN olmak üzere 2 tekerlekte toplamda 64 kN olarak uygulanmıştır ve yükleme hızı 3 km/saat olarak ayarlanmıştır. Yarım dingilde 64 kN Türkiye’de trafikte izin verilen yasal dingil yükünden fazladır. Ancak deplasman oluşumunu karşılaştırabilmek için yüksek değerler okunmasının daha iyi olacağı düşünüldüğünden bu yük seçilmiştir. Ayrıca yükleme 3 km/saat gibi yavaş bir hızla yüklenmiştir. Böylelikle LVDT’lerin okumaları daha doğru olacağı düşünülmüştür.



Şekil 10. Düşey deplasmanı ölçen LVDT'ler



Şekil 11. Yükleme tekerlekleri, LVDT'ler ve beton plaklar

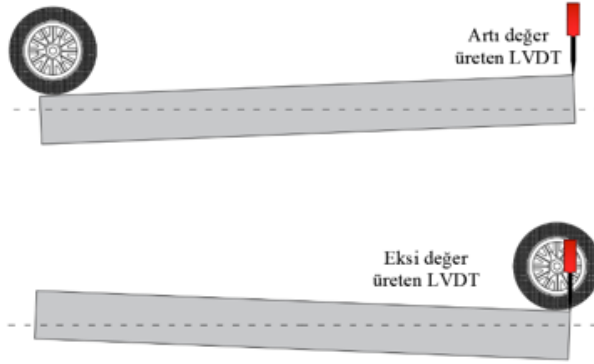
3 Bulgular

Yükleme yapıldıktan sonrasında yukarıda detayı verilen 3 farklı beton plakta derz kesim noktalarında bulunan LVDT'lerden ölçülen değerler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo'da LVDT değerleri eksi ve artı olarak görülmektedir. Plakların yüksüz haline göre kalkması artı değerler, batması ise eksi değerleri oluşturmaktadır. Plagın toplam yaptığı hareket ise batma ve kalkma arasında oluşan mesafedir tabloda bu mesafe fark olarak verilmiştir. Derzin sağında ve solunda bulunan LVDT'lerin ortalama değerlerini de ortalama fark olarak verilmiştir. Farklı beton plak modelleri arasında karşılaştırmalar ortalama fark değerlerine göre yapılmıştır.

Tablo 1. Yükleme nedeniyle plakta oluşan düşey deplasmanlar.

LVDT'nin bulunduğu Plak	Pozitif değer	Negatif Değer	Fark (mm)	Ortalama Fark (mm)
Hasır donatılı plak 1. LVDT	0,379	-0,027	0,406	0,402
Hasır donatılı plak 2. LVDT	0,357	-0,042	0,399	
Donatısız Yarım Derzli plak 1. LVDT	0,451	-0,438	0,889	0,843
Donatısız Yarım Derzli plak 2. LVDT	0,413	-0,384	0,797	
Donatısız Tam Derzli plak 1. LVDT	0,167	-1,237	1,404	1,827
Donatısız Tam Derzli plak 2. LVDT	0,861	-1,389	2,25	

- Şekil 12'de görüldüğü gibi tekerlekler LVDT'nin bulunduğu köşenin zıt yönündeyken plağın tekerlek bulunan köşesi batmakta LVDT bulunan köşesi ise kalkmaktadır. Aynı şekilde tekerlek diğer köşeye geldiğinde bu işlemin zıttı yaşanmaktadır. Arazide özellikle temel malzemesinin güçlü olmadığı veya eğimli arazilerde yağışlar nedeniyle temel boşalması olduğu derzli plaklarda benzer hareketler oluşmaktadır. Bu hareketler pompaj ve derz yakınında kırılmalara neden olmaktadır, ayrıca ileride yapılacak olan iyileştirme çalışmalarında yansıma çatlaklarına bu hareket nedeniyle oluşmaktadır.

**Şekil 12.** Tekerleğin bulunduğu yere göre LVDT değerleri

- Plakta tek sıra hasır donatı bulunması durumunda aynı derz tipine sahip (Yarım derz) plaklarda oluşan düşey deplasman farkını yaklaşık 2 kat azaltmıştır. Bir başka deyişle plaklarda hasır donatı olması 2 kat daha az ortalama düşey deplasman farkı oluşmasına neden olmaktadır.
- Tablo irdelendiğinde yarım derzli plaklarda deplasman farklarının tam derze oluşan deplasman farkının ortalamasından 2,25 kat daha azdır. Yani tam derzlerde plak yarım derzler göre 2,25 kat daha fazla düşey deplasman yapmaktadır. Hasır donatılı derzlerde ise bu fark 4,5 kat civarında olmaktadır.

- Hasır donatılı plaklarda eksi yöne yani zemine doğru deplasman oluşumu oldukça az olmasını sağlarken, donatısız yarım derzlerde, hasır donatılı yarım derzlere göre yaklaşık 12 kat, donatısız tam derzler ise 40 kattan fazla düşey yönde zemine doğru deplasman olmaktadır. Bu durumda tam derzli plaklarda zeminin önemi daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

4 Sonuçlar ve Öneriler

Türkiye’de beton yollar en az 30-35 yıldır kullanılmaktadır. Ancak bu yolların neredeyse tamamı belirli bir teknik şartnameye göre yapılmadığından birçok sıkıntılar beraberinde gelmiştir. Bu sıkıntıların temelinde, uygulamayı yapan teknik personel ve işçilerin beton yollar hakkında tecrübesizliği olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle Karadeniz Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Türkiye’nin ilk ve tek tam ölçekli Hızlandırılmış Yol Testi tesisinde beton yollarda çeşitli hasarlara neden olan düşey yönde deplasman hareketi hakkında bilgi toplanılması için deney yapılmıştır. Deneilerde Türkiye’de en fazla beton yol ağı olan Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan beton yollara göre modeller hazırlanmıştır. Buna göre 2 plaktan oluşan ve bir birinden bağımsız olan 3 model beton plak imal edilmiştir. Bu plaklardan birincisi yarım derzli ikincisi yarım derzli ve tek sıra hasır donatılı sonuncusu ise tam derzli olarak seçilmiştir. Yarım dingilde çift tekerlekle 64 kN yük uygulanmış ve yaklaşık 20 yüklemede oluşan deplasmanlar düşey deplasman ölçerler ile ölçülmüştür. Sonuçlara göre hasır donatılı yarım derzler ortalama oluşan düşey deplasman hareketi 0,402 mm mertebelerindeyken, donatısız yarım derzlerde 2 kat daha fazla hareket oluşmuş ve düşey ortalama düşey deplasman farkı 0,843 mm mertebelerine ulaşmıştır, donatısız tam derzde ise bu fark yaklaşık 4,5 kat olup 1,827 mm kadar ortalama düşey deplasman farkı oluşturduğu görülmüştür.

Asfalt kaplama ile ilgili tecrübe ve şartnameler oldukça fazla olduğu halde beton yollar hakkında genel bir teknik şartname ülkemizde daha yeni bir tarihte oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra uygulamada halen daha büyük bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Bu bilgi eksikliği 3 ay gibi kısa sürede en az 10 yıllık yüklemelerin yapılabildiği HYT tesisinde yapılacak çalışmalar ile doldurulabilir (Metcalf, 1996). Bu nedenle HYT tesisinde daha fazla deney yapılmasının oldukça önemli olduğu düşünülmekte ve bu tarz çalışmaların artırılması gerektiği tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaların hayata geçirilmesinde gerekli maddi destek 217M481 numaralı TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından sağlanmıştır. Katkılarından ötürü teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Ağar, E., Sütas, İ. ve Öztaş, G., Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1998.
- Bahadır, M. ve Özdemir, M. A., “Trabzon ve Rize’de Yağışın Mevsimsel Değişimlerinin Marginal ve Matrix Yöntemleri ile Belirlenmesi ve Trend Analizleri”, Uluslararası Sosyal Araştırma Dergisi, Cilt 4, Sayı 17, 2011.
- Bolat, H., Subaşı, S., Çullu, M. ve Akkaya, U., Beton yolları Bekleyen Tehlikeler, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6, 1 (2010) 30-37.
- Buttlar, W., Dempsey, B., ve Bozkurt D., Evaluation of Reflective Crack Control Policy, Report No. ITRC FR 95/96-4, Final Report, Illinois Department of Transportation, , Illinois, 1999.
- Çelik, M., Akpınar, M.V., «Uzun Süre Hizmet Veren Beton Yol Kaplamalarının Temel Malzemesi Olarak Yerinde Yeniden Kullanılması: Doğu Karadeniz Bölgesi Uygulamaları” 9. Beton Kongresi Antalya, 2015.
- Çelik M., “İşlevsel Hasarlı Beton Yollarda Asfalt Takviye Tabakası Kullanımının Mekanistik Ampirik Yöntemlerle Araştırılması” Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon 2019
- Ecevit, O., Karayollarında Rijit Üstyapı Uygulamaları ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- FHWA, Amerika Ulaştırma Bakanlığı Federal Karayolu İdaresi, Beton Yollar İçin Bütünleşik Malzeme ve Yapım Uygulamaları, Washington D.C., 2007.
- Güçlü Y., “Doğu Karadeniz Bölümü Kıyı Kuşağında İklim Konforu Şartlarının Kıyı Turizmi Yönünden İncelenmesi” Coğrafi Bilimler Dergisi CBD 8 (2), 111-136, 2010.
- Kozak, M., Beton Yollar ve Beton Yol Yapımının Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 1, 89-99 2011.
- Metcalf, J., B., The Application of Full Scale Accelerated Pavement Testing, NCHRP Synthesis 235, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 1996.
- Puyan, M., S., Beton Yollarda Çatlak Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2003.
- Özcanan, S., Akpınar M.V., Esnek Üstyapılarda Kritik Tekerlek ve Aks Konfigürasyonların Mekanistik Analizlere Göre Tespit Edilmesi, İMO Teknik Dergi, 6625-6654, 2014.
- URL-1 TUIK, Köy Yolları Hakkında İstatistiksel Bilgiler <http://www.tuik.gov.tr> Türkiye İstatistik Kurumu, 2012.
- Tunç, A., “Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları”, Asil Yayın Dağıtım, Ankara, 2004.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi

Ayhan Cömert, Elif Bayrak, Ali Ünsal, Nilgün Güngör

Karayolu Genel Müdürlüğü Ar-Ge Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Özet

Daha uzun ömürlü ve az bakım gerektiren yol ihtiyacı nedeniyle, dünyada olduğu gibi ülkemizde de son yıllarda beton yollar sıkça gündeme gelmektedir. Ülkemizin dünyada hızla gelişen konumu da göz önünde bulundurulduğunda, kurumumuzun “Güvenli, zamanında ulaştırıcı, çevreye duyarlı yollar” vizyonu doğrultusunda beton yol yapımının da diğer kaplama türleri arasında yerini alması öngörülmektedir. Bildiride, Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Dairesi Başkanlığınca 2016 yılında yayımlanan “Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi”nin hazırlanmasında yararlanılan kaynaklar ve şartnamenin belirlenen gerekliliklerinden bahsedilmesi amaçlanmıştır.

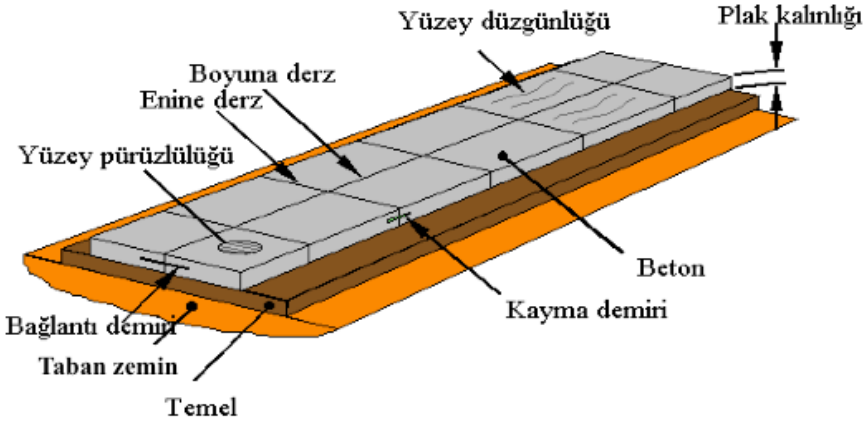
Anahtar Kelimeler: Beton Yol, Derzli Donatısız Beton Yol Kaplama, Yüksek Durabiliteli Beton, Yüzey Düzgünlüğü

1 Giriş

Beton yolların; yapısal ömrünün uzun oluşu, daha az bakım-onarım gerektirmesi, 30-60 yıl gibi uzun bir süre için tasarlanabilmesi, yolda yaşlanmanın söz konusu olmaması, yüksek sıcaklıklarda ve ağır yükler altında tekerlek izi oluşmaması gibi **üstünlük** teşkil eden özellikleri nedeniyle Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Başkanlığı tarafından 2016 yılında, teknik gerekliliklerin ve yapım esaslarının yer aldığı “Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi” oluşturularak yürürlüğe konulmuştur. Bu bildiride bu teknik şartnamenin hazırlanma süreci ve şartnamede öne çıkan bazı hususlar ele alınacaktır.

2 Şartnamenin Hazırlanma Süreci

Kurumumuzca yapılan değerlendirmede, Ülkemiz için hazırlanacak olan şartnamenin oluşturulmasında dayanıklılığı yani durabilitesi yüksek, özellikle ağır trafığe maruz kalacak, yaygın olarak kullanılan ve aynı zamanda hem ekonomik hem de verimli olacağı düşünülen “Derzli- Donatısız Beton Yol Kaplamaları” türü ele alınmıştır.



Şekil 1. Derzli Donatısız Beton Yol Kaplaması Tipik Görünümü

Şartname hazırlanırken, milli ihtiyaç ve imkânlarımız ön planda olmak üzere, ulusal ve uluslararası standartlar ve esaslar göz önünde bulundurulmuştur. Bu bağlamda incelenen birçok doküman arasında yararlanılan kaynaklardan biri, Alman Çimento Sanayi Federal Birliği tarafından hazırlanmış Beton Kaplamalar kitabıdır. Almanya Yol ve Ulaştırma Araştırma Birliği tarafından yayınlanmış olan hidrolik bağlayıcılı temel tabakaları ve beton kaplamalar için malzemeler ile malzeme karışımlarına ait teknik direktif ve şartların yer aldığı TL Beton-StB 07, ZTV Beton-StB 07 ve TP Beton-StB 10 dokümanlar yararlanılan diğer kaynaklardır. Ayrıca Beton Yol yapımında öncü ve ileri seviyede bulunan Amerika Birleşik Devletleri'nin, Ulaştırma Bakanlığının karayolu taşımacılığı konusunda uzmanlaşmış bir bölümü olan Federal Karayolu İdaresi'nin (U.S Department of Transportation Federal Highway Administration), yine Amerikan Ulusal Beton Kaplamaları Merkezinin (National Concrete Pavement Technology Center) yayınlarından da faydalanılmıştır. Keza beton yol tecrübesi oldukça fazla olan Belçika şartnamesi olan “CCT Qualiroutes” de incelenen dokümanlar arasında bulunmaktadır.

Hazırlanan şartnamenin temel kaynağını, Karayolları Genel Müdürlüğü Merkez ve Bölge teşkilatlarında yapılacak tüm teknik işlerde kullanılan “Karayolu Teknik Şartnamesi (KTŞ)” oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra Tablo 1’de sıralanan “Beton Kaplamalar” konulu harmonize Türk Standartları da şartname içeriğinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Tablo 1. Yararlanılan Beton Kaplamalar başlıklı Türk Standartları

TS EN 13863-1	Beton kaplamalar - Beton kaplama kalınlığının tayini - Ölçme yöntemi
TS EN 13863-2	Beton kaplamalar - İki tabaka arasındaki aderansın tayini
TS EN 13863-3	Beton kaplamalar - Beton kaplama kalınlığının karot alma yoluyla tayini
TS EN 13863-4	Beton kaplamalar - Beton kaplamaların çivili lastiklerden kaynaklanan aşınmaya karşı direncinin tayini
TS EN 13877-1	Beton kaplamalar – Malzemeler
TS EN 13877-2	Beton kaplamalar - Beton kaplamalar için gerekli işlevsel özellikler
TS EN 13877-3	Beton kaplamalar - Beton kaplamalarda kullanılan çiviler – Özellikler

Şartname genel hatları ile, kaplama betonun bileşen malzemelerinin özellikleri ve istenen kriterler, beton kaplamadan beklenen performans değerleri, beton tasarımı ve gereklilikler, betonun üretimi, deneme yolu yapımı, beton yolun imalatı, hem yüklenici firma hem de idarenin yapacağı veya yaptıracığı kalite kontrol denetimleri, son olarak da bu denetimler sonucunda gerekli olması durumunda idare tarafından yapılacak ödeme kesintilerinden oluşmaktadır. Aşağıda bu bölümlere ilişkin kısa bilgiler verilecek ve önemli bazı hususlara değinilecektir.

3. Beton Bileşen Malzemeleri ve Beton İçin Gereklilikler

3.1 Çimento

Şartnamemizde kaplama betonunda kullanılacak çimento gereklilikleri, Karayolu Teknik Şartnamesi ve aynı zamanda da TS EN 197-1 de belirtilen, aranan genel gerekliliklerdir. İlgili standartta verilen çimentolardan; betondan istenen özelliklere, yapım esnasındaki hava şartlarına ve betonun daha sonra maruz kalacağı çevresel etki sınıfları dikkate alınarak, çimento tipi seçimi yapılması uygun olacaktır. Ayrıca deneme kesimlerinde kullanılan ve iyi sonuçlar verdiği bilinen TS 13353 standardına uygun Borlu aktif belit çimentosu da kullanılabilir.

3.2 Agrega

Kaplama betonu ince ve iri agrega özellikleri için; TS 706 EN 12620 Beton Agregaları, TS EN 13242 İnşaat Mühendisliği İşleri ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcı Malzemeler için Agregalar ve Karayolu Teknik Şartnamemizde yer alan kriterlerden yararlanılmıştır. Beton kaplamanın yüzey alanının genişliği ve maruz kalacağı dinamik ve statik yükler ve çevre etkileri göz önünde bulundurularak agrega kriterleri belirlenmiştir. İnce ve iri agregalar için gereklilikler Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2’de öne çıkan gerekliliklerden biri ince malzeme muhtevasıdır. Tablodan da görüleceği üzere 125 mikron ve özellikle 63 mikron altı malzemelerin kullanım miktarlarına, donma çözülme ve aşınma etkilerine maruz kaplama betonları için sınırlandırmalar getirilmiştir.

Tablo 2. İnce agrega için gereklilikler

	Deney	Şartname Limiti	Deney Standardı						
1	Organik Madde (% 3’ lük NaOH ile)	Açık sarı renkten koyu olmayacak	TS EN 1744-1						
2	0,063 mm Elekten Geçen Çok İnce Malzeme Muhtevası (%) *	≤ 4,0	TS EN 933-1						
3	Alkali Silika Reaksiyonu (14 Günlük % Genleşme)	≤ 0,10	CSA23.2 25A ASTM C 1260 TS 13516						
4	Su Emme, %	≤ 2,5 WA ₂₄ 2,5	TS EN 1097-6						
5	Doğun Yüzey Kuru Birim Hacim Ağırlık (gr/cm³)	≥ 2,55	TS EN 1097-6						
6	Metilen Mavisi, g/kg (MB)	≤ 1,5	TS EN 933-9						
<p>* 1.Bu değer, kırılarak hazırlanan agregalarda kilden ileri gelmiyorsa (taş tozları ise) %2 artırılabilir. 2. Karışımındaki çok ince malzeme miktarı % 5’ i geçmemelidir. 3. Ayrıca karışımındaki İnce malzeme içeriği (taze beton içindeki, tane büyüklüğü en fazla 0,125 mm olan katı malzemelerin toplam kütlesi) (çimento + mineral katkı + agrega ince kısmı); C50/60 MPa ve daha düşük dayanımlı, XF veya XM çevre etki sınıflarına maruz yol kaplama betonları için, aşağıdaki miktarları geçmeyecektir. (TS 13515)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Çimento dozajı (kg/m³)</th> <th>En fazla izin verilen ince malzeme içeriği (kg/m³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 300</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>≥ 350</td> <td>450</td> </tr> </tbody> </table> <p>İnce malzeme içeriği için üst sınır değerler 50 kg/m³ değerini aşmayacak şekilde aşağıda verilen miktarlar kadar artırılabilir; - Çimento dozajı 350 kg/m³, den daha fazla olduğunda, 350 kg/m³, den fazla olan miktar kadar, - Betonda tip II puzolanik malzeme (öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb.) kullanılması durumunda, tip II katkı miktarı kadar. (Betonda tip II puzolanik malzeme kullanılması durumunda, en fazla izin verilen ince malzeme içeriği için üst sınır değer, 50 kg/m³ değerini aşmayacak şekilde ilave edilen tip II katkı miktarı kadar artırılabilir.) Not: Çimento dozajının 300 kg/m³ ve 350 kg/m³ arasında olması durumunda, Çizelgede verilenlerden doğrusal enterpolasyon işlemi ile ara değerler belirlenebilir.</p>				Çimento dozajı (kg/m ³)	En fazla izin verilen ince malzeme içeriği (kg/m ³)	≤ 300	400	≥ 350	450
Çimento dozajı (kg/m ³)	En fazla izin verilen ince malzeme içeriği (kg/m ³)								
≤ 300	400								
≥ 350	450								

Beton yol kaplamalarında agreganın göze çarpan niteliklerinden cilalanma direnci ve kırılmışlık değerine ait uygunluk kriterleri belirlenmiştir. Ayrıca, Alkali Silka Reaksiyonu (ASR) etkileri beton yolda çok önemli hasarlara yol açtığı için, bu reaksiyona neden olan mineralleri içeren agregaların kullanılmaması gerektiği belirtilmiş, ASR genleşme değerleri % 0,10’a düşürülmüş ayrıca agregada risk varsa çimentonun alkali oksit eşdeğerine kısıtlamalar getirilmiştir.

Tablo 3 İri agrega için gereklilikler

	Deney	Şartname Limiti	Deney Standardı
1	Los Angeles Parçalanma Direnci (500 devir) % kütlece kayıp	≤ 30 (LA_{30})	TS EN 1097-2
2	Micro Deval Aşınma Direnci % kütlece kayıp	≤ 25 (MDE_{25})	TS EN 1097-1
3	Nordic Aşınma Direnci (Çivili lastik kullanılacak yerlerde dikkate alınacaktır)	≤ 19 AN_{19}	TS EN 1097-9
4	Magnezyum Sülfat Değeri (Mg_2SO_4) % kütlece kayıp	≤ 18 (MS_{18})	TS EN 1367-2
5	Donma ve Çözülme Direnci ^{3,4} % kütlece kayıp	≤ 1 (F_1)	TS EN 1367-1
6	Kırılmışlık ² Değeri, Ağırlıkça, %	***	TS EN 933-5
7	Yassılık Endeksi, %	≤ 20 (FI_{20})	TS EN 933-3
8	Cilalanma Değeri (Parlatmaya karşı Direnç) , %	≥ 44 (PSV_{44})	TS EN 1097-8
9	Su Emme ³ , %	$\leq 2,0$ $WA_{24} 2,0$	TS EN 1097-6
10	Doğun Yüzey Kuru Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)	$\geq 2,55$	TS EN 1097-6
11	Kil Topakları ve Ufalanabilir Tanecikler, %	$\leq 0,5$	ASTM C 142
12	Alkali-Silika Reaksiyonu (14 günlük % Genleşme)	$\leq 0,10$	CSA23.2- 25A ASTM 1260 TS 13516
13	Hacim kararlılığı - kuruma büzülmesi %	$\leq 0,075$	TS EN 1367-4
14	0,063 mm elekten geçen çok ince malzeme muhtevası ¹ , %	$\leq 0,5$	TS EN 933-1
<p>¹ Bu değer kırılarak hazırlanan agregalarda kilden ileri gelmiyorsa (taş tozu ise) %1,5 artırılabilir.</p> <p>² Agregada kırılmış kayalardan elde edilmişse, $C_{90/1}$ kategorisinde (tüm yüzeyi kırılmış/ tüm yüzeyi yuvarlak) olduğu kabul edilmelidir. Bu durumda daha fazla deney yapılmaya gerek duyulmaz.</p> <p>³ Sabit kütleyle kadar doymun hale getirilmiş iri agreganın su emme oranı $\leq 0,5$ ise bu agreganın donma-çözülme karşı dirençli olduğu kabul edilir.</p> <p>⁴ Aşın soğuk hava ve/veya tuzluluk veya buz çözücü tuz doymunluğu durumlarında, TS EN 1367-1:2007 Ek B' de ayrıntısı verilen ve bir tuz çözeltisi veya üre kullanılan deneylerin yapılması daha uygun olabilir.</p> <p>*** $D_{max} \geq 8$ mm agregaların kırılmışlık (tüm yüzeyi) değeri $\geq \%50$ $D_{max} \geq 8$ mm karışımların toplam kırılmışlık (tüm yüzeyi) değeri $\geq \%35$ $D_{max} \leq 8$ mm karışımlarda $D < 8$ mm ve $d \geq 2$ mm boyutunda kırılmışlık (tüm yüzeyi) değeri $\geq \%100$</p>			

3.3. Beton İçin Gereklilikler

Beton yol kaplama şartnamemizde, uluslararası TS EN 206 ve ulusal TS 13515 standartları esas alınmak şartıyla betondan beklenen özellikler ve betonun tasarımı yer almaktadır. Buna ilişkin hazırlanan gereklilikler ise Tablo 4'de verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere yol betonları maruz kalabileceği çevresel etki sınıflarına göre oldukça yüksek nitelikte olmalıdır. Hava sürükleyici katkıların yanısıra düşük su/çimento oranı elde edebilmek gereklidir. Ayrıca betonda basınç dayanımı yanısıra eğilme dayanımı da muhakkak tespit edilmelidir.

Tablo 4. Beton Malzemesi için Gereklilikler

	Gereklilikler
Çevresel Etki Sınıfı	XC4, XF4, XM2, XA
Basınç Dayanım Sınıfı	min.C30/37MPa
Bağlayıcı İçeriği	$\geq 340 \text{ kg/m}^3$
Su/ Bağlayıcı	0,40-0,45
Agrega tane dağılımı	*En az 3 tane grubuna ayrılmalı ve agrega grupları: 0/2, 2/8, >8 mm veya 0/4, 4/8, >8 mm 0/2 veya 0/4, $\leq 8 \text{ mm}$ (maksimum agrega boyutu 8 mm) * Maks. tane boyutu: 8 mm,16 mm,22 mm veya 32 mm *Elekten geçen ağırlıkça % 1mm \leq %27 2mm \leq %30 2mm \leq %35 (en büyük tane boyutu 8mm)
Toplam klor iyonu içeriği	\leq % 0,40 (Çimento kütleğine göre)
Sertleşmiş betonda (A_{300}) hacmi	\geq % 1,8
Aralık faktörü L (mm)	\leq 0,20 mm
Karakteristik Basınç Dayanımı	28 günlük $f_{ck,küp} \geq 37 \text{ N/mm}^2$ (150x150) mm küp numune.
Karakteristik Eğilme Dayanımı	28 günlük $f_{cbt} \geq 4,5 \text{ N/mm}^2$ (150x150 mm L \geq 525mm) prizma numune. (İki noktadan yükleme).

4 Beton Kalite Kontrol Kriterleri

Daha önce bahsedildiği üzere yol betonları özel nitelikler gerektirdiği için taze betondan alınan numunelerin basınç dayanımı uygunluk kriterleri de TS 13515 standardından farklılık göstermektedir. Örneğin, Tablo 5'den görüleceği gibi taze betondan alınan numunelerin ortalama basınç dayanımı minimum $f_{ck} + 4$ olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımının yanı sıra betonun çekme dayanımının da takip edilmesi gerekmekte olup bu amaçla yarmada çekme deneyi yapılması gerekmektedir. Buna ilişkin gereklilikler ise Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Beton Basınç Dayanımı Uygunluk Kriterleri

1. Kriter	2. Kriter
“n” adet deney sonucu ortalaması (f_{cm}) N/mm ²	Herhangi tek deney sonucu (f_1) N/mm ²
$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$

Tablo 6. Yarmada Çekme Dayanımı Uygunluk Kriterleri

	1. Kriter	2. Kriter
	“n” adet deney sonucu ortalaması ($f_{tk} + 0,5$)	Herhangi tek deney sonucu ($f_{tk} - 0,5$)
S 3.3 ¹	$\geq 3,8$	$\geq 2,8$
¹ Beton dayanım sınıfı C30/37MPa olması durumunda yarmada çekme dayanım sınıfı S3.3 olacaktır. Farklı beton dayanım sınıfı seçildiğinde; C35/45 dayanım sınıfı için yarmada çekme dayanım sınıfı S3.7, C40/50 dayanım sınıfı için yarmada çekme dayanım sınıfı S4.3 uygulanacaktır.		

Taze betondan alınan numunelerde düzenli olarak sürüklenmiş hava içeriği tayini yapılmalıdır. Bu gereklilik ise Tablo 6'dan da görüleceği üzere maksimum agrega tane boyutuna göre değişiklik göstermektedir.

Tablo 6. Taze Betonun Şantiyede Yerleştirme Öncesi Min. Hava İçeriği

(a) Yalnız Hava Sürükleyici Katkı Kullanıldığında

Maksimum Tane Boyutu (mm)	Min. Ort. Hava İçeriği (%)	Min. tek değer (%)
8	5,5	Ortalama değerden en fazla % 0,5 az olabilir.
16	4,5	
22 veya 32	4,0	

(b) Hava Sürükleyici ile Akışkanlaştırıcı Katkılar Birlikte Kullanıldığında

Maksimum Tane Boyutu (mm)	Min. Ort. Hava İçeriği (* (%)	Min. tek değer (%)
8	6,5	Ortalama değerden en fazla % 0,5 az olabilir.
16	5,5	
22 veya 32	5,0	
(*)Ancak (A_{300}) mikro hava boşluğu $\geq \%1,8$ ve mesafe faktörü $L \leq 0,20$ mm değeri elde edilebilirse %1 artırılmış değerler uygulanmayabilir.		

Beton yol imalatı bitirildikten sonra, hem doğrudan tamamlanmış beton kaplama üzerinde yapılacak kalite kontrol testleri hem de kaplamadan alınan karotlara yapılacak kalite kontrol testleri için aranan kriterler, Tablo 7'de verilmektedir. Buradan da görüleceği üzere kaplamadan alınacak karotlarda basınç dayanımının yanısıra yarmada çekme dayanımı ile kaplama kalınlığı tayini ve mikroskop ile sürüklenmiş hava içeriği tanımlamaları yapılması gerekmektedir. Kaplama üzerinde ise kayma demirlerinin konumu, yol profilinin uygunluğu ile düzgünlük ölçümleri yapılması gerekmektedir.

Tablo 7. Tamamlanmış Beton Yol Kaplama Gereklikleri

(a) Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Tespitler

	Gereklikler
Basınç Dayanımı (28 günlük)	Karot Basınç Dayanım Sınıfı : min.CC30 CC30 için; $f_i \geq 26 \text{ N/mm}^2$ (en düşük bireysel değer) $f_m \geq 34 \text{ N/mm}^2$ (en düşük ortalama değer)
Yarmada Çekme Dayanımı (28 günlük)	Karot Yarmada Çekme Dayanım Sınıfı : min.SC3.0 SC3.0 için; $f_i \geq 2,5 \text{ N/mm}^2$ (en düşük bireysel değer) $f_m \geq 3,5 \text{ N/mm}^2$ (en düşük ortalama değer)
Sürüklenmiş Hava	Mikro hava kabarcığı içeriği $A_{300} \geq \%1,5$ (hacimce) Mesafe faktörü $L_{ort} \leq 0,24 \text{ mm}$
Kaplama Kalınlığı¹⁾	1. Gerçekleşen ortalama kalınlık \geq dizayn kalınlığı 2. Herhangi bir tek değer, dizayn kalınlığından sapması $\leq 5 \text{ mm}$ (1000 m ² den alınan tek karot numunesi için) Bu iki kriterin birlikte sağlanması gerekmektedir.
¹⁾ Karot numunesi dikey konumda iken, çapının eşit aralıklı 4 noktasından, üst ve alt uçları arasındaki mesafe en yakın 1mm' ye yuvarlatılarak ölçülür ve ölçülen değerlerin ortalamaları alınır.	

(b) Kaplama Üzerinde Yapılan Tespitler

	Gereklikler
Kayma Demirlerinin Yerleşimi Profile	Eğiklik (açı) $\leq 20 \text{ mm}$ Yükseklikte sapması $\leq 20 \text{ mm}$ Yatay sapması $\leq 50 \text{ mm}$
Uygun Konum - Enine eğim - Yükseklik	Projesine uygun boyuna ve enine profil gerçekleştirilmeli ve yüzey suyu drenajı sağlanmalıdır. Enine eğim sapması: Proje değerinden sapma $\leq \% \pm 0,2$ İstenilen yükseklikten (kırmızı kot) sapmalar $\leq \pm 20 \text{ mm}$
Kaplama Genişliği	İstenilen genişlikten sapma $\leq \pm 10 \text{ mm}$
Düzgünlük	1. Master ile kontrol: 4m ölçüm mesafesi içinde $\leq 4 \text{ mm}$, 2. Profilometre ile kontrol: Düzgünlük (m/km) IRI $\leq 1,60$

Yukarıda yapılacak olan tanımlama deneylerinin sıklığı yani kalite kontrol planları da **şartnamede** açık bir şekilde belirlenmiştir. Taze betondan alınacak numunelerin sayısı Tablo 8’de, karot numunelerinin sayısı ise Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 8. Taze Betondan Dayanım İçin Numune Alma Planı

1. Kriter	2. Kriter	Numune alınacak asgari Beton Yüğü veya Transmikser/Kamyon Sayısı
Bir gün içerisinde imalata giren Beton Miktarı (m ³)	Bir gün içerisinde imalatı tamamlanan Kaplama Alanı (m ²)	
0-24	-	2
25-100	< 450	3
101-150	451-600	4
151-200	651-850	5
201-250	851-1050	6
251-300	1051-1250	7
301-400	1251-1450	8
401-500	1451-1650	9
501-600	1651-1850	10
İlave her 200 m ³	İlave her 200 m ²	+ 1 ilave edilir.

Tablo 9 Tamamlanmış Beton Kaplamadan Karot Alma Planı

Gereklilikler	Karot Alma Planı
Beton basınç dayanımı	1/1000 m ²
Yarmada çekme dayanımı	1/1000 m ²
Beton kaplama kalınlığı	1/1000 m ²
Beton kaplama yoğunluğu	1/1000 m ²
Donma çözülme direnci	1/1000 m ²
Beton kaplama tabakalarının yapışma direnci	1/1000 m ²
<p>Not 1: Dayanım, kalınlık, yoğunluk ölçümleri için aynı karot kullanılabilir.</p> <p>Not 2: Kaplama yoğunluğu imalattan alınan en az 3 adet karot numunesi (basınç, yarmada çekme, kalınlık vb. numuneleri) ile değerlendirilmelidir.</p> <p>Not 3: Kaplama tabakalarının yapışma direnci, anlamlı bir sonuç elde etmek için en az 9 adet karot numunesi ile değerlendirilmelidir.</p> <p>Not 4: Karotlar, derzlerin 50 cm yakınından alınmamalıdır. (Yüksek gerilmelerin oluştuğu derzlerde beton kaplamanın zarar görmemesi için)</p> <p>Not 5: Karotların en uygun alınma yeri, plak boyunca çeyrek noktalar arasındaki bölgelerdir. Sürekli donatılı beton kaplamalarda ise ard arda gelen iki enine çatlak arasından alınmalıdır.</p>	

5 Kesintiler

Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamemizde son olarak, aşağıda verilen parametrelerde elde edilen sonuçların şartnamede belirtilen kriterleri sağlamaması halinde ödemelerde yapılacak kesintiler yer almaktadır.

1. Karot Basınç Dayanımları,
2. Kalınlık (Karot yöntemi ile),
3. Yüzey düzgünlüğü (IRI değerinin),

Bunlardan yüzey düzgünlüğüne ilişkin yapılacak kesintiler Tablo 10'da verilmektedir. Buradan da görüleceği üzere beton kaplamada istenen IRI değeri 1.60 m/km, kabul edilebilecek maksimum kesintili değer ise 2.70 m/km olarak belirlenmiştir.

Tablo 10. Beton Kaplama Yüzey Düzgünlük Kriterleri ve Ödeme Şekilleri

IRI ≤ 1,60	Tam ödeme
1,61 – 1,90	%5 Kesintili ödeme Kesintili ödeme: kaplama tabakası yapımı için yüklenicinin teklif ettiği fiyat üzerinden kesinti yapılacaktır.
1,91 - 2,20	%10 Kesintili ödeme Kesintili ödeme: kaplama tabakası yapımı için yüklenicinin teklif ettiği fiyat üzerinden kesinti yapılacaktır.
2,21 - 2,70	%20 Kesintili ödeme Kesintili ödeme: kaplama tabakası yapımı için yüklenicinin teklif ettiği fiyat üzerinden kesinti yapılacaktır.
IRI ≥ 2,71	Yeniden yapım

6 Sonuç

Yukarıda özetlenen Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğümüz bünyesinde; Daire Başkanlıklarımız, Bölge Müdürlüklerimiz, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Türkiye Hazır Beton Birliği, Katkı Üreticileri Birliği, Agregat Üreticileri Birliği dâhil olmak üzere konuyla ilgili kurum ve kuruluşların görüş ve önerileri dikkate alınarak, yapımda kullanılacak malzemeler, beton kalitesi, derz dizaynı, derz kesilmesi, kayma demirlerinin yerleştirilmesi, beton perdah ve kürü dâhil olmak üzere tüm aşamalarda uygulamaların titizlikle yapılması vurgulanarak, 12.12.2016 tarih ve 69205513-030.04/E.519083 sayılı Genel Müdürlük oluru ile yayınlanmıştır.

7 Kaynaklar

Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, (2016)

Karayolu Teknik Şartnamesi (2013)

TL Beton-StB 07 - Technical delivery terms for materials and material mixtures for base courses with hydraulic binders and concrete pavements

ZTV Beton-StB 07 – Additional technical conditions of contract and directives for the construction of base courses with hydraulic binders and concrete pavements

TP Beton-StB 10 – Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton

ACI 325 (American Concrete Institute) Texturing Concrete Pavements

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Beton Yol İmalatında Kimyasal Katkıların Rolü ve Etkileri

Alev Çankayalı, Emrah Karataş, Osman Tezel, Serhat Sarıkaya

Katkı Üreticileri Birliği Teknik Komitesi, İstanbul, Türkiye

Özet

Yol yapımında kullanılacak betonların zaman, kalite ve ekonomi açılarından kimyasal katkılardan faydalanılarak üretilmesi gerekmektedir. Hem taze hem de sertleşmiş beton özellikleri üzerinde etkileri olan kimyasal katkıları, günümüzde özellikle hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılmakta ve zorlu şartlar altında dahi kaliteli ve hedeflenen proje kriterlerine uygun beton üretilmesine imkân tanımaktadır. Bu bakış açısıyla kimyasal katkıları kullanarak üretilen beton yolların çeşitli çevresel etkiler altında beklenen performansı sergilemesi, uzun yıllar boyunca servis vermesi ve dayanıklılık gösterebilmesi mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Su Azaltıcı, Yüksek Oranda Su Azaltıcı, Hava Sürükleyici, Kimyasal Kür Malzemeleri, Makro ve Mikro fiber.*

1 Giriş

Beton yollar tamamen yerel malzemelerle üretilen, esnek üst yapılar oranla daha çevreci, uzun ömürlü ve ağır taşı yüküne dirençli rijit üst yapılarıdır. Petrol fiyatları göz önüne alındığında, beton yollar hem ilk yapım maliyetlerinde hem de yaşam döngüsü maliyetlerinde esnek üst yapılarla rekabet edebilir duruma gelmiştir. Günümüzde karayolu üst yapıları, yapımında kullanılan malzemeye ve yüzey çeşidine göre “Rijit Üstyapı”, “Esnek Üstyapı” ve “Kompozit Üstyapı” olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Esnek üstyapılarda kaplama tabakasında, bağlayıcı malzeme olarak genelde, asfalt kullanılmakta iken rijit üstyapılarda bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılmaktadır. Kompozit üst yapıları ise beton ve asfalt tabakaları birlikte kullanılmaktadır.

Beton yolun avantajları aşağıda verilmiştir.

- Servis ömrünün uzun olması ve bakım masraflarının az olması nedeni ile daha ekonomik bir seçenektir.
- Öz kaynaklarla üretilebilir.
- Daha yüksek trafik yüküne dayanabilirler.
- Açık renkli olması sayesinde gece görüş mesafesini artırarak, gece saatlerinde beton yolu aydınlatmak için gereken ışık miktarının asfalt yola göre az olması sayesinde elektrik tüketiminde tasarruf sağlar.
- Tekerleklerin asfalt yollarda olduğu kadar yola gömülmemesi sayesinde yakıt tüketimini dolayısıyla CO₂ salınımını azaltması beton yolların daha ekonomik, çevreci ve teknik açıdan daha uygun bir seçenek haline getirmektedir.

2 Beton Yol İmalatında Dikkat Edilecek Hususlar

Beton yoldan uzun dönemli bir performans alabilmek için imalatı sırasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Alt Temel ve Taban Hazırlığı
- Donatıların Yerleştirilmesi
- Uygun Beton Hammaddesi
- Uygun Karışım Dizayn
- Betonun Üretilmesi ve Taşınması
- Yerleştirme
- Yüzey bitişi
- Kütleme
- Birleşme Yerlerinin Doğru Kesilmesi



Şekil 1. Beton yol imalatı

3 Beton Yol İmalatında Kimyasal Beton Katkıları ve Etkileri

Beton yoldan uzun dönemli bir performans alabilmek için imalatı sırasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Alt Temel ve Taban Hazırlığı
- Donatıların Yerleştirilmesi
- Uygun Beton Hammaddesi

Projede talep edilen çekme dayanımını elde etmek, efektif sıkıştırma ve yerleştirmeyi sağlamak, donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığı temin etmek, ağır trafik yükleri öngörülen durumlarda yorulma çatlaklarını kontrol altında tutmak, beton dökümünden sonra hidrasyon reaksiyonlarının sağlıklı bir biçimde devam etmesini sağlamak, anormal hava koşullarında yapılacak dökümlerde priz süresini ayarlamak, alkali silika reaksiyonuna (ASR) karşı ilave önlemleri almak gibi pek çok durumda kimyasal katkı teknolojilerinden faydalanılması kaçınılmazdır.

Bu bildiride beton yol uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan su azaltıcılar, yüksek oranda su azaltıcılar, hava sürükleyici katkılar, kür malzemeleri ve fiberler üzerine kimyasal katkı üreticileri gözünden uygulamaya dönük birtakım bilgiler paylaşılacaktır.

3.1 Su Azaltıcı Katkıları ve Etkileri

Beton yolun özellikle performansını ve yerleştirilmesini geliştiren kimyasal beton katkılarının özellikleri Tablo 1’de belirtilmiştir. Beton yol uygulamalarında ülkemizde TS EN 934-2 standardına uygun olarak üretilen su azaltıcı veya yüksek oranda su azaltıcı kimyasal beton katkılarının kullanılması önerilir.

Tablo 1. TS EN 934-2’ye göre su azaltıcı katkıların özellikleri

Tip	İçerik	Su Azaltma	Avantajlar
Su Azaltıcı	Lignosülfonatlar	%5-12	İşlenebilirlik ve yerleştirmeyi geliştirme Dayanımı artırma Karışım maliyetini azaltma
Yüksek oranda Su Azaltıcı	Naftalin sülfonatlar Melamin sülfonatlar Polikarboksil eterler	%12-30	Yüksek işlenebilirlik ve yerleştirme sağlama Yüksek dayanım artırma Karışım maliyetini optimize etme

3.2 Hava Sürükleyici Katkılar ve Etkileri

Uzun süre hizmet vermesi planlanan bir beton yolun donma-çözülme direncinin yüksek olması gerekmektedir. Bu amaçla beton karışımında hava sürükleyici katkıları kullanılmalıdır. Betonun hava içeriği aşağıdaki bazı şartlara göre belirlenir:

- Yapının tipi
- Yapının servis ömrü
- Mevsimsel etkiler
- Donma-çözülme döngüsü sayısı
- Buz çözücülere maruz kalma düzeyi

Diğer taraftan, hava sürükleyici katkıları sıfır slump olarak üretilen yol betonlarının işlenebilirliğini gözle görülür biçimde iyileştirirler ve betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasını kolaylaştırırlar. Ayrıca terleme ve ayrışmaya karşı betonu iyileştirmektedir.

Önerilen hava miktarı şartnamelere göre değişiklikler göstermektedir. TS 13515’de donma-çözülme etkisine karşı direnç sağlamak için betonda hava içeriğinin en az %4 ve hava boşluk faktörünün en fazla 0,20 mm olması gerektiği belirtilmektedir. Diğer yandan British Standart (BS) ve American Concrete Institute (ACI) şartnamelerinde en büyük agrega boyutuna ve dış ortam koşullarının şiddetine bağlı olarak önerilen, beton yol karışım dizaynlarında da kullanılabilir hava miktarları Tablo 2 ve 3’te verilmiştir.

Tablo 2. BS’e göre önerilen hava miktarı

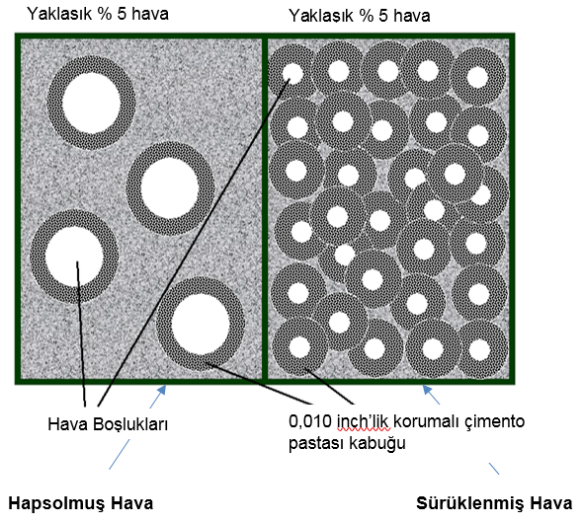
En Büyük Tane Boyutu	En Az Hava Miktarı
40 mm	%3,0
20 mm	%3,5

Tablo 3. ACI’ye göre önerilen hava miktarı (Dış koşullara bağlı olarak)

Agrega Boyutu(mm)	Ilıman	Orta	Şiddetli
9,5	%4,5	%6,0	%7,5
12,5	%4,0	%5,5	%7,0
19,0	%3,5	%5,0	%6,0
25,0	%3,0	%4,5	%6,0
37,5	%2,5	%4,5	%5,5
50,0	%2,0	%4,0	%5,0
75,0	%1,5	%3,5	%4,5
100	%1,0	%3,0	%4,0

Hava miktarı kadar, havanın beton içerisinde düzgün bir şekilde dağılması çok önemlidir. Sürüklenmiş hava ile hapsolmuş hava arasındaki farklar Şekil 2’de görülmektedir. Hava sürükleyici katkı ile elde edilen hava, çimento pastasının direncini donma-çözülme etkilerinden etkin bir şekilde koruyarak beton yolun performansını ve servis ömrünü artırır. Hapsolmuş ve sürüklenmiş hava miktarları aynı olan iki farklı betonun, donma-çözülme etkisi karşısında aynı dayanıklılığı göstermeyeceği aşikardır.

Beton karışımında hava miktarının artışına karşılık olarak, mukavemet değerlerinde meydana gelecek düşüşler göz ardı edilmemeli, su/bağlayıcı oranları düşürülmelidir.



Şekil 2. Hapsolmuş ve sürüklenmiş hava karşılaştırması.

3.3 Kimyasal Kür Malzemeleri ve Etkileri

Taze dökülmüş beton üzerine uygulanan, oluşturduğu film tabakasıyla betonun içerisindeki nemi muhafaza ederek optimum dayanım gelişimini sağlayan ve hızlı kurumayı engelleyerek rötreyi azaltan sıvı bir malzemedir.

Temel olarak; kimyasal kür malzemeleriyle yapılan kürlenme, diğer kürlenme yöntemlerine göre daha az işçilik gerektiren ve zamandan tasarruf sağlayan bir yöntemdir. Özellikle beton yollar gibi yüzey alanı büyük olan betonlarda su ile kürlenme yapılırsa zaman ve işgücü kaybı çok fazla olacaktır.

3.3.1 Kimyasal Kür Kullanımının Avantajları

- Sulamanın zor olduğu geniş alanlarda ve/veya kolon, kiriş, döşeme gibi yapı elemanlarında kolayca uygulanır.
- Tozumsuz bir yüzey sağlar.
- Yüzeyde buharlaşma ile hızlı kurumanın neden olduğu plastik rötre çatlaklarını azaltır.
- Çuval, telis ve sulama gibi benzeri kür yöntemlerine alternatif olarak, daha etkin ve daha az işçilik isteyen bir yöntemdir.

3.3.2 Kimyasal Kür Kullanımının Kullanım Şekli ve Zamanı

- Kimyasal kür malzemeleri betonun nemliliğini korumak için tüm yüzey alanına homojen bir şekilde uygulanır.
- Beton yerleştirdikten ve yüzey dokusu yapıldıktan hemen sonra uygulanmalıdır.



Şekil 3. Beton yolda kimyasal kür uygulaması

3.3.3 Beton Yol için Uygun Kür Malzemesi Tipleri

Beton yol gibi yüzey alanı geniş betonlar için aşağıdaki tipte kür malzemelerin kullanılması tavsiye edilir:

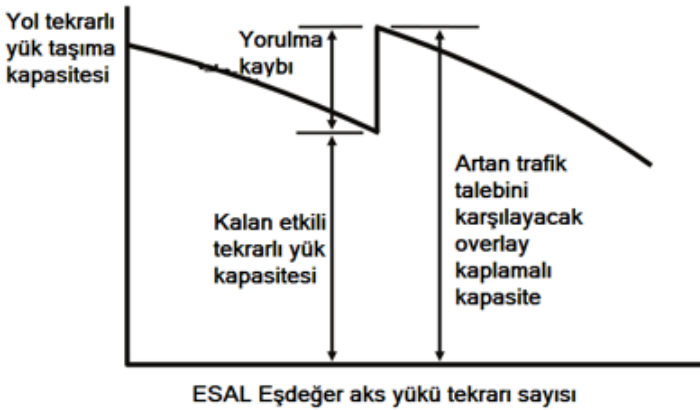
- Pigmentsiz Kimyasal Kür Malzemeleri
 - Parafin ve reçine esaslı kür malzemeleri
- Pigmentli Kimyasal Kür Malzemeleri (Beyaz renkli)
 - Güneş ışınlarını beton yüzeyden pigmentsiz kür malzemelerine göre daha fazla yansıtırlar.
 - Sıcak ve güneşli günlerde beton ısısının yükselmesini engellerler.

3.4 Makro ve Mikro Fiber Katkıları ve Etkileri

Makro sentetik fiber donatı, ağır trafik koşullarına maruz beton yolların yorulma çatlaklarını kontrol altına almak ve yol ömrünü arttırmak için kullanılır. Genellikle hacimsel olarak yaklaşık %0,5 oranında kullanılmakla beraber, daha yüksek yorulma dayanımı elde edilmek istendiğinde American Concrete Pavement Association (ACPA) tasarım metodunda yer alan MOR değerlerinin, ilgili beton karışımından üretilen kiriş deneylerinde (ASTM C 1609) bulunan ek dayanım (f150) değeri ile artırılması tavsiye edilmektedir. [6]

Fiber donatılı beton kaplamalar yapısal kapasitesini yitirmiş asfalt yolların tamiratında da yaygınca kullanılmaktadır. Yol betonu içinde fiber kullanılması durumunda, karışıma agrega bandı üzerinden ilave edilmesi, eğer miksera doğrudan ilave edilecekse bu işlemin çok hızlı yapılması ve homojen bir dağılım sağlanması için tamburun en az 5 dakika yüksek hızla döndürülmesi tavsiye edilir.

Mikro sentetik fiber donatılar ise beton yollarda ilk günlerde oluşabilecek çatlakları azaltır. Böylelikle ilerleyen dönemde beton yolun daha az su geçirmesi sağlanarak, yolun faydalı ömrünü artırması beklenmektedir.



Şekil 5. Yol kaplamasında yorulma kayıpları

4 Sonuçlar

1. Beton yol karışımında kullanılması planlanan kimyasal katkıların, özellikle su azaltıcılar ile hava sürükleyici katkıların, birbirleriyle uyumları kontrol edilmelidir. Bu amaçla üretim öncesinde laboratuvar denemeleri yapılmalıdır.
2. Yol betonlarında önemli bir kriter düşük su/çimento oranının sağlanması için su azaltıcı katkıların, oluşacak çatlak açıklıklarını kontrol etmek amacıyla fiber takviyeli beton kullanılması önemlidir. .

3. Taze ve sertleşmiş betonun hava içeriği düzenli olarak kontrol edilmelidir. Taze beton içerisine sürüklenen hava miktarının, döküm sırasında ve sonrasında sertleşmiş betonda da muhafaza edildiğinin kontrol edilmesi gereklidir. Özellikle uçucu kül kullanılan karışımlarda bu daha da önemlidir.
4. Beton yol yüzeyi dokulandırıldıktan sonra, bütün beton yüzeyinde ve taze betonun kurumasından önce kürleme işlemi tamamlanmış olmalıdır.

Kaynaklar

- Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson, (2011). Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., (1993). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 2nd Edition, The McGraw- Hill Companies, Inc.
- Roesler and Bordelon et al., 2018, Fiber Reinforced Concrete Overview for Concrete Pavement and Overlays, National Concrete Consortium.
- Peter Taylor, Tom Van Dam, Larry Sutter, and Gary Fick, (2019). Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual, National Concrete Pavement Technology Center
- www.betonyol.org.tr,

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) ve Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Yolların Teknik ve Ekonomik Analizi

Barışcan Akbelen¹, İsmail Özgür Yaman²

¹ Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, Türkiye

² Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Özet

Yolların tasarımında kullanılan üstyapılar genel olarak rijit ve esnek üstyapılar olarak ikiye ayrılmaktadır. Bununla birlikte rijit ve esnek üstyapı tabakalarının tasarım esasları dahilinde birlikte kullanıldığı yarı rijit üstyapılar (kompozit üstyapılar) da bulunmaktadır. Ülkemizde genel olarak esnek üstyapılar yaygın bir şekilde kullanılmakla beraber, son yıllarda özellikle kırsal yollarda rijit üstyapılar da tercih edilmeye başlanılmış olup, başarılı uygulamalar yapılmaktadır. Kırsal yollarda, geleneksel beton yol yanında, Belediye ve İl Özel İdareleri tarafından tercih edilen bir diğer beton yol uygulaması ise Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yol teknolojisidir. Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yol, iri ve ince agreganın sürekli gradasyon verecek şekilde uygun oranda su ve çimento ile beton santralinde karıştırılmasıyla üretilen betonun, finişerle serilip, silindirlerle sıkıştırılmasıyla elde edilir. Bitümlü Sıcak Karışım ise; iri agrega, ince agrega ve fillerin belirli bir gradasyonu sağlayacak şekilde bitümlü bağlayıcı ile uygun bir oranda karışımından ve yeterince sıkıştırılmasından elde edilen kaplama türüdür. Bu yayın kapsamında Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yollar ile Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Yolların aynı yol sınıfı, çevre ve iklim koşulları, trafik ve taban zemini taşıma gücü ile aynı proje ömrü altında üstyapı tasarımları yapılarak üstyapı tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Bunun yanında maliyet hesaplamaları da yapılarak teknik ve ekonomik analiz ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: silindirle sıkıştırılmış beton; bitümlü sıcak karışım; maliyet karşılaştırması

1 Giriş

Ülkemizde yol ağı iki ana grupta incelenebilir. Bunlardan ilki Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluğundaki yol ağı olup, 01.01.2019 itibariyle toplam 67.333 km'dir [KGM, 2019]. İkinci grup ise yerel yönetimler yol ağı olup, toplam 370.000 km civarında olduğu bilinmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğundaki yol ağında 2004 yılından itibaren başlamak üzere dört adet “Derzli Donatısız Beton Yol” deneme uygulaması yapılmış olup, ilgili birimleri tarafından performans gözlemleri sürekli olarak devam etmektedir. Buna ek olarak KGM beton yollarla ilgili teknik altyapı çalışmalarına hız vermiş, tasarım ve uygulamaya yönelik şartnameler büyük oranda tamamlanmıştır.

Öte yandan yerel yönetimlerde (Belediyeler, İl Özel İdareleri, Valilikler vb.) beton yol uygulamaları son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Bu doğrultuda yapılan uygulamalarda yoğun bir şekilde tercih edilmeye başlanan beton yol tipi ise “Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB)” yollardır. Günümüzde bir yandan SSB yol uygulamaları devam ederken bir yandan da teknik altyapı çalışmaları son aşamaya gelmiştir.

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) uzun yıllardır tüm dünyada yollarda ve barajlarda kullanılan bir tekniktir. Bu teknikle üretilen beton kıvam, uygulama teknikleri vb. koşullar göz önüne alındığında geleneksel (yaş) betondan bir takım farklar ile ayrılmaktadır. 1940'lı yıllardan itibaren başta ABD olmak üzere bazı ülkelerde ilk denemeleri yapılan silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yol, iri ve ince agreganın sürekli gradasyon verecek şekilde, uygun oranda su ve çimento ile karıştırılmasıyla üretilen betonun finişerle serilip, silindirlerle sıkıştırılmasıyla yapılan üstyapı kaplama tabakasıdır. [TÇMB, SSB Yollar Teknik Şartnamesi, 2018]

Bu bildirinin amacı yerel yönetimler tarafından kullanılan bitümlü sıcak karışım (BSK) ve SSB yolların aynı trafik hacmi, aynı zemin koşulları ve aynı güvenilirlik seviyelerinde tasarımlarını yapmak ve bunların ilk yapım maliyetlerini karşılaştırmaktır.

2. Yol Üstyapıları Tabaka Kalınlıkları Tasarımları

Bu çalışma kapsamında uluslararası yol otoriteleri tarafından kabul edilen rehberler göz önünde bulundurulmuş ve SSB yol üstyapısı için yapılan kalınlık tasarımında “AASHTO 93 Rijit Üstyapılar Yapısal Tasarım Metodu” kriterleri, BSK yol üstyapı kalınlık tasarımında ise “AASHTO 93 Esnek Üstyapılar Tasarım Metodu” kriterleri baz alınmıştır.

2.1. Tabaka Kalınlıkları Tasarımına Etki Eden Parametreler

Yol üstyapı tabaka kalınlıkları tasarımına etki eden en önemli parametreler genel olarak trafik yükleri, çevre ve iklim koşulları, üstyapı malzeme ve karışım özellikleri, üstyapı tabanı mühendislik özellikleri, yolun geometrisi ile drenaj koşulları olarak sıralanabilir.

2.1.1. Trafik Yükleri

Bu çalışma kapsamında Ülkemizde yerel yönetimleri kullandığı yol sınıflarına göre, SSB ve BSK Yollar için YOGT değerleri ve trafik artış katsayısı Tablo 1’ de belirtildiği gibi alınmıştır. [MİGM, Yol Sınıfları, 2017]

Tablo 1. Yıllık Ortalama Taşıt Trafik ve Trafik Artış Katsayıları

Yerel Yönetim Yol Sınıfları	Yıllık Ortalama Günlük Taşıt Trafik (YOGT) Kategorileri			Trafik Artış Katsayısı [%]
Birinci Sınıf Yollar	≤ 1000	1000 - 3000	3000-5000	2
İkinci Sınıf Yollar	≤ 500	500 - 1000	1000-2500	2
Üçüncü Sınıf Yollar	≤ 20	20 - 100	100 - 750	2

Taşıt Eşdeğerlik Faktörü [TEF], otomobil, orta yüklü ticari taşıt, otobüs, kamyon veya treyler cinsinden bir taşıtın her bir geçişinin üstyapıya verdiği zarara eşit bir etki yaratan standart dingil yükü tekrür sayısıdır. Her iki üstyapı tasarımı için TEF değerleri Tablo 2’ de verildiği şekilde alınmıştır. [KGM, Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, 2008]

Tablo 2. Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri

Taşıt Grubu	Taşıt Eşdeğerlik Faktörü (TEF)
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Trafik yüklerini etkileyen parametrelerden bir diğeri şerit dağıtım faktörüdür. Yol üstyapı tasarım hesapları ağır taşıtların kullandığı trafik şeridi esas alınarak yapılmaktadır. Bu şeritteki trafik hesaplanırken tek yöndeki şerit sayısına bağlı şerit dağıtım faktörleri kullanılır. Bu çalışma kapsamında, yerel yönetimler yol ağı düşünüldüğünde, hem SSB hem BSK yollar için yapılan hesaplamalarda, Şerit Dağıtım Faktörü [μ], 100 olarak alınmıştır.

Trafik yükü hesabında kullanılan parametrelerden sonuncusu olan “Yön dağıtım faktörü” her iki yönden geçen trafiğin, şerit bazında dağılımının bir göstergesidir. Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda, her bir trafik yönü için trafik değerinin eşit olduğu kabul edilmiştir. SSB ve BSK yollar için; Yön Dağıtım Faktörü [Y], % 50 olarak alınmıştır.

2.1.2. Güvenilirlik

Üstyapı tabaka kalınlıkları tasarımında hesaba katılan önemli bir parametre ise güvenilirlik katsayısıdır. Güvenilirlik; genel olarak üstyapı kalınlık tasarımının güvenlik katsayısıdır. Projelendirme aşamasında kabul edilen tasarım kriterlerinin proje ömrü süresince geçerliliğini koruması amacıyla, yolun önemi, tasarım aşamasında kullanılan verilerin güvenilirliği vb. hususlar değerlendirilerek belirlenmelidir. Bu çalışma kapsamında belirtilen yol sınıflarına uygun Güvenilirlik Seviyeleri, SSB ve BSK yollar için aynı olup, Tablo 3’ de verilmektedir.

Tablo 3. Güvenilirlik Katsayıları

Yerel Yönetim Yol Sınıfları	Güvenilirlik Seviyesi (%)
Birinci Sınıf Yollar	90
İkinci Sınıf Yollar	75
Üçüncü Sınıf Yollar	70

2.1.3. Plak Bozulma Oranı

Beton plakların kalınlık tasarım hesabında dikkate alınması gereken bir parametre olan plak bozulma oranı servis ömrü sonunda öngörülen bozulma derecesini gösteren orandır. Güvenilirlik ile SSB Plak Bozulma Oranı birbiriyle ilişkili kavramlardır. Güvenilirlik %100 olduğunda, bozulma oranı % 0’ dır. Güvenilirlik azaldıkça bozulma oranı artar. Bu çalışmada uluslararası rehberlerde belirtildiği üzere SSB yollar için yapılan tasarımda belirlenen güvenilirlik seviyesi SSB Plak Bozulma Oranı [DR], %15 olarak belirlenmiştir. [Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C., (2010)]

2.1.4. İzafi Mukavemet Katsayıları

BSK için yapılan hesaplamalarda kalınlıklar belirlenirken, aşınma, binder, bitümlü temel tabakaları bir bütün olarak değerlendirilmiş ve “Binder Eşdeğer Kalınlığı” olarak hesaplanmıştır. Binder için belirlenen kalınlıklar, yapılabılır tabaka kalınlıkları ve izafi mukavemet değeri kullanılarak diğer tabakalara dönüştürülebilecektir. BSK yol üstyapısı tasarımında kullanılan izafi mukavemet katsayıları Tablo 4’ de verilmektedir.

Tablo 4. BSK yol üstyapısı için İzafi Mukavemet Katsayıları

Tabaka Tipi	İzafi Mukavemet Katsayısı
Binder	0,40
Plentmiks Temel	0,15
Plentmiks Alttemel	0,13

2.1.5. Son Servis Kabiliyeti

Servis kabiliyeti, yol üstyapısının yol kullanıcılarına verdiği hizmetin bir göstergesidir. Bu çalışma kapsamında son servis kabiliyeti değerleri, SSB ve BSK yollar için 2,0 olarak belirlenmiştir.

2.1.6. SSB Yol Üstyapı Taban Zemini

Taşıma gücünü belirlemede Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) isimli bir parametre kullanılmıştır. CBR, TS EN 13286-47 “Bağlıcısız ve hidrolik bağlayıcı karışımlar - Bölüm 47: Kaliforniya taşıma oranı, anlık taşıma indisi ve doğrusal şişmenin tayini için deney yöntemi” standardında belirtilen esaslar dahilinde belirlenir. Çalışma kapsamında verilen CBR oranları ilgili standarda göre yapılan deney sonucu elde edilen yaş CBR oranlarıdır.

Esneklik modülü tabakanın tekrarlı yük altında (trafik yükü) gösterdiği davranışın bir ölçüsüdür. Esneklik modülü tek eksenli dinamik yükleme altında tabakada oluşan maksimum gerilmenin, maksimum birim şekil değiştirmeye oranıdır. Bu bildiriye üç farklı taşıma gücüne sahip zemin sınıfı olma ihtimali düşünülmüştür. Her iki üstyapı tipi için CBR değerlerine göre kabul edilen Esneklik Modülü değerleri Tablo 5’ de verilmektedir.

Tablo 5. CBR ve Esneklik Modülü Değerleri

CBR Değeri (%)	Esneklik Modülü (psi)
$3 \leq \text{CBR} < 8$	5 842
$8 \leq \text{CBR} < 50$	9 389
$\text{CBR} \geq 50$	28 251

2.1.7. SSB Sınıfı ve Dayanımı

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) plak için hesaplarda kullanılan beton sınıfı C30/37 ve beton sınıfıyla uyumlu Beton Eğilme Dayanımı, 4.5 MPa (TS EN 12390-5) alınmıştır.

2.1.8. Temel ve Alttemel

Temel tabakası, üstyapının ana yapısal elemanlarından biri olup, alttemel ve tabana gelen basınç gerilmelerini kabul edilebilir seviyeye düşürmek ve belirli bir esneklik sağlayarak kaplamanın kırılmasını önlemek gibi işlevleri vardır. BSK üstyapılarının tasarımında KGM Esnek üstyapılar Projelendirme Rehberi (2008) ile uyumlu şekilde temel tabakası hesaplamalara dahil edilmiştir. SSB üstyapılar üzerine gelen yükleri tabanda geniş bir alana dağıttıklarından çok kalın bir temel/alttemel gerektirmezler. Bu nedenle SSB Plak altında temel tabakası kullanılmamış, gerekmesi halinde alttemel kullanılmıştır. Bu çalışmada hem BSK hem de SSB üstyapı tasarımında gerekmesi halinde alttemel tabakası kırmataş olması şartıyla 15 cm alınmıştır.

2.2. Üstyapı Kalınlık Tasarım Sonuçları

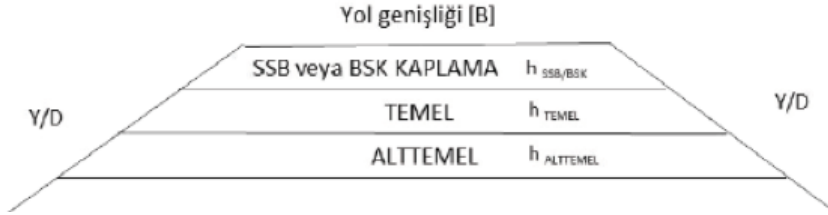
Proje ömrü boyunca ilgili yol kesiminden geçecek olan 3 farklı trafik değeri, 3 farklı taban zemini mühendislik özellikleri ve raporda bahsedilen kriterler göz önünde bulundurularak %60, %75 ve %90 güvenilirlik seviyeleri için ayrı ayrı hesaplanan SSB ve BSK üstyapı tabaka kalınlıkları Tablo 6' da verilmektedir.

Tablo 6. SSB ve BSK Yol Üstyapıları Kalınlıkları

I. SINIF YOLLAR [R = %90]															
Trafik Kategorisi															
YOGT	≤ 1000				1000-3000				3000-5000						
ÜSTYAPI TİPİ	BSK		SSB		BSK		SSB		BSK		SSB				
Temel	SN	20	20	-	-	SN	20	20	-	-	SN	20	20	-	-
Alttemel [cm]		15	-	15	-		15	-	15	-		15	-	15	-
CBR [%]	Üstyapı Kalınlıkları (cm)														
3 < CBR < 8	11.91	18	22	18	20	13.08	21	25	19	20.5	14.32	24	28	20.5	21.5
8 ≤ CBR < 50	10.21	15	18	17	19	11.26	17	21	18	20	12.38	19	23	19.5	20.5
CBR ≥ 50	6.89	15	15	15	17	7.75	17	17	16.5	18	8.60	19	19	18.0	18.5
T _{8.2}	6 199 822				12 366 056				24 698 523						
II. SINIF YOLLAR [R = %75]															
Trafik Kategorisi															
YOGT	≤ 500				500-1000				1000-2500						
ÜSTYAPI TİPİ	BSK		SSB		BSK		SSB		BSK		SSB				
Temel	SN	20	20	-	-	SN	20	20	-	-	SN	20	20	-	-
Alttemel [cm]		15	-	15	-		15	-	15	-		15	-	15	-
CBR [%]	Üstyapı Kalınlıkları (cm)														
3 < CBR < 8	9.90	13	17	16.5	18.5	10.49	14	19	16.5	18.5	11.80	17	22	18.5	20.5
8 ≤ CBR < 50	8.42	12	13	15.5	17.5	8.94	13	15	16	18	10.11	15	18	18	19.5
CBR ≥ 50	5.68	12	12	14	15.5	6.05	13	13	14.5	16	6.90	15	15	16.5	18
T _{8.2}	3 116 705				4 658 264				10 824 497						
III. SINIF YOLLAR [R = %60]															
Trafik Kategorisi															
YOGT	≤ 20				20-100				100-750						
ÜSTYAPI TİPİ	BSK		SSB		BSK		SSB		BSK		SSB				
Temel	SN	20	20	-	-	SN	20	20	-	-	SN	20	20	-	-
Alttemel [cm]		15	-	15	-		15	-	15	-		15	-	15	-
CBR [%]	Üstyapı Kalınlıkları (cm)														
3 < CBR < 8	5.89	6	7	14	16	6.83	8	10	14.5	16.5	9.08	11	15	16	17.5
8 ≤ CBR < 50	4.93	6	6	13	15	5.74	8	8	14	15.5	7.70	11	12	15	17
CBR ≥ 50	3.12	6	6	11.5	13.5	3.73	8	8	12	14	5.15	11	11	13.5	15
T _{8.2}	156 913				403 562				2 660 404						

3. Yol Üstyapı Maliyet Hesaplamaları

SSB ve BSK Yol üstyapılarının maliyet hesaplamaları $[L]=1\ 000\ m$ uzunluğunda ve $[B]=7,0\ m$ genişliğinde standart bir kırsal yol için yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Yol üstyapıları tabaka kesitleri

Malzeme miktarları hesaplanırken aşağıda belirtilen değerler esas alınmıştır.

Binder Yoğunluğu (\checkmark BİNDER) $[t/m^3] = 2,4$

Temel Yoğunluğu (\checkmark TEMEL) $[t/m^3] = 2,3$

Alttemel Yoğunluğu (\checkmark TEMEL) $[t/m^3] = 2,3$

Şev Eğimi $[Y/D] = 1/1$

Taşıma Mesafeleri $[Km] = 10$

İmalat fiyatları belirlenirken resmi kurumların 2019 Yılı Birim Fiyatları baz alınmış olup, Plentmiks Alttemel ve Plentmiks Temel birim fiyatları detayları Tablo 7' de verilmektedir. [ÇŞB, 2019], [KGM, 2019]

Tablo 7. Plentmiks Temel ve Alttemel Birim Fiyatları

PLENTMİKS TEMEL YAPILMASI						
Sıra No.	Poz No.	Poz. Tanımı	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	6100/3	Plent-miks temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	1	46,05	46,05 ₺
2	07.005/K	Plent-miks temel karışımları için gerekli agreganın plente taşınması (M=10 km. ye kadar)	ton	0,957	7,01	6,71 ₺
3	07.005/K	Plent-miks temel karışımı için gerekli suyun plente taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	0,043	2,22	0,10 ₺
4	07.005/K	Plent-miks temel için gerekli suyun serim yerine taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	0,011	7,01	0,08 ₺
5	07.005/K	Plent-miks temel malzemesinin plentten serim yerine taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	1	7,01	7,01 ₺
Genel Toplam [TL/ton]						59,94 ₺

PLENTMİKS ALTTEMEL YAPILMASI						
Sıra No.	Poz No.	Poz. Tanımı	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	6100/3-1	Plent-miks alttemel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	1	40,49	40,49 ₺
2	07.005/K	Plent-miks alttemel karışımları için gerekli agreganın plente taşınması (M=10 km. ye kadar)	ton	0,957	7,01	6,71 ₺
3	07.005/K	Plent-miks alttemel karışımı için gerekli suyun plente taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	0,043	2,22	0,10 ₺
4	07.005/K	Plent-miks alttemel için gerekli suyun serim yerine taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	0,011	7,01	0,08 ₺
5	07.005/K	Plent-miks alttemel malzemesinin plentten serim yerine taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	1	7,01	7,01 ₺
Genel Toplam [TL/ton]						54,38 ₺

3.1. SSB Yol Üstyapı Birim Fiyat Maliyetleri

SSB plak maliyetine etkileyen en önemli parametre kullanılan beton miktarıdır. Bunun yanısıra kimyasal kür yapılması ve derz kesimi gibi maliyetler de ikincil bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu üç maliyet kalemi için yapılan hesaplarda kullanılan analizler Tablo 8’ de verilmekte, bu analizler kullanılarak oluşturulan SSB Plak İmalat Birim Fiyatları (2019 yılı) Tablo 9’ da verilmektedir. [ÇŞB, 2019], [KGM, 2019]

Tablo 8. SSB Plak Maliyet Hesaplarına Esas Birim Fiyat Analizleri

BİRİM FİYAT NO	BİRİM FİYAT ADI					ÖLÇÜ
Y.SSB/01	SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) KARIŞIMININ HAZIRLANMASI, FİNİŞERLE SERİLMESİ VE SİLİNDİRLERLE SIKIŞTIRILMASI					m ³
Poz No	GİRDİLER	Ölçü	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı	
	Malzeme					
10.130.1506	C 30/37 beton harcı, HAZIR BETON HARÇLARI (TS EN 206-1)	m ³	1	167,00	167,00	
	Serme ve Sıkıştırma Karşılığı					
KGM/4466	Büyük Plent Ünitesi ile Hazırlanmış Olan Çimento Karışımının (Çimento Stabilizasyonu) Büyük FİNİŞERLE Serilmesi ve Silindirle Sıkıştırılması	ton	2,4	16,60	39,84	
Toplam					206,84	
Kâr ve Genel Masraf %25					51,71	
1 m³ Fiyatı					258,55	
BİRİM FİYAT NO	BİRİM FİYAT ADI					ÖLÇÜ
Y.SSB/02	SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) YOL YÜZEYİNE KİMYASAL KÜR YAPILMASI					m ²
Poz No	GİRDİLER	Ölçü	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı	
	Malzeme					
10.300.2062	Akrilik Esaslı Kür Malzemesi (Sıvı)	kg	0,35	4,95	1,73	
	İşçilik					
10.100.1015	Betoncu Ustası (İnşaat yerindeki yükleme, yatay ve düşey taşıma, boşaltma dahil)	sa	0,08	15,70	1,26	
Toplam					2,99	
Kâr ve Genel Masraf %25					0,75	
1 m² Fiyatı					3,73	

BİRİM FİYAT NO	BİRİM FİYAT ADI					ÖLÇÜ
Y.SSB/04	SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) YOL YÜZEYİNE DERZ YAPILMASI					m
Poz No	GİRDİLER	Ölçü	Miktarı	Birim Fiyatı	Tutarı	
	Derz Kesme Karşılığı					
19.100.1093	Derz kesme makinesi (maksimum kesme derinliği 160 mm-12 hp) (bıçağı, su deposu, vb.. dahil komple)	sa	0,05	29,26	1,46	
	İşçilik					
10.100.1062	Düz İşçi (İnşaat yerindeki yükleme, yatay ve düşey taşıma, boşaltma dahil)	sa	0,02	11,50	0,23	
Toplam					1,69	
Kâr ve Genel Masraf %25					0,42	
1 m Fiyatı					2,11	

Tablo 9. SSB Plak Birim Fiyatları

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB)						
Sıra No.	Poz No.	İŞİN ADI	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	SSB/01	Silindirle sıkıştırılmış Beton (SSB) karışımının hazırlanması, finişlerle serilmesi ve silindirlerle sıkıştırılması	m ³	1	258,55	258,55 ₺
2	07.005/K	Silindirle sıkıştırılmış Betonun Tesisten Sahaya Taşınması	m ³	1	16,83	16,83 ₺
Genel Toplam [TL/m³]						275,38 ₺
SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) KÜRÜ						
Sıra No.	Poz No.	İŞİN ADI	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	SSB/02	SSB Yol Yüzeyine Kimyasal Kür Yapılması	m ²	1	3,73	3,73 ₺
Genel Toplam [TL/m²]						3,73 ₺
SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) DERZ YAPILMASI						
Sıra No.	Poz No.	İŞİN ADI	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	SSB/04	SSB Yol Yüzeyine Derz Yapılması	m	1	2,11	2,11 ₺
Genel Toplam [TL/m]						2,11 ₺

3.2. BSK Yol Üstyapı Birim Fiyat Maliyetleri

BSK hesaplamaları kalınlık tasarımında eşdeğer binder kalınlığı esas alındığından, binder tabakası üzerinden yapılmış olup, maliyeti (2019 yılı) Tablo 10' da verilmektedir. [ÇŞB, 2019], [KGM,2019]

Tablo 10. Binder Tabakası Birim Fiyatları

BİNDER TABAKASI YAPILMASI							
Sıra No.	Poz No.	İŞİN ADI	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)	
1	6320	Asfalt betonlu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	1	83,78	83,78 ₺	
2	07.005/K	Binder için gerekli agreganın plente taşınması (M=10 km. ye kadar)	ton	0,955	7,01	6,70 ₺	
3	4300/1B	04.610/1B - Asfalt Çimentosu Penetrasyon Asfalt (Kırıkale)	kg	45	1,71	76,95 ₺	
4	07.006/K	Bitümlü malzemenin temin yerinden depo tankına kadar taşınması M=300 Km	ton	0,045	90,75	4,08 ₺	
5	435B	Katı bitümlü malzemenin sarını veya tanklarda emiş derecesine kadar ısıtılması (Makine ile)	ton	0,045	50,48	2,27 ₺	
6	07.005/K	Bitümlü Sıcak Karışımın (Binder) işbaşına taşınması	ton	1	7,01	7,01 ₺	
Genel Toplam [TL/ton]						180,79 ₺	

3.3. SSB ve BSK Maliyet Kıyaslama

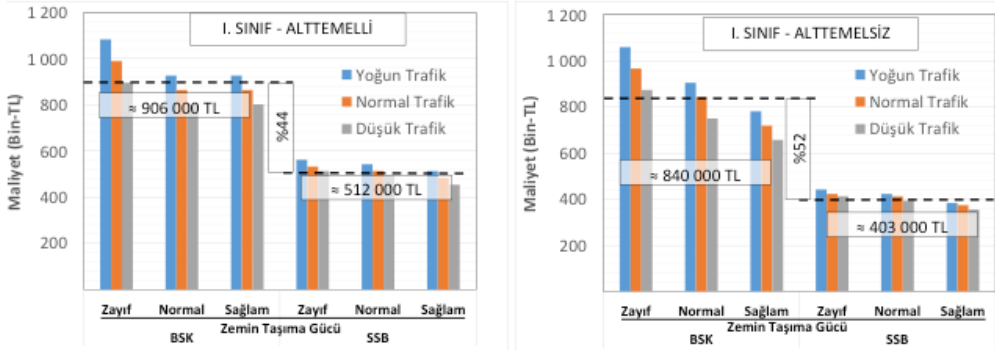
Yukarıda açıklanan SSB ve BSK birim fiyatları kullanılarak yol sınıfları, trafik kategorileri, alttemel, temel durumu ve taban zemini taşıma gücüne bağlı olarak her iki üstyapı tipine ait maliyetler belirlenmiş olup, Tablo 11’ de verilmektedir.

Tablo 11. Yol Sınıfları Bazında BSK ve SSB Yollar Maliyetleri [TL/km]

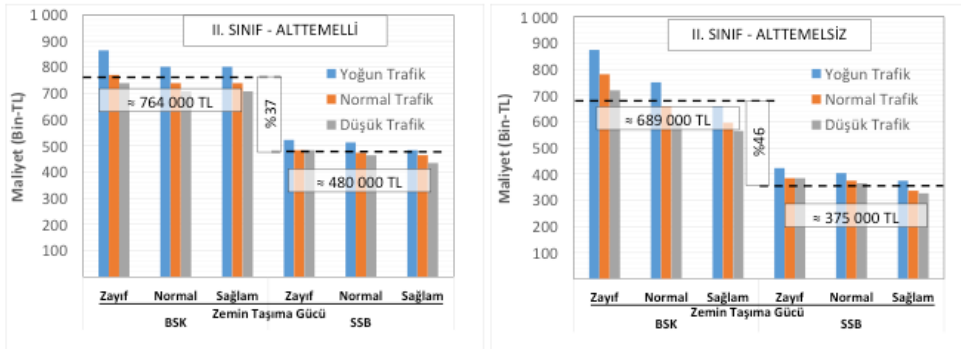
I. SINIF YOLLAR [R = %90]												
Trafik Kategorisi												
*YOGT	≤ 1000				1000-3000				3000-5000			
ÜSTYAPI TİPİ	BSK		SSB		BSK		SSB		BSK		SSB	
Temel	20	20	-	-	20	20	-	-	20	20	-	-
*Alttemel [cm]	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-
CBR [%]	MALİYETLER [Bin - TL]											
3 < CBR < 8	896	874	513	414	990	967	533	423	1 084	1 060	562	443
8 ≤ CBR < 50	802	751	493	394	865	843	513	414	927	905	542	423
CBR ≥ 50	802	658	454	356	865	720	484	375	927	782	513	385
T _{8,2}	6 199 822				12 366 056				24 698 523			
II. SINIF YOLLAR [R = %75]												
Trafik Kategorisi												
*YOGT	≤ 500				500-1000				1000-2500			
ÜSTYAPI TİPİ	BSK		SSB		BSK		SSB		BSK		SSB	
Temel	20	20	-	-	20	20	-	-	20	20	-	-
*Alttemel [cm]	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-
CBR [%]	MALİYETLER [Bin - TL]											
3 < CBR < 8	739	720	484	385	771	782	484	385	865	874	523	423
8 ≤ CBR < 50	708	596	464	366	739	658	474	375	802	751	513	404
CBR ≥ 50	708	565	434	327	739	596	444	337	802	658	484	375
T _{8,2}	3 116 705				4 658 264				10 824 497			
III. SINIF YOLLAR [R = %60]												
Trafik Kategorisi												
*YOGT	≤ 20				20-100				100-750			
ÜSTYAPI TİPİ	BSK		SSB		BSK		SSB		BSK		SSB	
Temel	20	20	-	-	20	20	-	-	20	20	-	-
*Alttemel [cm]	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-	15	-
CBR [%]	MALİYETLER [Bin - TL]											
3 < CBR < 8	520	411	434	337	583	503	444	346	677	658	474	366
8 ≤ CBR < 50	520	380	415	317	583	442	434	327	677	565	454	356
CBR ≥ 50	520	380	385	288	583	442	395	298	677	534	425	317
T _{8,2}	156 913				403 562				2 660 404			

Tablo 11’deki veriler farklı yol sınıfı, trafik yükleri ve zemin koşulları için incelenecek olursa;

- Şekil 4’den görüleceği üzere birinci sınıf yollarda her türlü zemin ve trafik yükünde SSB yollar BSK yollara kıyasla ortalama %44 daha ekonomik olarak imal edilebilmektedir. Eğer alttemel imal edilmeyecek olursa bu oran %52’lere kadar çıkabilmektedir.
- Şekil 5’den görüleceği üzere ikinci sınıf yollarda her türlü zemin ve trafik yükünde SSB yollar BSK yollara kıyasla ortalama %37 daha ekonomik olarak imal edilebilmektedir. Eğer alttemel imal edilmeyecek olursa bu oran %46’lara kadar çıkabilmektedir.
- Benzer bir analiz üçüncü sınıf yollarda yapılacak olursa yine her türlü zemin ve trafik yükünde SSB yollar BSK yollara kıyasla ortalama %28 daha ekonomik olarak imal edilebilmektedir. Eğer alttemel imal edilmeyecek olursa bu oran %32’lere kadar çıkabilmektedir.



Şekil 4. Birinci Sınıf Yollar için BSK-SSB Maliyet Karşılaştırması



Şekil 5. İkinci Sınıf Yollar için BSK-SSB Maliyet Karşılaştırması

4 Değerlendirme, Sonuç ve Öneriler

Bu bildiri kapsamında Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) ve Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yollar teknik ve maliyet açısından aynı proje ömrü ve zemin koşulları ile aynı trafik ve aynı yol sınıflarında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılırken kaynakçada belirtilen ve Ülkemizde genel olarak kullanılan resmi rehberler ile 2019 yılı Birim Fiyatları esas alınmıştır. Tasarımlar üç farklı zemin sınıfı, üç güvenilirlik seviyesi (Yol sınıfları) ve farklı trafik kategorileri esas alınarak yapılmıştır. Bu kapsamlı araştırma Ülkemiz kırsal yolları için BSK ve SSB üstyapı alternatiflerinin kalınlık ve maliyetler açısından karşılaştırılan ilk çalışma niteliğindedir. Çalışma sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Tüm yol sınıflarında, tüm trafik kategorileri ve taban zeminlerinde; SSB yollar BSK yollara göre daha ekonomiktir. Ekonomiklik oranı trafik yoğunluğu, zemin taşıma gücü, ve yol tipine göre değişmekle birlikte en yüksek trafik yoğunluğu, en kötü zemin ve birinci sınıf bir yolda %58'e kadar çıkarken, en hafif trafik yoğunluğu, en iyi zemin ve üçüncü sınıf bir yol için %17'ye kadar düşebilmektedir.
- Bildiri kapsamında yapılan maliyet analizlerinin tamamı ilk yapım maliyetleridir. Proje ömrü boyunca SSB ve BSK yollara yapılacak bakım ve onarım faaliyetlerinin miktar ve maliyetleri ayrıca değerlendirilmelidir. Bu amaçla yapılacak uzun dönem maliyet hesaplamalarında SSB yolların BSK yollara göre maliyet etkinliğinin daha da artacağı öngörülmektedir.

Kaynaklar

- ÇŞB (2019). SSB Yollar Birim Fiyat Analizleri ve Tarifleri
- KGM (2019). Yol, Köprü, Tünel, Bitümlü Kaplamalar, Bakım ve Trafik İşlerine Ait Birim Fiyat Listesi
- KGM (2013). Karayolu Teknik Şartnamesi
- Güngör, A., Sağlık, A. (2008). Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi
- Yaman, İ.Ö., Ceylan, H. (2015). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C., (2010). Guide for Roller Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University
- Ağar, E., Taşdemir, Y., (2007). “Silindir ile Sıkıştırılabilen Beton Yollar”, Türkiye Hazır Beton Birliği web-sitesi, <http://www.thbb.org> TMH - 487 - 2015/4 61
- Pittman, D., (2012). “U.S. Army Corps of Engineers Experience with Roller-Compacted Concrete Pavements”, Presented at a Symposium on Integrated Cement Based Pavement Solutions, Part 2: Roller Compacted Concrete Pavements, American Concrete Institute web-sitesi, <http://www.concrete.org>

- Adaska, W. (2006). Roller-Compacted Concrete (RCC), PCA Research& Development Information Serial No. 2975. Skokie, IL: Portland Cement Association
- Taylor, P.C.; S.H. Kosmatka; G.F. Voigt; et al. (2006). Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements, and Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University
- Neville, A.M., (1995). Properties of Concrete, Pearson Education Limited
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Mc- Graw Hill
- Portland Cement Association. 1987. Structural design for roller-compacted concrete for industrial pavements, Concrete Information. Publication IS233.01. Skokie, Illinois: Portland Cement Association
- Delatte, N. (2008). Concrete Pavement Design, Construction, and Performance, Abingdon, UK: Taylor and Francis
- Portland Cement Association. (2002). RCC-PAVE Computer Program. Item Code MC043. Skokie, IL: Portland Cement Association
- Öztürk, A., Yıldız, D. (1998). “Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Teknolojisi ve Türkiye’deki Uygulamaları”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri, No. 393, p. 39-46
- Özcan, S. (2008). “Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Farklı Yastık Karışımları ile Yapışma Verimliliği”, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Ecolanes publishable final report. (2010), <http://ecolanes.shef.ac.uk/>
- Yeğinobalı, A., Başkoca, A., (2005). “Geleceğin Yolu: Afyonkarahisar’daki Beton Yolun Hikayesi”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü Yayınları, Ankara.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Uçucu Kül ve Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Beton Yol Karışımlarının Basınç Dayanımı ve Durabilitesine Olan Etkilerinin Araştırılması

Fatih Acıkök¹, Orhan Canpolat¹, Mücteba Uysal², Yurdakul Aygörmez¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Özet

Bu çalışmada uçucu kül ve cürufun beton yol karışımlarına etkisi incelenmiştir. Bu mineral katkıların, beton yol karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımını nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu karışımlara durabilite deneyleri olarak basınç altında su işleme derinliği tayini ve donma çözülme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çimento dozajı 350 kg/m³, su/çimento oranı 0,42 alınmıştır. Mineral katkı kullanılmadan üretilen referans beton ve beton içerisindeki çimentoyla %20 oranında yer değiştiren uçucu külün (%20 UK) ve cürufun (%20 ÖGYFC) kullanıldığı beton olmak üzere 3 farklı tip beton karşılaştırılmıştır. Deneylerde 150 mm boyutlarında küp kalıplar kullanılmıştır. Çalışma, Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi'ne (2016) bağlı kalarak yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Beton yol, uçucu kül, cüruf, su geçirimsizliği, donma-çözünme dayanımı

1 Giriş

Beton yollar (rijit üstyapı) ise beton malzemesi ile yapılan ve üzerinden geçen tekerlek ve dingil yüklerini tabana dağıtan bir yol üstyapısıdır (Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, 2016). Beton yollar (rijit üstyapı) ve asfalt yollar (esnek üstyapı) dünyadaki birçok ülkede birbirlerinin ciddi alternatifleridir. İnşa edilecek yol için doğru tercih yapmak ülkenin kaynakları ve bütçesi, yoldan geçmesi düşünülen trafik yükü, zemin özellikleri vb. birçok faktöre bağlıdır.

Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2016 yılında çıkardığı "Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi" beton yol yapımını teknik ve uygulama açısından bir standarda bağlamıştır.

Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan bu küllere uçucu kül (UK) denilmektedir (Tokyay ve Erdoğan 1998) (Aruntaş, 2006) .

Uçucu küller betonun taze ve sertleşmiş haldeki bir çok özelliğine ve sertleşmiş betonun durabilitesine etki etmektedir. Uçucu küller, diğer puzolanlardan farklı olarak karışımın su ihtiyacını azaltmakla beraber işlenebilmeyi kolaylaştırır. Ancak kullanılan kül miktarı, külün inceliği ve karbon içeriği bu konuda etkileyici faktör olmaktadır (Özturan T).

Demir-çelik fabrikalarında yan ürün olarak meydana gelen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ise uçucu kül gibi taze ve sertleşmiş betona etkileri çok fazladır. Taze betonun su ihtiyacını azaltır ve işlenebilmesini kolaylaştırır. Hidratasyon ısısını düşürür ve priz süresini uzatır. Sertleşmiş betonun durabilite özelliklerini geliştirir, geçirimsizliğini düşürür. Betonun erken yaşlardaki dayanımını düşürür ama ileriki yaşlardaki dayanımı artırır.

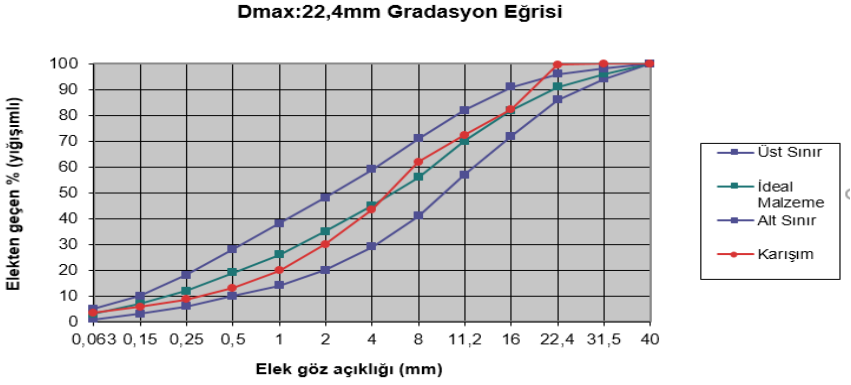
Dayanım, belirli yaştaki betonun gerilmelere ya da kuvvetlere karşı koyabilme yeteneğidir (Taylor v.d., 2006). Bu çalışmada beton yol karışımlarının 7 ve 28 günlük dayanım sonuçları incelenmiştir. Ayrıca bu karışımların durabilite testleri olarak basınç altında su geçirimsizliği ve donma çözünme deneyleri yapılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1 Kullanılan Malzemeler

2.1.1 Agregalar

Beton karışımlarında kalker agregası kullanılmıştır. Ankara Hisarlıkaya Taş Ocağından 3 grup (0-5 mm, 5-13 mm, 13-25 mm) halinde temin edilmiştir. TS 706 EN 12620 (Beton Agregaları) standardına uygundur.



Şekil 1. Agrega Granülometri Eğrisi

Tablo 1. Seçilen Karışım Yüzdeleri

Elek (mm)	% 49	% 21	% 30	Karışım
	0-5 kırma	5-13mm	13-25 mm	
40	100,0	100,0	100,0	100
31,5	100,0	100,0	100,0	100
22,4	100,0	100,0	98,4	100
16	100,0	100,0	41,0	82
11,2	100,0	97,6	9,2	72
8	100,0	58,8	1,5	62
4	86,9	2,3	1,3	43
2	59,7	1,3	1,3	30
1	39,1	1,3	1,3	20
0,5	25,5	1,2	1,3	13
0,25	16,2	1,2	1,3	9
0,15	10,3	1,2	1,3	6
0,063	6,0	1,1	0,9	3

2.1.2 Çimento

Beton karışımları ve deneyler için kullanılan çimento, CEM I 42.5 R Limak Çimento Fabrikasına ait Portland çimentosudur. TS EN 197-1 standardına uygundur.

Tablo 2. Karakteristik Değer Olarak Tanımlanan Kimyasal Gerekler

Kızdırma Kaybı	Çözünmeyen Kalıntı	Sülfat Miktarı (SO ₃ olarak)	Klorür Muhtevası	Puzolonik Özellik
% 3,23	% 0,44	% 2,47	% 0,01	UYGUN

Tablo 3. Karakteristik Değerler Olarak Verilen Mekanik ve Fiziksel Gerekler

Dayanım Sınıfı	Priz Başlama (dakika)			Genleşme (mm)		
	İstenen Değer	Deney Sonucu	Uygunluk Durumu	İstenen Değer	Deney Sonucu	Uygunluk Durumu
42,5 R	≥ 60	180	UYGUN	≤ 10	0,5	UYGUN

2.1.3 Uçucu Kül

Deneylerde AKSA Akrilik Kimya San. A.Ş firmasının ürettiği Uçucu Kül kullanılmıştır. TS EN 450-1 (Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1:Tarif,Özellikler,Uygunluk Kriteri) standardına uygundur.

Tablo 4.Uçucu Kül Özellikleri

Kızdırma Kaybı (%)	3,41
İncelik (%)	8,96
Serbest Kalsiyum Oksit (%)	0,065
Reaktif Kalsiyum Oksit (%)	1,55
Klorür (%)	0,0050
Sülfürik Anhidrit (%)	0,53
Tanecik Yoğunluğu (kg/cm³)	2339
Aktivite İndeksi (%) (28 günlük)	(28.03.2018) 91,3
Aktivite İndeksi (%) (28 günlük)	(28.03.2018) 101,7

2.1.4 ÖGYF Cürufu

Deneylerde Bolu Çimentonun ürettiği Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu kullanılmıştır. TS EN 15167-1 (Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu-Beton,Harç ve Şerbette Kullanım İçin-Bölüm 1:Tarifler,Özellikler ve Uygunluk Kriterleri) ve TS EN 15167-2 (Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu-Beton,Harç ve Şerbette Kullanım İçin-Bölüm 2:Uygunluk Değerlendirmesi) standartlarına uygundur.

Tablo 5.Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu Özellikleri

Kızdırma Kaybı (%)	0,01
MgO (%)	6,16
SO₃ (%)	0,22
Sülfür (%)	0,67
Klorür (%)	0,0177
Rutubet (%)	0,05
Na₂O (%)	0,90
K₂O (%)	0,53
Toplam Alkali (Na₂O Eşdeğeri) (%)	1,24

2.2 Karışım Bilgileri, Numune Alımı ve Kırım Bilgileri

Karışımın su/çimento oranı 0,42 seçildi.350 kg/m³ çimento dozajı ve C30/37 dayanım sınıfı belirlendi. Beton karışımı yapıldı ve taze beton standartlara uygun bir şekilde kalıplara yerleştirildi. Referans betonun sıcaklığı yaklaşık 23°C ölçüldü. %20 UK'lı beton ve %20 ÖGYFC'li betonun sıcaklığı 21°C ölçüldü. Numuneler 20±5 °C sıcaklıkta bağıl nemi %95 olan kür odasında 24 saat bekletildi. Sonra numuneler kalıplardan çıkarılıp, 20±2 °C'deki kür havuzuna koyuldu.

Tablo 6. Taze Beton Karışımlarının Slump ve Hava İçeriği Değerleri

	Referans Karışım	%20 UK'lı Karışım	%20 ÖGYFC'li Karışım
Slump (mm)	2	3	2
Hava Muhtevası (%)	5,4	5,7	4,5

2.3 Basınç Dayanımı Deneyi

Her karışım için 7 ve 28 günlük 3'er adet 150×150×150 mm'lik küp numuneler basınç dayanımı deneyi için kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi uygulanacak numuneler kür havuzundan çıkarıldı, bir süre üzerindeki suyun süzülmesi beklendi. Daha sonra yüzeyindeki fazla su kurulandı, merkezlenerek basınç deneyi makinasına yerleştirildi ve kırım işlemi yapıldı. Toplam 18 adet numune kırımı yapılmıştır (3 karışım için ayrı ayrı üçer adet 7 ve 28 günlük numuneler). 0,6 MPa/s (N/mm².s) yükleme hızı uygulanmıştır. Kırım TS EN 12390-3 standardına uygun yapılmıştır. Basınç deneyi makinası (Basınç Presi) TS EN 12390-4 standardına uygundur.

2.4 Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini Deneyi

Bu deneyde her karışım için 28 günlük, 150×150×150 mm'lik 1 adet küp numune olmak üzere toplamda 3 adet küp numune kullanıldı. Numunelerin su basıncı uygulanacak yüzeyi tel fırça ile pürüzlendirildi. Sonra ki işlemde numunelerin su alacağı yüzeyi silikonlanıp su alacağı yeri boşluklu olan su geçirmez bir malzemeye yapıştırıldı.

Daha sonra numuneler cihaza yerleştirilip sabitlendi. 72 saat süreyle 500 kPa su basıncı altında bırakıldı (Şekil 3).

Bu süre sonunda cihaz kapatıldı ve numuneler cihazdan çıkarılıp malzemeden ve silikondan arındırıldı. Numuneler basınç presinde ortadan ikiye ayrılacak şekilde kırıldı ve suyun işlediği en büyük derinlik cetvelle ölçülüp kaydedildi. Deney TS EN 12390-8 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirildi.



Şekil 2. Basınç altında su işleme derinliğinin tayini deneyi cihazı ve numuneler

2.5 Donma Çözülme Dayanımı Deneyi

Deneyde her karışım için 150×150×150 mm'lik 2 adet küp numune olmak üzere toplam 6 adet numune kullanılmıştır. Taze beton kalıplara koyulduktan sonra sıcaklığı 20 °C olan kür odasında 24 saat bekletildi. Sonra sertleşen numuneler kalıplardan çıkarıldı ve sıcaklığı 20 °C olan kür havuzuna koyuldu. Numuneler 7 gün sonra kür havuzundan çıkarıldı ve bağlı nemi %65 olan iklimlendirme kabineye yerleştirildi ve 20 gün süreyle bu kabinde bekletildi. 27. günde numuneler kabinden çıkarılıp küp numunelerin kütleleri 1 g hassasiyetle tartıldı. Daha sonra numuneler %97'si şebeke suyu, %3'ü NaCl olan donma sıvısının bulunduğu kaplara koyuldu Her karışımın 2 numunesi bir kaba koyulmak üzere toplam 3 adet kap kullanıldı. 1 gün sonra yani 28. gün donma sıvısından çıkarılan numuneler kurulanıp yeniden tartıldı ve sonuçlar kaydedildi. Böylece numunelerin kütle farkından emdiği donma sıvısı hesaplandı. Daha sonra numuneler yeniden kaplara yerleştirildi ve bu 3 kap donma çözülme kabineye koyuldu (Şekil 4). Donma Çözülme döngüleri Tablo 8'de gösterildiği gibi ayarlandı. Numunelere toplam 28 döngü uygulandı.

Tablo 7. Donma Çözülme Döngüleri

Süre (t), saat	Sıcaklık (T), °C		
	Üst Sınır	Anma Değeri	Alt Sınır
0	+22,0	+20,0	+18,0
2	+2,0	0,0	-2,0
4	+2,0	0,0	-2,0
14	-13,0	-15,0	-17,0
16	-13,0	-15,0	-17,0

7. döngü bitince numuneler çıkarıldı, numuneden kopan ve pullanan parçacıklar fırçayla hafif baskı uygulanarak temizlendi ve ufak bir kapta toplandı (Şekil 5). Donma sıvısı kâğıt filtreden süzülür ve filtrede kalan parçacıklar da aynı ufak kaba eklendi. Kabuk atma yoluyla kopan tüm parçalar 110 °C'de sabit kütle kadar kurutuldu ve tartıldı. Her 3 kap için de yani 3 karışım için de aynı işlem yapıldı.

Donma sıvıları yenilendi ve numunelerle birlikte kaplara koyuldu. 3 kap yeniden donma çözülme kabineye yerleştirildi ve döngülere devam edildi.

14. döngü bitince 7. döngüde yapılan işlemler tekrarlandı.

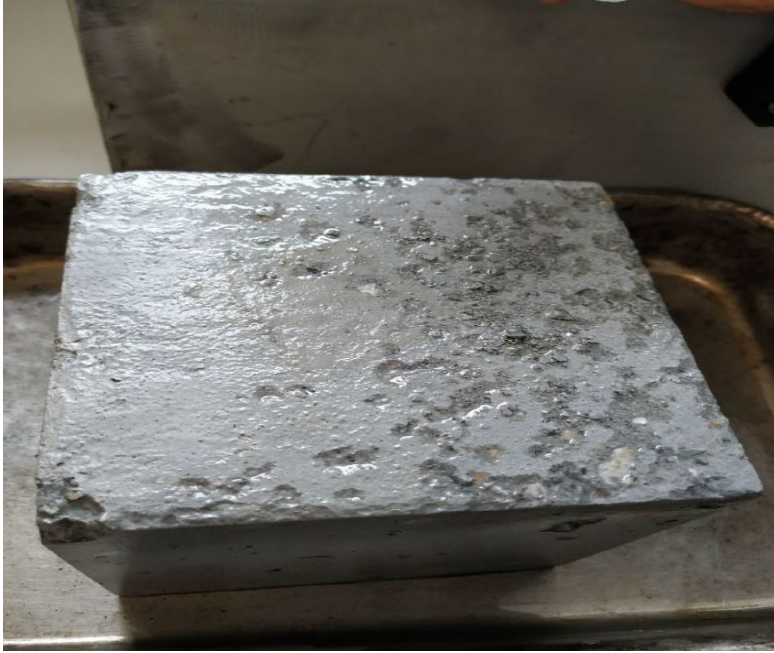
28. döngü bitince kabuk atma yoluyla kopan parçalar yine tartıldı ve deney sonlanmış oldu.

$$P = 100 \times \frac{m_{s,n}}{m_0}$$

P : Her kap içindeki 2 numunenin kütle kaybı, %

m_0 : Bir kap içindeki iki hava kurusu küp numunenin 27. gündeki kütlesi, g

$m_{s,n}$: Kabuk atma yoluyla uzaklaşan malzemenin yığılımlı kuru kütlesi.

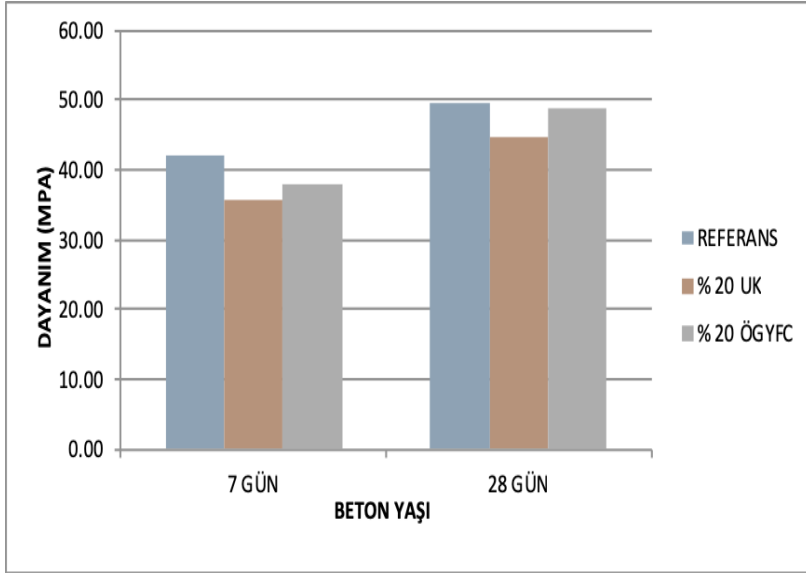


Şekil 3. Donma çözülme döngüleri esnasında beton yüzeyinin pullanması

3. Sonuçlar

Tablo 8. Basınç Dayanımı Sonuçları

	Referans Karışım (MPa)	Referans Karışım Ortalama (MPa)	%20 UK'lı Karışım (MPa)	%20 UK'lı Karışım Ortalama (MPa)	%20 Ögyfc'li Karışım (MPa)	%20 ÖGY-FC'li Karışım Ortalama (MPa)
7 Günlük Basınç Dayanımı	44,34	42,10	35,54	35,78	38,55	38,14
	41,52		36,34		38,41	
	40,44		35,46		37,47	
28 Günlük Basınç Dayanımı	47,94	49,48	44,87	44,85	47,95	48,84
	51,19		45,83		48,41	
	49,33		43,85		50,16	



Şekil 4. Basınç Dayanımları Grafiği

Tablo 9. Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini Deneyi Sonuçları

Referans Karışım	%20 UK'lı Karışım	%20 ÖGYFC'li Karışım
28,7 mm	18,4 mm	19,2 mm

Karayolu Teknik Şartnamesine göre zararlı kimyasal etkilere maruz kalacak beton yapılarda su geçirgenliği en fazla 30 mm olmalıdır. Tablo 10'daki sonuçlardan görüldüğü gibi üç karışım da bu değerin altındadır.

Tablo 10. Donma çözülme deneyi sonuçları

	Referans Karışım	%20 UK'lı Karışım	%20 ÖGYFC'li Karışım
m_o	8029,6	7837,8	7974,4
$m_{s,n}$ (g) 7.Gün	24,2	16,6	4,2
$m_{s,n}$ (g) 14. Gün	2,6	3,6	4,4
$m_{s,n}$ (g) 28. Gün	1,4	4,2	4,8
Toplam Kütle Kaybı (g)	28,2	24,4	13,4
2 Küp Numunenin Yüzey Alanları Toplamı (m²)	0,270		
Kütle Kaybı Ortalaması(kg/m²)	0,10	0,09	0,05

Beton Yol donma-çözülme direnci kategorilerinde donma-çözülme olayı olan ve buz çözücü maddelerin kullanıldığı yerlerde numunenin kütle kaybı ortalaması 0,5 kg/m²'den küçük olmalıdır. Üç karışım değeri de bu ortalamadan küçüktür ve donma çözülme koşullarına dirençlidir.

Her üç karışımın numuneleri, 28 günlük dayanımlarında 7 günlük dayanımlarına göre mukavemet kazanmıştır. %20 UK'lı karışım, bütün dayanım sonuçlarında diğer iki karışıma göre daha az mukavemet değerleri göstermiştir. 7 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımlarında Referans karışım, en yüksek değere sahiptir. Ama 28 günlük sonuçlar, %20 ÖGYFC'li karışımın dayanımlarında Referans karışımın değerlerine ulaştığını göstermektedir.

%20 ÖGYFC'li karışımınların 7 günlük ortalama dayanım değeri %20 UK'lı karışımınların 7 günlük ortalama dayanım değerinden yaklaşık 2,5 MPa daha büyüktür. Beton yolların erken trafiğe açılması açısından öğütülmüş yüksek fırın cürufunun uçucu küle göre küçük bir avantaj teşkil ettiği söylenebilir.

Durabilite, diğer birçok beton yapısına kıyasla beton yollar için daha fazla önem arz etmektedir. Çünkü beton yollara tesir eden çevresel etkiler çok fazladır. Taşıt trafiğinin yükü, taşıtlardan sızan yakıtların kimyasal etkileri, sülfat, alkali ve buz çözücü tuz etkileri, iklimle bağlı donma çözülme durumları vb. birçok etken beton yolların durabilitesini etkiler. Mineral

katkıların durabiliteyle alakalı olan donma çözülme, su geçiririrnililiği deneyleriyle ilişkisi bu çalışmada gözlenmiştir. Basınç altında su işleme derinliği deneyinde %20 UK'lı ve %20 ÖGYFC'li karışımı numunelerinin Referans karışımı numunelerine göre daha az geçirgen olduğu sonucuna varılmıştır.

Donma çözülme deneyinde de en az kabuk atma cürüflü karışımda en fazla kabuk atma Referans karışımda olmuştur. Bu sonuçlar mineral katkıların geçiririrnililiği düşürdüğünü ve donma çözülme direncini arttırdığını ispat etmiştir. Böylece mineral katkıların uzun vadede beton durabilitesine olumlu anlamda katkı vereceği söylenebilir.

Cüruf ve uçucu kül karşılaştırıldığında ise cürufun %20'lik çimentoyla ikame oranlarında uçucu küle göre hem dayanıma hem durabiliteye daha fazla katkı sunduğu görülmüştür. Diğer ikame oranlarında performanslarının araştırılması gerekmektedir.

Dayanıma ve özellikle durabiliteye sağladığı faydalarının yanında mineral katkıları, çimentoyla ikame edildiği için betonun ekonomisini de iyileştirir. Çünkü mineral katkıları çimentoya göre daha ucuz bir malzemedir.

Günümüzde dünyada beton malzemesi kullanılarak yapılan baraj, yol, köprü vb. bütün büyük yapılarda uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi mineral katkıları büyük ölçüde kullanılmaktadır. Ülkemizde bu mineral katkıların eksikliği konusunda sıkıntı olmadığı ve sağlayacağı büyük avantajları düşünülürse gelecek yıllarda yapılacak beton yollarda da mineral katkıların kullanılması tavsiye edilir.

Kaynaklar

- Acıkök, F. (2019). Mineral Katkıları İçeren Beton Yol Karışımlarının Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Acıkök, F. (2018). Effect of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag on The Strength of Concrete Pavement, Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 3:278-285
- Aruntaş, H., (2006). "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak.Der. Cilt 21, No 1, 193-203, Ankara
- Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, (2016), s.1
- Özturan T., "Beton Üretiminde Uçucu Kül Kullanımının İrdelenmesi", Bogaziçi Üniv.
- Taylor, P.C., S.H. Kosmatka, G.F. Voigt (2006). "Integrated Material sand Construction Practicesfor Concrete Pavements", A State-of-the-Practice Manual. Ames, IA: National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.
- Tokyay, M., Erdöğdu, K., (1998). "Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu", TÇMB, Ankara

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Driving Comfort on Concrete Pavements

Erwin Kohler

3ipe Pavement Engineering. Consultant, Santiago, Chile

Abstract

This article presents ways in which concrete pavements, as part of transportation infrastructure, are capable providing comfortable ride and other functional properties in addition to excellent structural performance. These attributes make concrete pavements the chosen alternative in many countries, not only for roads but also for airports. Among the functional properties, that is, those surface characteristics associated with comfort, we can count the smoothness or profile regularity, the micro and macro texture, the tire-pavement noise, and the friction or the ability to control the vehicles over the pavement surface, night time visibility, albedo or the reflection of solar radiation, and storm water handling. The article begins with types of concrete pavement, to later discuss their functional properties.

Keywords: *concrete pavements, smoothness, IRI, Tire Pavement noise, pavement friction.*

1 Introduction

Given the critical role that supply chains play in the economic well-being of and quality of life in every country around the world and the dependence of these supply chains on road infrastructure and regulation, it is imperative that the public sector and the private sector engage in the planning and construction of road infrastructure as well in the drafting and implementation of policy (adapted from Viljoen et al., 2014). Concrete pavements, that is, pavements made with Portland cement concrete, have long been known as a long lasting, durable pavement surface with low maintenance costs (Smith, 2007). Given the importance of quality in paved infrastructure, and the fact that many countries have used concrete pavements, the objective of this article specially written for the “First Concrete Roads Congress and Exhibition” is to present advantages of concrete pavements from a functional point of view.

2 Types of concrete pavements

It is important to distinguish between groups or “families” of concrete pavements. At the largest scale we could categorize concrete pavements for roads and for airfields.

2.1 Airfield pavements

Airfield pavements are not treated in this article, but it should be noted that worldwide there are many runways and taxiways that were built and more continue to be built with concrete pavements. Aprons are very often constructed with concrete (due to the problems with static loads that asphalt pavements have due to viscoelastic nature). A useful set of specifications are those from the Federal Aviation Administration. Professionals interested in concrete pavements for airfields should review the design and construction advisory circulars from the FAA, respectively know as AC 150/5320-6F and AC 150/5370-10H. It might be worth to note that, at a recent conference, when presenting about R&D update, an FAA representative indicated *“Many rigid airport pavements built to current standards already provide useful life in excess of 20 years. Flexible pavements may be structurally adequate, but often require several surface overlays before 20 years. The challenge to the FAA is to develop a pavement design procedure that is realistic for design periods up to 40 years.”* (Brill, 2019)

2.2 Road pavements

For road pavements, a classification could be made regarding their function or the type of infrastructure being served. There are highway pavements, urban pavements, low volume roads, warehouses/parking lots and ports or other heavy industrial facilities. Concrete pavements are an excellent alternative for each of these categories of use, but of course each one needs to be treated differently. This starts with the type of concrete pavement and its design/construction characteristics. A list of types of pavements and typical applications is shown in Table 1.

Table 1. Types of concrete pavements and typical applications

Type	Subtype	High-ways	Urban streets	Low volume roads	Ware-houses/parking lots	Ports / Heavy Facilities
JPCP ¹	Typ. slabs	x	x		x	
	Short slabs	x	x	x	x	
CRCP ¹		x				
RCC ¹		x ³		x	x	x
Pervious concrete			x		x	
Cem.stab. ²	Sealed	x ⁴	x	x	x	
	Unsealed		x	x	x	
Paving blocks ²			x	x	x	x

Notes

¹ JPCP: Jointed Plain Concrete Pav.; CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pav; RCC: Roller-compacted concrete.

² Cement stabilized soils and bases are sometimes not considered a type of concrete pavement. The same happens with paving blocks.

³ RCC in highways is used for shoulders, not for main traffic lanes

⁴ For cement stabilized pavement structures to be used in highways, a lasting riding surface needs to be utilized

Although a full description of each pavement type shown in Table 1 is beyond the scope of this article, a few explanations are deemed appropriate.

By far the most common type of concrete pavements is the JPCP, which could be doweled or undoweled. Typical slabs sizes come from the time of the AASHO road test, and have joints spaced between 3.5m and 5m, while the width of the slab matches the width of the lane, usually 3.5m or 3.6m. In recent years there has been a trend towards the use of what has been termed “short slabs”. They have a longitudinal joint in the middle of the lane, making them approximately 1.75-1.8m wide, and in length they are shorter than 2.3m, typically around 1.75m. CRCP is used in the United States and in some European countries (Belgium, UK). Because of the reinforcement, this type of pavement does not have transverse joints, and although more expensive, they are known to last longer (Roesler, 2016). RCC pavements are known for providing structural capacity, but not for their functional characteristics. Its advantages include construction with no forms, and there are no joints. RCC has been attracting interest in recent years (Better Roads, 2016). Pervious concrete pavements are a solution that can capture and store stormwater runoff, thereby allowing the runoff to percolate into the ground and recharge groundwater supplies (FHWA, 2012). It is used in city streets and parking lots. The construction is again different from the more traditional JPCP and CRCP in the sense that during placement, pervious concrete is not vibrated but instead is compacted using a rolling screed. Cement stabilized layers, although not considered a concrete pavement per se, are included here because they use cement and provide a solution to accessibility and bearing capacity problems. There are different types of stabilizations, from Cement-modified soils (CMS) to cement-treated bases (CTB) and full depth reclamation (FDR) where existing asphalt can be recycled. When it comes to driving comfort, another distinction needs to be made, and that is with regard to leaving the stabilized layer exposed or covering it with another layer. If exposed, as it has been used in Central America and the Caribbean with a solution called “*Unicapa*”, there is still a problem with dust, smoothness, and over time, with deformations. Concrete paving blocks provide a hard surface which might be aesthetically pleasing, comfortable to walk on, trafficable, durable and easy to maintain. They are often not considered a concrete pavement type, but are fully engineered products, manufactured in factory conditions, and they can be put into use immediately after installation.

3 Functional performance

This section is organized by “comfort parameter”, which is another way of calling something very often referred to as functional performance. The parameters that are explained are smoothness, macrotexture, noise and friction.

3.1 Smoothness

Advances in concrete paving construction equipment and in pavement evaluation techniques, coupled with Government agencies’ tenders having bonuses and penalties clauses, have helped getting smoother concrete pavements. The initial smoothness decreases the dynamic loading

on the pavement structure and helps the pavement stay smoother for a longer period of time, and this is by now a very well recognized phenomenon (Gillespie et al 1992; Misaghi et al, 2010; Bilodeau et al. 2015). Concrete's natural rigid structure also helps the pavement to stay smoother for a long period of time.

Since its development in the 1980s, the International Roughness Index (IRI) has become the standard for expressing pavement smoothness, and it can be computed using profile measurements obtained from different types of devices, such as laser profilometers, inclinometers (walking profilers such as the SurPro®), topographic surveys, or even in real-time during construction (Rasmussen et al 2013).

In the United States the acceptable IRI values for new concrete highway pavements range from 0.89 to 1.13 m/km (Merritt, Chang, and Rutledge 2015); A California study (Rezaei and Harvey 2013) measured 60 test sections, and the average IRI was 1.3 m/Km with the pavement age being mostly up to 15 years. The Minnesota DOT has specified initial IRI values of 0.781 m/km for their concrete pavements since 2012 (MnDOT 2015).

In Canada, a study showed that a concrete pavement section outperformed the adjoining asphalt pavement in road smoothness. After 8 years in service the IRI of the concrete pavement was 1.34 m/Km (Nouman, 2004). It is probably safe to state that new concrete pavement construction for highways in the US and Canada are open to traffic with IRI values around 1.0 m/Km.

In Latin American the specifications for smoothness vary from country to country but are not as low as in North America. Two cases are worth mentioning Uruguay and Chile: In Uruguay contractor are awarded bonuses when they achieve IRI levels better than the accepted levels, for instance Route 3, completed in 2019, had specification for IRI limit of 2.4 m/Km. That means the pavement is rejected if IRI is higher than that. If the contractor obtains IRI lower than 2.0 then he is paid a bonus. If IRI is between 2.2 and 2.4 he gets 50% of the bonus. It gets 75% of the bonus for IRI between 2.0 and 2.2 m/Km. Concrete pavement contractors perform daily checks on the IRI and adjust operations accordingly (Figure 1). In Chile, the limit is 2.0 m/km and it has been at level for more than 15 years. Contractors have no problems achieving it. Currently the Road Directorate is evaluating a possible reduction in IRI for new pavements and it is carrying out this discussion with the industry.



Figure 1. IRI daily check on concrete pavements with rotating inclinometer(top) and with SurPro (bottom)

3.2 Texture

The texture is created in the concrete surface prior to applying the curing compound. As shown later, this created texture provides the pavement with properties that affect tire noise and friction. Pavement texture is classified into two categories:

Microtexture – which is the fine-scale roughness on the surface of the pavement contributed by aggregate particles at the surface and the fine aggregate (i.e. sand) in the concrete matrix.

Macrotexture – which is the depth between aggregates or the measurable striations or grooves formed in the plastic concrete by hand-operated tining brooms or automated machines provides the wet weather friction. Macrotexture may also be formed by cutting or sawing grooves into the hardened concrete surface.

Among the different types of concrete pavements listed in Table 1, JPCP and CRCP are subjected to texturing. RCC are not generally textured and naturally offer a surface that resembles HMA. But they could also be textured after hardening, with diamond grinding

and/or grooving. Pervious concrete pavements offer a distinctive surface texture due to its gradation with little or no fines. Textures for various pavements are shown in Figure 2.

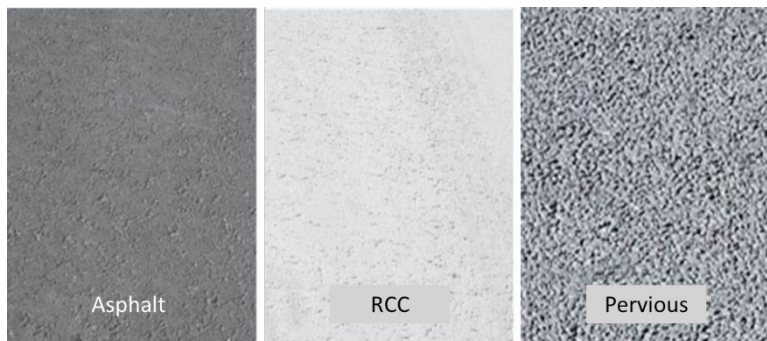


Figure 2. Surface texture appearance of asphalt, RCC and pervious concrete

3.3 Tire-pavement Noise

Roadside noise levels are a public concern especially when the pavement is in an urban environment. In developed countries there is an effort towards lowering the tire-pavement noise levels, which in the case of concrete pavements has to do with the development of new surface textures and with establishing acoustic performance for existing surfaces (to compare against asphalt over the pavement life). Efforts to date have focused on development of quieter diamond ground surfaces through alteration of the blade size, spacer arrangements. When looking at the acoustic performance of different pavement types one needs to consider the pavement characteristics throughout the pavements service life and not just the as-constructed or nearly new pavement condition. Most research to date shows longitudinally tined, turf drag textures, and diamond grinding textures provide the quietest new construction techniques for concrete pavement, while diamond grinding provides the quietest rehabilitation strategy. Most loud concrete pavements, however, have been constructed using random transverse tining.

There are two types of measurement techniques to evaluate tire-pavement noise levels. One is called the CPX (close proximity, ISO 11819-2 standard), and the other is called OBSI (on-board sound intensity, AASHTO T 360-16). The CPX and the OBSI methods capture the tire noise, as opposed to techniques with microphones on the side of the road that capture the overall traffic noise.

The results of a four-year study in California (Rezaei and Harvey 2013) on 60 concrete pavement test sections indicated that the OBSI levels for the three most commonly used texture types in California ranged from 104 to 107 dBA, with Diamond Ground (DG), and Diamond Grooved (Gr) sections typically being quieter than longitudinally tined (LT) sections of similar age.

In a separate study, the OBSI levels for experimental grind-and-groove sections averaged 101 dBA, which is not very different from quiet asphalt pavements.



Figure 3. Examples of concrete pavement textures (a) longitudinal tining, (b) diamond ground (c) diamond-grooved, and (d) surface burlap-drag

Several OBSI tire noise testing units are in operation in the United States and some other countries. The General Directorate of Highways in Turkey (Karayolları Genel Müdürlüğü) has operated an OBSI system (shown in Figure 4).



Figure 4. OBSI microphones for tire-pavement noise in Turkey and Chile

3.4 Friction

The microtexture is sufficient for most dry weather traffic operations, but rapidly loses effectiveness in providing tire-pavement friction as water film thickness increases. Macrottexture offers the potential to dissipate water pressure under tires on wet and flooded surfaces, thereby improving wet weather tire-pavement friction. All concrete pavement types offer good friction properties. The methods for measuring friction levels, however, are varied. In Turkey the “locked wheel” method has been traditionally used, in which a trailer is used and intermittently locks a wheel to measure the friction coefficient. Many countries use friction testers under “the fix-slip” principle, where the test tire is partially locked, so that it rotates, but it is partially dragged on the surface and therefore allows for continuous measurements. Equipment of this type include models such as the Norsemeter®, ASFT® and the Traction Watcher One (TWO)®.

3.5 Night Time Visibility

Darkness on a roadway decreases driver visibility, thereby increasing the potential threat of possible hazards on the roadway. Concrete pavement reflects light in a diffuse manner while asphalt reflects light in a slightly spectral manner. Light hitting concrete pavement is reflected at all angles, therefore, illuminating a greater area of the roadway compared to asphalt pavements [Smith 2007].

3.6 Albedo

Albedo is the degree to which a material reflects incoming solar radiation. It is similar to “reflectivity,” which is a measure of the reflectance of light in the visible spectrum, but albedo applies to all “light” from the sun including, infrared, visible and ultraviolet light. Albedo is measured on a scale of 0.0 to 1.0. Materials on the low end of the scale absorb solar radiation, while materials on the upper end of the scale reflect solar radiation. Cities are constructed of concrete, asphalt, glass, steel, and other building materials. These materials heat up from solar radiation during bright sunny days. Heat collected by these materials radiates into the local atmosphere, thus increasing the local temperature. At night, when the ambient air temperature typically decreases, objects with large amounts of heat energy radiate the heat for a considerable length of time. This can keep the local atmosphere from cooling to its maximum potential.

3.7 Storm water handling

Two aspects are important to mention with regard to storm water on concrete pavements. One is the potential for hydroplaning, and the other is the increasing interest on the permeability of pervious concrete pavements.

Potential for Hydroplaning Vehicles hydroplane when there is tire separation from the pavement surface by a layer of water, which causes loss of vehicle steering and braking control. All types of pavement whether gravel, asphalt or concrete have the potential for hydroplaning when it is raining or water is present on the surface. Concrete pavement can be textured while fresh (during construction) or re-textured after it has hardened, to provide for water to escape and therefore offer good friction and wet weather characteristics and performance. Another contributor to the superior performance of concrete pavements in wet weather conditions is its rigid structure. This quality prevents heavy vehicles from causing deformations such as ruts in the pavement surface where water can accumulate

Permeability. Pervious concrete allow stormwater to infiltrate directly. They are being applied in parking areas, as well as low-volume roadways, but pervious concrete pavements may also have some application on highways, where it could be used in shoulder and median construction for stormwater runoff mitigation. There may also be application for its use as a surface material to reduce hydroplaning, splash and spray, and mitigate tire-pavement noise. It requires hydrological design in addition to structural design, and the construction is different from other types of concrete pavements, because it is compacted not vibrated.

4 Conclusions

This brief article presented seven properties or surface characteristics of concrete pavements as a way to promote their use under the consideration that not only are structurally adequate but also comfortable, safe and good for the environment. The topics listed are:

- Smoothness
- Texture
- Tire-pavement noise
- Friction
- Night time visibility
- Albedo
- Storm water handling

Different types of concrete pavements solve different problems. Besides the traditional jointed concrete pavements there are nowadays concrete pavements with shorter joint spacing, or rolled compacted pavements and even pervious concrete pavements. There is no reason not to analyze concrete as a pavement alternative.

References

- ACPA, American Concrete Pavement Association. (2019) “Roller-compacted concrete (RCC) pavement” [http://wikipave.org/index.php?title=Roller-compacted_concrete_\(RCC\)_pavement](http://wikipave.org/index.php?title=Roller-compacted_concrete_(RCC)_pavement)
- Better Roads Magazine (2016) “Roller Compacted Concrete gaining momentum” <https://www.equipmentworld.com/roller-compacted-concrete-gaining-momentum/>
- Bilodeau J.P., Gagnon L., Dore G., (2015). “Assessment of the relationship between the international roughness index and dynamic loading of heavy vehicles”, International Journal of Pavement Engineering, 18:8, 693-701, DOI:10.1080/10298436.2015.1121780
- Brill, David R. (2019) “Airport Pavement R&D Update” presentation given at the ALACPA XV Seminar on Airport Pavements, San Jose, Costa Rica. June 2019
- FHWA Federal Highway Administration (2012) “Pervious Concrete” Advanced Concrete Pavement Technology program (ACPT) TechBrief FHWA-HIF-13-006
- Fontáns, D. , H. Machín, D. Míguez, A. C. Gonzalez, D. Violini, M. Pappalardi (2012) “New Resurfacing in Uruguay With Bonded Concrete Layer With Structural Synthetic Fibers Using High Performance Technology”, Argentinean Conference on Road and Traffic, 2012
- Gajda, J. W., Van Geem, M.G., (2001) “A Comparison of Six Environmental Impacts of Portland Cement Concrete and Asphalt Cement Concrete Pavement”, Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2068
- Gillespie T.D., Karamihas S.M., Sayers M., Nasim M. A., Hansen W., Ehsan N., Cebon D. (1992) “Effects of heavy vehicles characteristic on pavement response and performance”. Final Report, The University of Michigan.
- Guada, I.M. A. Rezaei, J.T. Harvey, and D. Spinner (2013) “Evaluation of Grind and Groove (Next Generation Concrete Surface) Pilot Projects in California” Research Report UCPRC-RR-2013-01
- Li, H; J T Harvey; T J Holland; and M Kayhanian (2013) “The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management” <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/015023>
- Misaghi S., Nazarian S., Carrasco C. J., (2010). Impact of Truck Suspension and Road Roughness on Loads Exerted to Pavements, The University of Texas, El Paso
- Nouman Ali (2004) “Case Study of the Portland Cement Concrete Pavement Section of the Trans-Canada Highway 104 In Nova Scotia”
- NSTPW, Nova Scotia Transportation and Public Works, (1999) “Asphalt Concrete Pavement and Portland Cement Concrete Pavement, Highway 104, Cumberland County, Year 5 of 5 Year Study, October 1999.
- Rasmussen, R. O., H. N. Torres, R. C. Sohaney, S. M. Karamihas, and G. Fick. (2013). Real-Time Smoothness Measurements on Portland Cement Concrete Pavements during Construction. SHRP 2 Report S2-R06E-RR-1. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Rezaei. A. and J. Harvey (2013) “Investigation of Tire/Pavement Noise for Concrete Pavement Surfaces: Summary of Four Years of Measurements” UCPRC Research Report UCPRC-RR-2013-12

- Roesler, Jeffery R., Jacob E. Hiller, and Alexander S. Brand, (2016) “Continuously Reinforced Concrete Pavement Manual” Federal Highway Administration. Report FHWA-HIF-16-026
- Smith, Tim and Pierre-Louis Maillard (2007) “The Sustainable Benefits of Concrete Pavement”, Paper presented at the 42e Congrès annuel de l’AQTR, Canada
- Viljoen, Nadia; Quintin van Heerden, Livison Mashoko, Esbeth van Dyk, and Wilna Bean (2014) “Logistics Augmentation to the Freight-Truck-Pavement Interaction Pilot Study: Final Report”. Univ. of California Pavement Research Center, Research Report No.: UCPRC-RR-2014-02

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Calcium Aluminate Cement Base Concrete Road Application

Metehan Severoğlu, Melike Sucu, Tuğhan Delibaş

Çimsa Cement R&D Center Mersin, Turkey

Abstract

Calcium aluminate cements (CAC) and their products are different from portland cement by their chemical and physical properties. This type of cement shows great performance of thermal stability, quick strength gain, quick setting, durability, acid and sulfate resistance. It is possible to create fast, practical and durable repair concrete designs using CAC. All around the world, this kind of systems are used in various application areas. The main difference between ordinary portland cement and calcium aluminate cement originated from the dissimilarity of chemical compositions. With ordinary Portland cement; C_2S and C_3S phases exist and with the water addition, the C-S-H and C-H hydrates are formed. On the other hand, CAC has calcium and aluminum oxides and the reaction product is monocalcium aluminate (CA) which gives calcium aluminate hydrates when the hydration occurs. With CAC, it is also possible to obtain practical, fast and long-lasting concrete floors. The source of CAC performance is that the nature of the hydrates is resistant to abrasive conditions. In particular, alumina hydrate (gibbsite) imparts performance-enhancing properties and is usually present in the form of AH_3 . The calcium component in the other hydrates forms the AH_3 phase after dissolving in the acidic environment, allowing the hollow structure in the concrete to fill with this phase and protect the concrete against attack. Due to chemical and mechanical corrosion resistance, CAC is also preferred on industrial floors.

Key words: *concrete road, calcium aluminate, corrosion resistance*

1 Introduction

High performance in cement is usually appointed to high compressive strength. However, durability in concrete is gaining higher importance for the sustainability of building safety. From raw materials to manufacture, calcium aluminate cement differs greatly from ordinary portland cement. Calcium aluminate cement is special cement superior to ordinary portland cement in terms of early and late compressive strength and durability due to these differences. While ordinary portland cement gains compressive strength in 28 days, calcium aluminate cement gains compressive strength in 6 hours. It means that calcium aluminate cement can reach the 28-day strength level of ordinary cement in 6 hours. Also, calcium aluminate cement is resistant to sulfate and acid attack and abrasion.

Calcium aluminate cement-based concrete is being preferred in a wide variety of field applications according to the purpose of use and properties of calcium aluminate cement. We aim to give information about different applications in literature and the real-life application examples conducted by Çimsa R&D Center.

1.1 Chemistry and Micro Structure

The main difference between calcium aluminate cement (CAC) and portland cement (PC) is the different phases resulting in different setting time and hardening. The phases of PC are alite and belite and these phases react with water to form C-S-H and C-H hydration product phases. On the other hand, CAC phases are CA and mayenite and these phases react with water to form krotite and other hydration products. CAC has a variety of types differentiated by their aluminum oxide content.

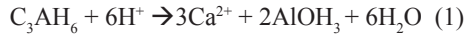
The hydration products of CAC are highly associated with temperature. When temperature is lower than 15°C, CAH_{10} is formed. Between 15-25°C, $C_2AH_{8,5}$ is formed and above 25°C, C_3AH_6 and AH_3 are formed (Scrivener, 1998). CAH_{10} and $C_2AH_{8,5}$ are metastable phases and C_3AH_6 is stable phase. When metastable phases convert to stable phase, volume changes occur. This phenomenon is called conversion reaction and with conversion reaction, volume decrease takes place, resulting in porosity and consequently loss of compressive strength.

One of the most important parameters in terms of early and late compressive strength is water/cement ratio. Concrete design should always be done according to the long term compressive strength expectation. Sixty years of laboratory researches in literature have shown that the optimum value of water/cement ratio for prevention of loss of compressive strength is 0.4 and below.

1.2 Chemical Abrasion Resistance

The hydration products of PC are C-S-H and C-H and are highly basic. Thus, PC is susceptible to abrasion and degeneration due to acidic environment. As a result, the top coat of PC is completely lost and aggregates become visible.

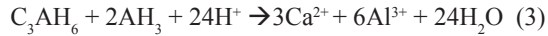
On the other hand, CAC hydration products are acidic in nature. Especially AH_3 hydration product renders this cement stable until pH3-4. Other hydration products of CAC lose their calcium in acidic media, causing AH_3 phase to form. This phase fills the porosity inside concrete, increasing stability against environmental factors (Sorrentino and Sorrentino, 1995).



Below pH 3.5, alumina hydrates begin to dissolve. During these reactions, further acid neutralization takes place.



Overall reaction:



In low pH values, there is a mid-section with neutral pH values between the acidic surface and concrete core. The alumina hydrates in this section buffer against the acid, preventing corrosion of concrete. This is a section of low permeability and high density (Ehrich,1999).

Table 1 shows that the loss of mass in sewage systems built with CAC is lower than the loss in the systems made with mineral cement or PC.

Table 1. Loss Mass and Thickness of Sample

	CAC+ Synthetic Aggregate	CAC+ Silica Sand	Mineral Cement + Silica Sand	PC+ Silica Sand
w/c	0.38	0.32	0.32	n/a
Cement	510	600	400	n/a
Porosity	11.4	13.4	15.9	n/a
Age	1 month	1 month	3 years	n/a
Loss Mass %				
After 2 years	0	0.1	1.8	n/a
After 2.5 years	0	1.2	1.8	n/a
Thickness				
After 2 years	0	0.2	n/a	1
After 2.5 yeas	0	0.6	1.2	1.7(3 years)

1.3 Corrosion Stability

Corrosion is related with different mechanisms so corrosion stability of concrete is so important. Utilization of CAC in repair of dam deformations caused by abrasion is becoming widely used.

1.4 Industrial Floors

Due to its stability against chemical and mechanical corrosion, CAC is preferred in industrial floors as well. Roads where heavy industrial vehicles are used, breweries, dairy farms and laboratory floors are examples to preferred application areas of CAC. Cryogenic installations that may be subject to mechanical shock are also an application area of CAC.

1.5 Novel Application Areas

All the CAC properties leads this type of cement used in distinct areas. The main application areas for the CACs are;

- Technical Mortars,
- Castable Applications,
- Sewage Liners,
- Repair Concrete Applications,
- Acid Pools,
- Chemical Production Sites,
- Dairy Farms,
- Industrial Floors,
- Ports etc.

2 Results

2.1 Case Study 1: Cac Based Concrete Road

The aim of this study is construct a concrete road in the cement factory packaging and stock unit that is exposed to heavy vehicle traffic regularly and this road should meet the demand for early strength gain and abrasion resistance to make the unit implementation quickly. For that purpose, calcium aluminate cement is used in the recipes of concrete design.

A CAC-based concrete road application of 100 square meters has been done in Çimsa Cement Mersin CAC factory with the purpose of developing a concrete product that can reach 30MPa in 6 hours, thus responding to the need of fast concrete application and early compressive strength. The formulations with and without additives that are used in this study are developed by Ready-Mixed-Concrete Laboratory and Cement Research and Application Center. Ready Mixed Concrete and Cement Research and Application Center jointly worked and 4 different

recipes were developed with different performance capabilities. Then, these different recipes are applied on-site in for distinct joints. Long-term performance will be observed and benchmarked with the Portland Cement based concrete road which was applied near the CAC based one. The crack formation and the durability of the roads will be recorded in yearly basis. In the first trial, 400 kg/m³ CAC are used and additives are used to achieve the desired setting time. Due to the reactive nature of CAC, hydration begins rapidly in concrete mixer. Thus, if very early compressive strength is not a requirement, retarder additives are advised. The parameters and results of the study are as follows:



Figure 1. The Concrete Road Production



Figure 2. Application of the Concrete

Table 2. Concrete Road Mix Design

	Concrete Road Recipes with Additives -Mix1-	Concrete Road Recipes with Additives + Fibers -Mix2-	Concrete Road Recipes without Additives +Fibers -Mix3-	Concrete Road Recipes with LiCO ₃ -Mix4-
CAC amount (kg/m ³)	400	400	400	400
Water amount (kg/m ³)	160	160	188	190
w/c	0,40	0,40	0,47	0,475
Pozolith 100X (kg/m ³)	1,2	1,2	-	1,2
LiCO ₃ (kg/m ³)	-	-	-	0,064
PP fibers (kg/m ³)	-	0,6	0,6	-
HP300 – Plasticizer (kg/m ³)	5,2	5,2	-	-
0-4 cm Aggregate (kg/m ³)	938	938	940	938
5-12 cm Aggregate (kg/m ³)	357	357	295	295
12-22 cm Aggregate (kg/m ³)	585	585	608	607
Slump (cm)	12	10	10	10
4 hours (MPa)	0,0	0,0	0,0	26,1
6 hours (MPa)	0,0	0,0	30,2	29,6
24 hours (MPa)	29,7	25,8	33,4	45,1
2 days (MPa)	31,2	33,1	37,9	51,4
7 days (MPa)	35,9	37,1	45,1	56,5

Note: Compressive strength values collected from 15*15*15cm cubes.

Although setting time was long in the first mix, loss of early compressive strength was observed due to the additives. Thus, in case of fracture risk, fiber application was applied in the second concrete mix. In the third concrete mix, additives were removed from the recipe to increase the early strength gain. In the last study, setting time was like CAC and rapid hardening was observed so workability values become lower than expected. Mix3 is chosen as the best concrete design for the CAC based road applications.

To prevent adverse events in concrete mixer, water and fiber were added to concrete at the time of application. In the study without additives, setting time was shortened with respect to the concrete with additives to as low as 45 minutes.



Figure 3. Finished Joints

As a result, additives were shown to increase workability by lengthening setting time, enabling their use in application areas where workability is a requirement and early compressive strength is not. Furthermore, it was shown that the product should be used without additives where early compressive strength is needed. The last mixture design includes LiCO_3 which act as an accelerator.

As in all concrete applications, curing is very important for early compressive strength in CAC applications in road trials. Curing environment must be provided early in the process.

Recipes containing CAC have proven to be suitable for repair concrete applications where early compressive strength is needed. Mixture 3 satisfy the needs of early strength gain, workability and corrosion resistance. The first example of such concrete application in Turkey has been successfully applied to an area subjected to high heat in İzmir Iron-Steel factory in 2013 and the second one is in the Çimsa Cement Factory. As production rate and performance requirements increase in the near future, CAC applications in concrete sector will be also increased.

2.2 Case Study 2: CAC Based Repair Concrete

The purpose of this study to develop a system with the aim of satisfying quick concrete repair needs. This type of repair concretes is mostly used in airport maintenance, concrete road repairs and the structures in the need of continuous operating.

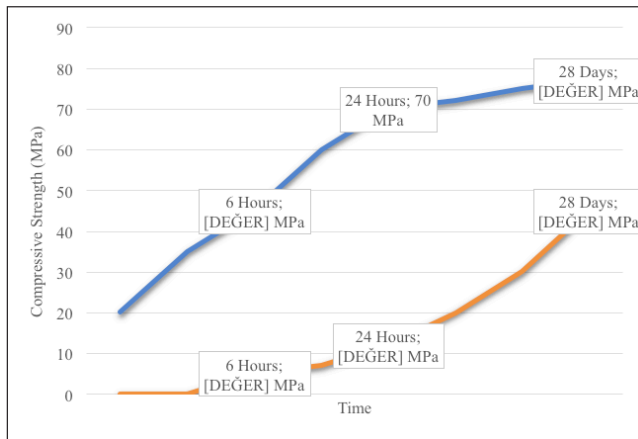


Figure 4. CAC Dominant Repair Concrete Strength Results

The strength improvement of this system can clearly be seen from the Figure4. Also, in the system design, the usage of macro and micro fibers leads to a higher ductility values. In figure 5 Re3 values represents the ration of equivalent deflection results and the with the appropriate fiber usage there is a 40% of momentum capacity increase than the non-fiber recipe.

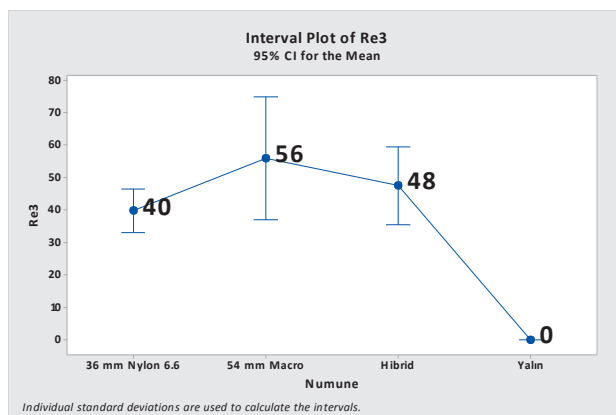


Figure 5. Equivalent Deflection Results



Figure 6. CAC Concrete Mix with Fibers

3 Conclusion

In the light of all information, the experiments identified the following points;

- The aim of this study is the construction of a concrete road in the cement factory, which is regularly exposed to heavy traffic. This road should meet the demand for early strength increase and abrasion resistance to allow the realization of the plant quickly.
- Cimsa Cement Mersin's CAC plant has developed a 100-square meter CAC-based concrete pavement application with the goal of developing a concrete product that can reach 30 MPa in 6 hours to meet rapid concrete application and early strength requirements.
- Four different studies were conducted. The first study, the mixture was prepared without fiber additive. The setting time was long in this study, loss of early compressive strength was observed due to the additives. In the later study, the fiber additive was added in the

mixture. The third mixture, Additives were removed from the recipe to increase early strength development. In the last study, rapid cure was observed, so that the workability was lower than expected.

- Mix3 is chosen as the best concrete design for the CAC based road applications.

4 References

- S. Ehrich, Work of doctoral thesis, University of Hamburg, 1999.
- K.L. Scrivener, Calcium aluminate cements, in: P.C. Hewlett (Ed.), LEA'S Chemistry of Cement and Concrete, 4th ed., Arnold, London, 1998, pp. 709–778.
- D. Sorrentino, F. Sorrentino, C.M. George, Mechanisms of hydration of calcium aluminate cement, in: J.P. Skalny (Ed.), Materials Science of Concrete, Vol. IV, American Ceramic Society, Westerville, OH 1995, pp. 41–90.

Doğal Koşullarda, Atık Lastik Eklenmiş Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yolların Performanslarının, Geleneksel Beton Yolların Performanslarıyla Karşılaştırılması

Hasan Çağdaş Taşkınsu¹, M. Karacasu²

¹Devlet Su İşleri 3.Bölge Müdürlüğü, Proje ve İnşaat Şube Müdürlüğü, Eskişehir, Türkiye

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye

Özet

Yapımında asfalt sericileri ve silindirleri kullanılabilen, silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yollar, ağır taşıtların ve yüklerin taşınmasında uygun bir çözüm olarak düşünülmektedir. Günümüzde petrol bazlı bir üretim olan asfalt yollara alternatif olarak, yerli bir üretim olan beton yollar ve SSB yollar bazı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, atık ürünler olarak bilinen uçucu kül ve atık lastik, SSB yol ve geleneksel beton yol karışımlarında çeşitli oranlarda kullanılmıştır. Oluşacak etkileri görebilmek için, 20x50x100 cm'lik 10 adet kalıpta, 1 adet atık lastiksiz SSB, 1 adet hacimce %5 toz lastik içeren SSB, 1 adet hacimce %15 toz lastik içeren SSB, 1 adet hacimce %5 parça lastik içeren SSB ve 1 adet hacimce %15 parça lastik içeren SSB, 1 adet atık lastiksiz C30/37 geleneksel beton, 1 adet hacimce %5 toz lastik içeren C30/37 geleneksel beton, 1 adet hacimce %15 toz lastik içeren C30/37 geleneksel beton, 1 adet hacimce %5 parça lastik içeren C30/37 geleneksel beton ve 1 adet hacimce %15 parça lastik içeren C30/37 geleneksel beton numuneleri hazırlanarak, doğal koşullara bırakılmıştır. Karışımlar belirli aralıklarla fotoğraflanarak, yüzeysel değişimler gözlemlenmiştir. Karışımlardan 90, 115, 140 gün sonunda 3'er adet toplamda 90 tane karot alınarak; karotlar üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre SSB numunelerinin tümünde, atık lastik kullanılması, doğal koşullarda betonların dayanımını kontrol karışımına oranla düşürmüştür. Kontrol karışımına en yakın basınç değeri %5 toz lastik içeren SSB numunesi olmuştur. Geleneksel beton numunelerinde atık lastik kullanılması da

kontrol karışımına oranla dayanımları düşürmüştür. Ancak %5 parça lastik içeren geleneksel beton numunesi 140. günde kontrol karışımının basınç değerlerine çok yaklaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: SSB Yol, Geleneksel Beton Yol, Atık Lastik, Doğal Koşullar

1 Giriş

Ülkemizde karayollarının kullanım oranı, ulaşım türlerine göre, yük taşımacılığında %90, yolcu taşımacılığında ise %88'dir (KGM, 2019). Karayolu ağındaki 2159 km'lik otoyolların tümü asfalt betonu, 31021 km'lik devlet yollarının yaklaşık %98,8'lik kısmı asfalt betonu ve sathi kaplama, 34153 km'lik il yollarının da yaklaşık %89,7'lik kısmı asfalt betonu ve sathi kaplama olarak inşa edilmiştir. Sathi cinsine göre yol ağı uzunlukları Tablo 1'de gösterilmiştir. Günümüzde petrol bazlı bir üretim olan asfalt yollara alternatif olarak, yerli bir üretim olan beton yollar ve SSB (silindirle sıkıştırılmış beton) yollar bazı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 1. Sathi cinsine göre yol ağı (KGM, 2019)

SATHİ CİNSİNE GÖRE YOLAĞI (KM)							
01.01.2019 tarihi itibarıyla							
	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Diğer Yollar	TOPLAM
Otoyol	2.159	-	-	-	-	-	2.159
Devlet Yolları	17.520	13.115	58	27	-	301	31.021
İl Yolları	4.403	26.218	23	537	443	2.320	34.153
TOPLAM	24.082	39.333	290	564	443	2.621	67.333

Karayolu Ulaşım İstatistikleri 2017 yılı verilerine göre devlet il yollarında km'de 127.997 (Milyon) taşıt, 262.739 (Milyon) ton yük ve 314.734 (Milyon) yolcu taşınmıştır (KGM,2017). Ülkemizde 2019 yılı itibarıyla de trafiğe kayıtlı yük taşıyan taşıt sayısı 4.612.332'dir (KGM, 2017). Yük taşıyan taşıtlar genellikle taşıma kapasitelerinin üzerinde yük taşımaktadır. Bu durum özellikle esnek üstyapı olarak tasarlanmış asfalt yollarda bozulmalara yol açar, asfalt yolların bakım onarım maliyetlerini artırır ve servis ömürlerini kısaltır. Yapımında asfalt sericileri ve silindirleri kullanılabilen, silindirle sıkıştırılmış beton yollar, ağır taşıtların ve ağır yüklerin taşınmasında uygun bir çözüm olarak düşünülmektedir (Yaman ve Ceylan, 2013).

Günümüzün hızlı gelişen teknolojisi beraberinde endüstriyel ürünleri, endüstriyel ürünler ise beraberinde endüstriyel atıkları getirmektedir. Endüstriyel atıkların depolanması, doğal çevreden uzaklaştırılması ya da yok edilmesi yüksek maliyet gerektiren bir durumdur. Bu sebepten günümüz bilim insanları, oluşan atıkların yeniden kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Bu çalışmada, SSB yol karışımlarına, atık bir ürün olan uçucu küllü beraber, belirli oranlarda

ve ebatlarda atık lastik eklenerek numuneler oluşturulmuş ve bu numuneler aynı şekilde atık lastik eklenmiş normal beton yol numuneleriyle birlikte doğal koşullara bırakılarak, numunelerdeki değişimler incelenmiştir. Belirli periyotlarda çekilen fotoğraflarla numunelerin yüzeysel değişimleri gözlemlenmiş ve belirli periyotlarda numunelerden alınan karotlarla yapılan deneylerle, karışımlara eklenen atık malzemelerin doğal koşullardaki rijit üstyapıların dayanımına etkisi araştırılmıştır.

2 Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Bu çalışmada yapılan deneylerdeki SSB ve geleneksel beton karışımlarında, ÇİMSA Çimento Sanayii ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

GRİ PORTLAND ÇİMENTO			STANDART : TS EN 197-1 CEM I 42,5 R		
Kimyasal Özellikler	Sonuçlar	Test Metodu	Standart Değerler		
			En Az	En Çok	
Kızdırma Kaybı	%	3,38	-	5	
Çözünmeyen Kalıntı	%	2,00			
Kükürttrioksit (SO ₃)	%	2,95			
Klorür (Cl ⁻)	%	0,050	XRF	-	0,10
Fiziksel Özellikler	Sonuçlar	Test Metodu	Standart Değerler		
			En Az	En Çok	
Priz Başlangıcı	Dakika	150	EN 196-1,3	60	-
Hacim Genleşmesi	mm	1		-	10
Standart Kıvam	%H ₂ O	27		-	-
Özgül Ağırlık	gr/cm ³	3,09		-	-
Blaine	gr/cm ²	3880		-	-
2 Günlük Basınç Dayanımı MPa		28,1		20	-
28 Günlük Basınç Dayanımı MPa		53,4		42,5	52,5

SSB karışımlarında mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Termik santrallerde öğütülen kömürün yanma reaksiyonlarından sonra açığa çıkan, atık bir ürün olan uçucu kül, mineral katkıların en

yaygın olarak kullanılmaktadır (Taşdemir, 2002). SSB'nin işlenebilirliğini artıran ve karışımın çatlama davranışını önemli derecede etkileyen uçucu külün genellikle sıcak havalarda SSB yol yapımında kullanılması önerilmektedir (Ağar ve Taşdemir, 2007). Karışımında kullanılan uçucu külün özellikleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Kullanılan uçucu külün özellikleri

	Sonuçlar	Metot
Kızdırma Kaybı %	1,01	TS EN 196-2
Klorür (Cl) %	0,0084	TS EN 196-2
SO ₃ %	0,46	TS EN 196-2
Serbest CaO %	0,00	TS EN 451-1
SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ %	88,31	TS EN 196-2
SiO ₂ %	58,17	TS EN 196-2
Al ₂ O ₃ %	20,21	TS EN 196-2
Fe ₂ O ₃ %	9,93	TS EN 196-2
Aktivite İndeksi 28 gün %	76,5	TS EN 196-1
Aktivite İndeksi 90 gün %	90,5	TS EN 196-1
Genleşme mm	2	TS EN 196-3
Tanecik Yoğunluğu kg/m ³	2017	TS EN 196-6
Priz Başl. Süresi Deney Çim./ Ref. Çim	1,34	TS EN 196-3
Su İhtiyacı %	-	TS EN 450-1

Yapılan deneylerde atık lastik de kullanılarak, atık lastiğin doğal koşullara bırakılan SSB yol ve geleneksel beton yola etkileri araştırılmıştır. Kullanılan atık lastiğin özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Lastik Kauçuğun Özellikleri

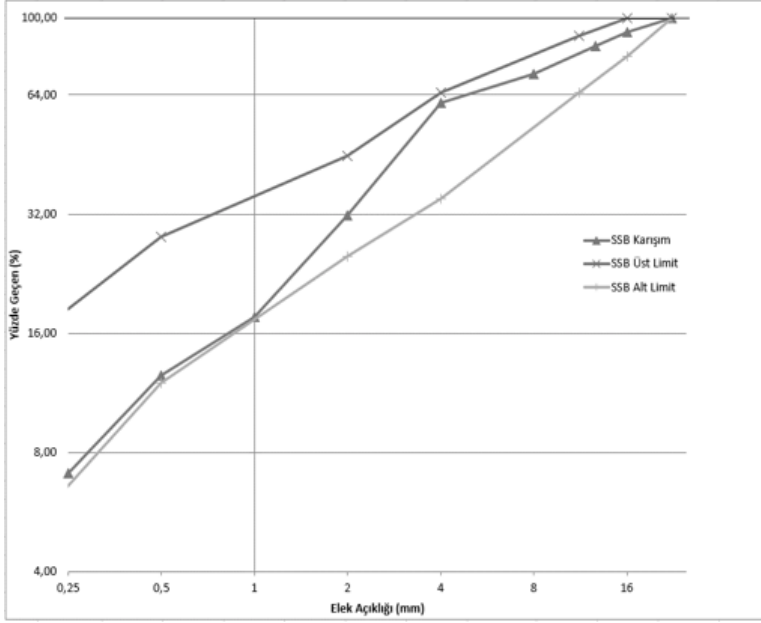
Malzemeler	Özellikler	Değerler
Lastik Kauçuğu	Aseton %	15,5
	Kül %	6
	Karbon Siyahı %	29,5
	Kauçuk Hidronkarbonları%	49
Toz Lastik	Özgül Ağırlık	0,4 gr/cm ³
Parça Lastik	Özgül Ağırlık	0,5 gr/cm ³
Toz Lastik	Boyut	4.0 mm'lik elekten %100'ü geçmektedir.
Parça Lastik	Boyut	4.0 mm'lik elekten %100'ü geçmektedir.

Üretilen numunelerde bir hazır beton tesisinden temin edilen 0-4 mm, 4-11 mm ve 11-22 mm tane boyutunda, 3 grup kırma taş agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregaların maksimum tane çapı 22 mm olup, yıkanmış ve kurutulmuş agregaya kullanılmasına özen gösterilmiştir. SSB karışımları büyük oranda agregaya içerdiğinden, agregaların özellikleri SSB'yi büyük oranda etkiler. Karışımlardaki tane boyutu azaldıkça pürüzlülük de azalır ancak ince malzemenin yüksek oranlarda kullanılması da gerekli bağlayıcı miktarını artırdığından tasarımda ekonomiklik-pürüzlülük kıyaslaması yapılmalıdır. Karışımlarda kullanılan agregaların elek analizi değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Agregaya elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	0 – 4 mm Agregaya (% geçen)	4 – 11 mm Agregaya (% geçen)	11 – 22 mm Agregaya (% geçen)
22,4	100	100	100
16	100	100	47,87
12,7	100	98,43	1,57
8	100	36	0
4	93,6	1,87	0
2	48,73	0	0
1	27,13	0	0
0,5	19,23	0	0
0,25	10,93	0	0
0,125	5,07	0	0

SSB karışımlarında, TÇMB Silindirele Sıkıştırılmış Beton Yollar Teknik Şartnamesi'nde belirtilen (TÇMB, 2018) SSB gradasyonu baz alınır, 0-4 mm malzemeden %65, 4-11 mm malzemeden %20, 11-22 mm malzemeden de %15 oranında kullanılarak karışım, maksimum sıkışmayı verebilecek gradasyon limitlerine göre ayarlanmıştır. Karışımın toplam beton kütlelerinin ağırlıkça %80' i oranında agregaya kullanılmıştır. Yüksek oranda kullanılan agregalar, taze betonun ve sertleşmiş betonun özelliklerini büyük ölçüde etkiler (Ragan, 1988). Şekil 1'de karışımın gradasyonunun TÇMB gradasyon limitlerinin içerisinde kaldığı görülmektedir.



Şekil 1. SSB Agrega Gradasyonu

Geleneksel beton karışımlarında, aynı agregalardan, bir hazır beton tesisinden getirilen C30/37'lik, 1 m³'te 350 kg bağlayıcı içeren ve 0,5 su/bağlayıcı oranlı), hazır beton kullanılmıştır. Geleneksel betona atık lastikler belli oranlarda eklenerek karışımlar hazırlanmıştır.

2.2 Yöntem

SSB numuneleri “TÇMB 2018 Silindire Sıkıştırılmış Beton Yollar Şartnamesi” gradasyonuna uygun şekilde hazırlanmış olup, geleneksel beton yol numuneleri için ise bir hazır beton tesisinden temin edilen, standartlara uygun C30/37 hazır beton, kullanılmıştır. Atık lastikler karışımlara transmikserlerde eklenmiştir. Oluşacak etkileri görebilmek için, 20x50x100 cm'lik 10 adet kalıpta, 1 adet atık lastiksiz SSB, 1 adet hacimce %5 toz lastik içeren SSB, 1 adet hacimce %15 toz lastik içeren SSB, 1 adet hacimce %5 parça lastik içeren SSB ve 1 adet hacimce %15 parça lastik içeren SSB (hacimce yapılan atık lastik eklemeleri, karışımın hacminin yüzdesiyle, aynı hacimdeki 0-4 mm lik agreganın atık lastikle yer değiştirilmesi şeklinde yapılmıştır.), 1 adet atık lastiksiz C30/37 geleneksel beton, 1 adet hacimce %5 toz lastik içeren C30/37 geleneksel beton, 1 adet hacimce %15 toz lastik içeren C30/37 geleneksel beton, 1 adet hacimce %5 parça lastik içeren C30/37 geleneksel beton ve 1 adet hacimce %15 parça lastik içeren C30/37 geleneksel beton numuneleri (hacimce yapılan atık lastik eklemeleri, karışımın hacminin yüzdesiyle, aynı hacimdeki 0-4 mm lik agreganın atık lastikle yer değiştirilmesi şeklinde yapılmıştır.) hazırlanarak, numunelerden TS EN 12504-1

standardına göre karot alınmıştır. SSB ve C30/37 geleneksel beton numuneleri TS EN 12504-1 standardına uygun olarak basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca doğal koşullara maruz bırakılan numuneler belirli periyotlarda fotoğraflama yöntemiyle gözlemlenerek fiziksel değişimleri belirlenmiştir. SSB tasarımında kullanılan malzemeler ve miktarları Tablo 6'da gösterilmektedir

Tablo 6. SSB karışımının 1 m³'lük miktarları

Karışımlar	Çimento (kg)	Agrega (kg)			Su (kg)	Uçucu Kül (kg)	Atık Lastik (kg)
		0-4 (mm)	4-11 (mm)	11-22 (mm)			
Kontrol	300	1280,5	394	295,5	130	40	-
%5 Toz Lastik	300	1146,5	394	295,5	130	40	20
% 15 Toz Lastik	300	878,5	394	295,5	130	40	60
%5 Parça Lastik	300	1146,5	394	295,5	130	40	25
%15 Parça Lastik	300	878,5	394	295,5	130	40	75

SSB karışımları düşük su/bağlayıcı oranında tasarlanmaktadır ve bu oran 0.20 ile 0.40 arasında değişmektedir (Ragan, 1988). Karışım, uygun agregada gradasyonunda hazırlandıktan sonra su/bağlayıcı oranı 0.20 ile 0.40 arasında kalacak şekilde su miktarı ve bağlayıcının hacimce %15 ile %20'si arasında uçucu kül miktarı belirlenmiştir. Uçucu kül SSB kaplamanın tuza karşı olan soyulma direncini azalttığından %25'ten fazla kullanımı önerilmemektedir (Mehta ve Monteiro, 2006). Çimento ve diğer malzeme miktarları daha önce sahada kullanılan SSB yol uygulamalarına benzer, gerekli aralıkları sağlayacak şekilde seçilmiştir. Karışım oranları belirlenen SSB reçeteleri, bir hazır beton tesisinin beton santralinde, üretilerek daha önceden hazırlanmış olan 20x50x100 cm'lik kalıplara, beton mikserleriyle taşınıp döküm gerçekleştirilmiştir.

TÇMB 2018 SSB Yollar Teknik Şartnamesi'ne göre silindirlerin ulaşamayacağı bordür, kalıplar ve duvar yanları gibi bölgelerin sıkışması vibrasyonlu plakalı sıkıştırıcılar, vibrasyonlu tokmaklar veya elle çekilebilen vibrasyonlu silindirlerle yapılır. Sıkıştırma kullanılan lastik tekerlekli silindirlerin lastik başına düşen yükü en az 3500 kg olmalıdır (TÇMB, 2018). Bu doğrultuda sıfır slump'lu SSB'nin, döküm işlemleri tamamlandıktan sonra, 3,5 tonluk sıkıştırma kuvveti uygulayan vibrasyonlu kompaktörle, Şekil 2'de görüldüğü üzere, kalıpta sıkıştırılması sağlandı. Sıkıştırma işlemine döküm işleminin hemen ardından başlandı ve SSB'nin imalatı santralden çıkışından itibaren 60 dk içerisinde tamamlandı.



Şekil 2. Vibrasyonlu kompaktörle SSB'nin sıkıştırılması

Sıkıştırma işlemi tamamlanan SSB karışımları, 1 hafta sonra, kür işlemi uygulanmadan, doğal koşullarda bırakılmak üzere taşındı ve kalıplar söküldü. Kalıpları sökülen SSB numuneleri, doğal koşullara maruz bırakılarak, belirli zaman aralıklarında fotoğraflanıp, yüzey değişimleri gözlemlendi. Ayrıca belirli periyotlarla alınan karotlarla da mekanik özelliklerindeki değişimler test edildi.



Şekil 3. SSB ve Geleneksel Beton numuneleri

SSB beton yol numuneleri üretildikten sonra yine kalıplar hazırlanarak C30/37'lik hazır betondan, aynı şekilde 20x50x100 cm boyutlarında 0.1 m³'lük 1 adet atık lastiksiz beton, 1 adet hacimce %5 toz lastik içeren beton, 1 adet hacimce %15 toz lastik içeren beton, 1 adet hacimce %5 parça lastik içeren beton ve 1 adet %15 parça lastik içeren beton üretilmiştir. 0,1

m³'lük numuneler, dökümden bir hafta sonra, kür işlemi uygulanmadan, SSB numunelerinin yanına aynı doğal koşullara maruz bırakılmak üzere taşındı. Şekil 3'te SSB ve Geleneksel beton numuneleri aynı doğal koşullarda görülmektedir.

Kalıpları sökülen geleneksel beton numunelerinin belirli zaman aralıklarıyla fotoğraflaması yapılarak yüzey değişimleri gözlemlendi ve belirli periyotlarla numunelerden alınan karotlarla da doğal koşullara bırakılan, çeşitli oranlarda atık lastik içeren geleneksel betonun mekanik özellikleri test edildi.

3 Bulgular ve Sonuç

Hazırlanan karışımlar, doğal koşullara maruz bırakıldıktan sonra, 20 Mart (90. Gün) 15 Nisan (115. Gün) ve 10 Mayıs (140 Gün.) tarihlerinde, herbir karışımdan 3'er adet alınan 10 cm çapında ve 10 cm uzunluğundaki karot numuneleri tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur ve ortalama basınç dayanımları belirlenmiştir. Tek eksenli basınç deneyine göre basınç dayanım değerleri Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Tek eksenli basınç deneyi sonuçları

Karışım	Atık Lastik Oranı	Basınç Dayanımları (MPa)		
		90. Gün	115. Gün	140. Gün
SSB Kontrol	0	77,01	66,48	71,46
SSB5TL	%5 Toz lastik	61,66	52,07	65,16
SSB15TL	%15 Toz Lastik	62,55	57,73	61,90
SSB5PL	%5 Parça Lastik	72,60	59,78	60,79
SSB15PL	%15 Parça Lastik	42,24	32,65	50,55
C30 Kontrol	0	53,35	52,38	58,34
C305TL	%5 Toz Lastik	39,18	46,55	47,05
C3015TL	%15 Toz Lastik	51,74	35,95	35,30
C305PL	%5 Parça Lastik	45,59	48,99	55,75
C3015PL	%15 Parça Lastik	52,64	40,35	44,06

Karışımların maruz bırakıldığı doğal koşullar, Eskişehir Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden alınan verilere göre, günlük toplam yağış miktarı, günlük minimum sıcaklık, günlük maksimum sıcaklık ve günlük ortalama sıcaklık bakımından değerlendirilmiştir. Hazırlanan karışımların doğal koşullara bırakılmasıyla, karot alınan günler arasında bir yaklaşımda bulunulduğunda, özellikle Mart ayı sonu ve Nisan ayı ortaları arasındaki dönem (1. ve 2. karot dönemleri arası) yağışlı gün sayısının en az olduğu dönemdir. Ayrıca bu dönemde minimum sıcaklık haritasına göre, minimum sıcaklığın sıfırın altına inip tekrar çıkması ve aynı şekilde tekrar sıfırın altına inip tekrar çıkmasıyla donma-çözülme etkilerine maruz kalmıştır. Karışımlar Aralık ayı sonunda doğal koşullara bırakıldığından buradan sonraki dönemde en düşük sıcaklıklar yaşanmış ve sonrasında da 1. karotların alındığı döneme kadar sıcaklık miktarları giderek artmıştır. 1. ve 2. karotların arasındaki dönemde artıp azalmalar olmuş ve en kurak günler bu aralıkta yaşanmıştır. 2. karot alınımından sonrasında ise sıcaklıklar tekrar artmaya başlamış ve yağışlı gün sayısı da giderek artış göstermiştir.

Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre 90. günde en yüksek basınç değeri SSB kontrol karışımına aittir. En yüksek ikinci basınç değeri ise %5 parça lastik içeren SSB numunesidir. 90. günde %5 toz lastik ve % 15 toz lastik içeren numuneler 3. ve 4. yüksek basınç değerlerine sahipken, en düşük basınç değerleri % 15 parça lastik içeren SSB numunesine aittir. 140. günde alınan son karotlara göre ise SSB kontrol karışımı yine en yüksek basınç değerine sahip olarak kalmıştır fakat ilk başta 4. sırada yer alan % 5 toz lastik içeren SSB karışımı en yüksek ikinci basınç değerine ulaşmıştır. İlk başta 2. ve 3. yüksek basınç değerlerine sahip % 5 parça lastik içeren SSB karışımı ve % 15 toz lastik içeren SSB karışımı ise 4. ve 3. yüksek değerlere ulaşmışlardır. % 15 parça lastik içeren SSB karışımı ise en düşük değerlerde kalmıştır.

Atık lastik ilave edilmesi SSB betonlarının dayanımını düşürmüştür. Karışımlar atık lastik ebatları bakımından incelendiğinde ise atık lastik ebadı arttıkça (toz lastik – parça lastik kıyaslaması) dayanım düşmüştür. Ancak en düşük SSB karışımının bile 140. günün sonunda 50 MPa 'ın üzerinde bir değer vermesi bütün karışım numunelerinin yol yapımında kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılacak yolun durumuna göre gerekli ekonomik analizler yapıp, çimento miktarı düşürülüp atık lastikler de kullanılabilir.

Karışımlardan alınan numunelerin tümünde 1. ve 2. karot değerleri arasındaki zamanda basınç değerlerinde düşme olmuştur. Bu dönem yağış ve sıcaklık haritalarına göre en kurak dönemdir. Ayrıca bu dönemde karışımlar donma ve çözülme reaksiyonlarına daha çok maruz kalmıştır.

Doğal koşullara bırakılan C 30/37 geleneksel beton ve atık lastik eklenmiş C 30/37 geleneksel beton numunelerinden alınan karotların, tek eksenli basınç deneyine göre değişimleri gözlemlenmiştir. C 30/37 kontrol karışımı 90. 115. ve 140. günlerde geleneksel beton numuneleri arasında en yüksek basınç değerlerine ulaşmıştır.

SSB karışımlarının basınç değerleri, %15 parça lastik eklenmiş SSB hariç, diğer geleneksel beton karışımlarının hepsinden yüksektir. SSB karışımları içerisinde doğal koşullardan en az etkilenen karışım, SSB kontrol karışımından sonra, % 5 toz lastik eklenmiş SSB karışımıdır.

Atık lastik oranı değiştirilerek gerekli basınç dayanımını sağlayacak optimum bir değer bulunabilir. SSB karışımlarının tümü 140. günde 50 MPa'm üzerinde basınç değerlerine ulaşmıştır ve bu değer yol yapımında kullanılabilir niteliktedir.

SSB numunelerinde atık lastik eklenmesi, karışımların hepsinde dayanımları kontrol karışımına oranla düşürmüştür. Bu durum zaten silindirle sıkıştırılarak içindeki hava oranının tamamına yakını atılan SSB'nin içinde atık lastiklerle boşluk oluşturulmasının sonucunda betonun, doğal koşulların oluşturduğu çevresel etkilerden daha çok etkilenmesiyle açıklanabilir. Ayrıca uçucu kül içeren, kür ve bakım uygulanmayan numunelerde doğal koşulların etkisiyle dayanım düşmesi son derece normaldir. Uçucu kül gibi puzolanlar, "kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve nemli ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler" olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003). Buradan yola çıkarak; Portland Çimentosunda bulunan C_2S ve C_3S hidratasyon sonucu kalsiyum hidroksit olarak karışımda bulunmaktadır ve ortamın nemi, yani su miktarı arttıkça uçucu kül kalsiyum hidroksit ile birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Daha kuru bir ortamda puzolanlar daha az bağlayıcılık özelliği gösterecektir. Yani kür koşulları ve bağıl nem oranı puzolan içeren karışımları daha fazla etkilemektedir. Kür uygulaması uçucu kül içeren numuneler için son derece önemlidir. Genel olarak ikinci kırımarda dayanımların düşmesinin, birinci ve ikinci kırımaların arasındaki dönemin günlük yağışlık ve sıcaklıkları incelendiğinde en kurak geçen dönem olduğu göz önünde bulundurularak, kür uygulanmaması sonucunda puzolanların ihtiyacı olan nemli ortamın oluşmamasından kaynaklandığı, üçüncü kırımarda dayanımların artmasında ise 2. ve 3. kırım zamanları arasında geçen dönemin yağışlı gün sayısının daha fazla olduğu tespitiyle beraber, gerekli nemin doğal yollarla sağlandığı sonucuna varılmıştır.

SSB karışımlarına eklenen atık lastikler, ebatları bakımından incelendiğinde yani %5 toz lastik eklenmesi - %5 parça lastik eklenmesi, %15 toz lastik eklenmesi - % 15 parça lastik eklenmesi kıyaslaması yapıldığında, atık lastik ebatları arttıkça dayanımlar düşmüştür. SSB karışımlarına eklenen atık lastikler, oranları bakımından incelendiğinde yani % 5 toz lastik eklenmesi - % 15 toz lastik eklenmesi, % 5 parça lastik eklenmesi - % 15 parça lastik eklenmesi kıyaslaması yapıldığında, atık lastik oranları arttıkça dayanımlar düşmüştür. Gerekli dayanım değerlerine daha az kayıpla ulaşabilmek adına SSB karışımlarında daha düşük yüzdelerde daha küçük ebatlı toz lastik kullanımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Atık lastik eklenmiş geleneksel beton numunelerinde genel olarak dayanım yine kontrol karışımına oranla, SSB numunelerindeki gibi düşmüştür. Ancak %5 toz lastik ve %5 parça lastik eklenen numunelerin dayanımları ilerleyen zamanlarda doğal koşullardan negatif yönde etkilenmeyerek artış göstermiştir. 140. günün sonunda %5 parça lastik içeren geleneksel beton yol numunesi kontrol karışımına büyük ölçüde yaklaşmıştır. Bu durum geleneksel betonun içinde gerekli boşlukların oluşturulmasıyla, günlük sıcaklık ve yağış miktarları incelendiğinde 1. ve 2. karot zamanları arasında geçen zamanda sıcaklığın eksi ve artı değerlere geçmesiyle beraber oluşan donma-çözülme etkilerinden, oluşan boşluklar sayesinde diğer numuneler gibi etkilenmemesi şeklinde açıklanabilir. %5'in üzerinde atık lastik eklenen geleneksel beton

numunelerinden %15 toz lastik içeren geleneksel beton numunesi karışımların en düşük basınç değerine ulaşarak C30/37 hedef dayanımının uzağında kalmıştır. Geleneksel beton yol numuneleri için %15 toz lastik ve % 15 parça lastik kullanımı, fotoğraflarla tespit edilerek, yüzeysel olarak aşınma ve kopmalara neden olduğundan yol yapımında bu oranda atık lastiğin kullanılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Geleneksel beton karışımlarına eklenen atık lastikler ebatları bakımından incelendiğinde, 140. günün sonunda atık lastik ebadı arttıkça, dayanım yükselmiştir. Geleneksel beton karışımlarına eklenen atık lastikler oranları bakımından incelendiğinde, aynı ebatlarda atık lastik eklenmiş beton karışımlarda, atık lastik oranı arttıkça dayanım düşmüştür. Yol yapımında geleneksel beton karışımlarının gerekli basınç dayanımını en az kayıpla sağlayabilmesi için karışımlarda düşük oranlı, ebat olarak da parça lastik kullanımının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Atık lastik eklenmiş geleneksel beton yol karışımları arasında en uygun atık lastik oranı % 5 parça lastik eklenmesidir. 140. günün sonunda kontrol karışımına yakın basınç değerlerine ulaşılmıştır. Genel olarak 140. günün basınç dayanımları, % 15 toz lastik eklenmiş geleneksel beton numunesi hariç, 40 MPa'nın üzerinde değerlere ulaşmıştır ve bu değer yol yapımı için uygun bir değerdir.

Kaynaklar

- Ağar, E., Taşdemir, Y., (2007). “Silindir ile Sıkıştırılabilen Beton Yollar”, Türkiye Hazır Beton Birliği web-sitesi, <http://www.thbb.org>
- KGM, (2019), Yol Ağı Bilgileri, <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx> (Erişim Tarihi 01/09/2019)
- KGM,(2017),KarayoluUlaşımİstatistikleri,<http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Yayinlar/YayinPdf/KarayoluUlasimIstatistikleri2017.pdf> (Erişim Tarihi 01/09/2019)
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 741s.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Mc-Graw Hill.
- Ragan, S. A., 1988, Proportioning RCC Pavement Mixtures, Roller Compacted Concrete II, 380-393.
- Taşdemir, M.A., (2002), Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi, İMO İstanbul Şubesi, Sürekli Eğitim Seminerleri, Harbiye-İstanbul.
- TÇMB, (2018), “Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar Teknik Şartnamesi”, 2018, Ankara.
- Yaman, İ. Ö., Ceylan, H., “ Silindirle sıkıştırılmış beton yollar ” HAZIR BETON, pp. 69 – 82, Mayıs – Haziran 2013.

Baraj Yapımında Kullanılan Silindirle Sıkıştırılmış Betondan, PCA Yöntemiyle, SSB Yol Tasarımı Yapılması

Hasan Çağdaş Taşkınsu¹, M. Karacasu²

¹Devlet Su İşleri 3.Bölge Müdürlüğü, Proje ve İnşaat Şube Müdürlüğü, Eskişehir, Türkiye
²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye

Özet

İçeriğinde, sürekli gradasyon verecek şekilde tasarımı yapılmış iri ve ince agrega, uygun oranlarda çimento ve su bulunan, sıfır slump değeri ve düşük su/çimento oranıyla üretildikten sonra, serimi yapıp, vibrasyonlu silindirlerle, içerisinde hava boşluğu minimum olacak şekilde sıkıştırılmasıyla yoğunluğu artırılarak son şeklini alan beton; silindirle sıkıştırılmış betondur. Silindirle sıkıştırılmış betonun (SSB) serme ve sıkıştırma işlemlerinde genellikle asfalt yol ekipmanları kullanılır. SSB, üretildikten sonra, taşınma, serme ve sıkıştırılma özellikleri bakımından esnek üst yapıya benzer; sertleştikten sonra ise rijit üst yapı davranışları gösterir. Günümüzde petrol bazlı bir üretim olan asfalt yollara alternatif bir çözüm olarak, yerli bir üretim olan SSB yollar bazı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti İnşaatı'nda ağır yük taşıyan kamyonların kullanabilmesi için, gölet yapımı için üretilen silindirle sıkıştırılmış betondan, PCA (Portland Cement Association) metoduyla yol kaplaması tasarımı yapılarak, 10 m uzunluğunda bir deneme yolu inşa edilmiştir. Yol yapımında kullanılan SSB'den numuneler alınarak 7-28-90 ve 180 günlük basınç testleri yapılmıştır. Deneme yolu ağır yüklü kamyonlar tarafından gölet gövdesine ulaşım için kullanılmıştır. Test sonuçlarına ve sahadaki tecrübelerle bağlı olarak deneme yolunda gözle görülür bir deformasyona rastlanmamıştır. Gölet yapımı için üretilen SSB'nin kalınlık tasarımı yapılarak, yol inşaatında kullanılması deneme yolunda olumlu bir sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: SSB Yol, PCA Yöntemi, SSB kaplama kalınlık tasarımı

1 Giriş

Günümüzde petrol bazlı bir üretim olan asfalt yollara alternatif olarak, yerli bir üretim olan beton yollar ve SSB (silindirle sıkıştırılmış beton) yollar bazı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada silindirle sıkıştırılmış beton baraj olarak inşaatı devam eden, Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti'nde kullanılan, silindirle sıkıştırılmış betondan, yol dolgusu için kalınlık tasarımı yapılmıştır. Baraj için kullanılan malzemenin yol dolgusunda da kullanılabilirliği gözlemlenmiştir. Silindirle sıkıştırılmış beton barajlarda, özellikle gövde dolgusunda, tesviye betonunun ve silindirle sıkıştırılmış betonun kirlenmesini önlemek amacıyla su havuzu yapılması önerilmektedir. Gövde dolgusunda çalışan iş makinelerinin tekerlekleri bu havuzlardan geçerek yıkanacak ve gövdedeki SSB'nin kirlenmesi önlenecektir. Bu duruma alternatif olarak gövde dolgusuyla SSB siloları arasındaki yolun barajda kullanılan silindirle sıkıştırılmış betondan inşa edilmesi düşünülmüştür. Yol dolgusu için kalınlık tasarımı yapılan 10 m.'lik örnek bir yolun, üzerinden SSB yüklü kamyonlar ve iş makineleri geçtikçe zamanla olan değişimi gözlemlenmiştir. Kalınlık tasarımı yapılan silindirle sıkıştırılmış betondan alınan numunelerin de 7 – 28 – 90 ve 180 günlük dayanım deneyleri yapılmıştır.

2 Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

SSB yol imalatında bir çimento farikasından temin edilen, TS EN 197-1'e uygun CEM II/A-M (P-L) 42,5 R sınıfı bir çimento ve Tunçbilek uçucu külü kullanılmıştır. DSİ raporlarına göre, Eskişehir Gündüzler Barajının gövde imalatında kullanılacak silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) malzemesinin optimal karışımı Tablo 1'de ki belirtilen değerlerin altında kesinlikle olmayacaktır.

Tablo 1. SSB hedef dayanım parametreleri

SSB Optimal Karışım Parametreleri	Hedef Dayanım Parametreleri
SSB Doğrudan Çekme Mukavemeti	1,488 MPa (C16)
SSB Dinamik Doğrudan Çekme Mukavemeti	2,23 MPa (C16)
Konvansiyonel Dinamik Doğrudan Çekme Mukavemeti	2,88 MPa (C20)
Derz Yerleri Boyunca Doğrudan Çekme Mukavemeti	1,04 MPa
Derz Yerleri Boyunca Dinamik Çekme Mukavemeti	1,56 MPa
Zemin Kayası Zemin Emniyet Gerilmesi	12,7 kg/cm ²
Temel Kayası Elastisite Modülü	17 400 MPa
Temel Kayası Kohezyonu	1,431 MPa
Temel Kayası İçsel Sürtünme Açısı	30,5 derece
YB Poisson Oranı	0,26

SSB Poisson Oranı	0,2
SSB Birim Ağırlığı	2,4 ton/m ³
C20 Elastisite Modülü	21 422 MPa
Dinamik C20 Elastisite Modülü	25 491 MPa
SSB Elastisite Modülü	19 000 MPa
Dinamik SSB Elastisite Modülü	23 750 MPa

Yukarıda verilen mukavemet karakteristiklerinin tümü 270 günlük SSB içindir.

Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti gövde dolgusu SSB imalatlarında kullanılan agregalara ait bağıl yoğunluk, su emme ve en uygun agrega karışım oranları deney sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Agregalara ait fiziksel özellik deney sonuçları

Agrega Tane Sınıfları	Özgül Ağırlık	Su Emme Oranı (%)	Kütlece En Uygun Agregaya Karışım Oranları (%)	İnce Agregaya ve Tüvenan İçindeki Kum İncelik Modülü F.M.
25 – 50 mm	3,09	0,3	18	Betonda kullanılan tüvenan agregaya içindeki ince agregaya F.M. – 2,92
15 – 25 mm	3,04	0,4	21	
5 – 15 mm	3,05	0,4	18	
0 – 5 mm	2,96	1,3	43	

Karışımlarda kullanılan, 0-5 mm, 5-15 mm, 15-25 mm ve 25-50 mm anma boyutları ile adlandırılan agregalara ait elek analizi deney sonuçları Tablo 3’te verilmiştir. Agregaya en büyük tane büyüklüğü, yapılan elek analiz sonuçlarına göre 50,8 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Agregaların elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	0 – 5 mm Agregası (%geçen)	5 – 15 mm Agregası (%geçen)	15 – 25 mm Agregası (%geçen)	25 – 50 mm Agregası (%geçen)
63,5	100,00	100,00	100,00	100,00
50,8	100,00	100,00	100,00	93,32
38,1	100,00	100,00	100,00	67,55
31,5	100,00	100,00	100,00	27,70
25,4	100,00	100,00	84,49	1,23
19,01	100,00	100,00	45,82	0,08
12,54	100,00	95,13	0,15	0,00
9,52	100,00	78,30	0,00	0,00
4,76	100,00	0,00	0,00	0,00
2,36	79,54	0,00	0,00	0,00
1,18	56,32	0,00	0,00	0,00
0,59	39,07	0,00	0,00	0,00
0,295	25,18	0,00	0,00	0,00
0,149	15,31	0,00	0,00	0,00
0,075	8,35	0,00	0,00	0,00
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00

2.2 Yöntem

Gölet dolgusu için tasarlanan SSB betonu kullanılarak, PCA (Portland Cement Association) yöntemine göre deneme yolu için kalınlık hesabı yapılmıştır. Ayrıca Kango Tokmağı ile sıkıştırılarak deneme yolundan alınan 150x300 mm silindirik şekilli numuneler üzerinde TS EN 12504-1'e uygun olarak 7-28-90 ve 180 günlük basınç deneyleri yapılarak, basınç değerleri bulunmuştur.

2.2.1 SSB yol kaplaması tasarımı

Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti SSB yol tasarımında, şantiyede SSB Baraj gövde dolgusu için üretilen beton, SSB yolda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. SSB yollar bağımsız, düz ve donatısız olacak şekilde inşa edilir. Kalınlık belirleme yöntemi geleneksel beton yollarınkiyle aynıdır (Yaman ve Ceylan, 2015). Bu tasarımdaki en önemli etkenler tekerlek yüklerinin oluşturduğu eğilme gerilmeleri ve yorulmalardır. SSB Yolun kalınlığı, tekerlek yüklerinin

oluşturduğu eğilme gerilmelerinin ve yorulmaların kabul edilebilir limitler altında kalmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Bu durum sağlanamazsa yolda deformasyonlar oluşacaktır.

Ağır yükler altındaki SSB kaplamaların kalınlık tasarımı esasları, Amerikan Portland Çimento Birliği (PCA) ve Amerikan Ordu Birliği Mühendisleri (USACE) tarafından yönetmeliklerle belirlenmiştir. Tasarım genel olarak tekrarlı ağır yüklere maruz kalan SSB kaplamanın belirli limitlerde bozulmadan kalmasına dayanır. Bu kaplamalarda kritik olan kısım eğilme gerilmesi olduğundan, eğilme gerilmesine bağlı yorulma, kalınlık tasarım hesaplarında kullanılan önemli bir değişkendir. Yorulmayla ilişkili bağtımda gerilme oranı kullanılır.

2.2.2 SSB yüklü kamyonlarda tekerlek yüklerinin belirlenmesi

Ulaşım yolunda kullanılacak yüklü kamyonların türüne ve ağırlıklarına göre projelendirme yapılmalıdır. Tekerek basıncı ve tekerleklerin temas alanı yol tasarımını doğrudan etkilemektedir. Yolda deformasyonların oluşmaması için kullanılan kaplamanın taşıma kapasitesi tekerlek gerilmelerinden daha yüksek olmalıdır. Kaplama kalınlığı yolda kullanılacak en büyük kamyon ağırlığına göre tasarlanmalıdır. Zeminde oluşacak gerilmelerin bulunabilmesi için öncelikle SSB taşıyacak kamyonların tekerlek yükü hesabının yapılması gerekmektedir. Kamyon tekerleklerindeki yük dağılım oranı, ön tekerlekler için %33, arka tekerlekler için %67 olarak alınabilir (Hustrulid ve Kuchta, 1995).

Taşıma yapacak kamyonun arka tekerlekleri tek veya çift olabilir. Tek tekerlek olması durumunda arka aksa gelecek yükün tekerleklere eşit olarak dağıldığı varsayılır. Arka aksdaki tandem tekerleklerin kaplamada oluşturdukları düşey basınç gerilmeleri, tekerlekler arasındaki alanda kesişerek artmaktadır. En fazla etki de basınçların kesiştiği yerde oluşur. Böyle bir durumda tasarım yapılırken tekerleklerden zemine etkiyen yükün %20 arttırılması önerilir (Kaufman ve Ault, 1977).

$$L_e = 1.2 \times L_t$$

L_t = Tek teker yükü

L_e = Tandem tekerlekler için teker yükü

Tablo 4. SSB yolda çalışacak kamyonun teknik özellikleri

Model No	BMC 940 EDB	
Boş Ağırlık	ton	14
Çalışma Ağırlığı	ton	39
Tekerlek Basıncı	kpa	315.80R22.5 123 (psi)
Yükleme Yüksekliği Boş	M	3.1
Genişlik	M	2.5
Uzunluk	M	7.7

Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti için alınan bilgilere göre kamyonlar ortalama 12 m³'lük taşıma yapmaktadır. Çalışan kamyonların teknik özellikleri çizelde 4.19'da gösterilmiştir. Şantiyede silolardan taşınan taze betonun birim hacim kütlesi 2572.9 kg/m³'tür. Beton yüklü bir kamyon 12 x 2572.9 = 30874.8 kg yük taşımaktadır. Kamyonun boşken ağırlığı 14 ton, taze beton yüklüken ağırlığı ise (14+31) 45 ton olarak alınmıştır. Ön tekerleklerin taşıdığı yük toplam yükün %33'ü, arka tekerleklerin taşıdığı yük ise toplam yükün %67'si olarak kabul edilmiştir.

Bu kabulün doğrultusunda ;

Ön aksa gelen toplam yük = 45 x 0.33 = 14.85 ton,

Ön akstaki tek tekerlek yükü ise 14.85/2= 7.43 ton olarak bulunur. %15 güvenlik payı ile de ön akstaki tek tekerlek yükü değeri 8.54 ton olarak hesaplanır.

Arka aksa gelen toplam yük = 45 x 0.67 = 30.15 ton,

Arka akstaki tek tekerlek yükü ise 30.15/4 = 7.54 ton olarak bulunur.

Arka akstaki tekerlekler çift tekerlek şeklinde olduğundan zemine etkileyen yük %20 oranında arttırılır ve 9.05 ton olarak bulunur. %15 güvenlik payı ile de arka akstaki tek tekerlek yükü değeri 10.41 ton olarak hesaplanır.

Tek tekerleğe gelen maksimum yük 10.41 ton olduğundan, SSB yol tasarımı 10.41 ton tekerlek yükü baz alınarak yapılmıştır.

2.2.3 Tekerleğin yüzeye temas alanının hesaplanması ve zemine uygulanan gerilmeler

Yapılan hesaplamalarda yolun en olumsuz koşulda deformasyona uğramadan çalışabilmesi için maksimum tekerlek yükü kullanılmıştır. Hustrulid ve Kuchta, zemine uygulanan yükü tekerlek basıncına oranlayarak tekerleğin yüzeye temas alanını belirlemiştir (Hustrulid ve Kuchta, 1995).

Buna göre;

Tekerleğin Yüzeye Temas

$$\text{Alanı} = \text{Yük (kN)} / \text{Tekerlek Basıncı (kN/m}^2\text{)}$$

$$1 \text{ ton} = 9.96402 \text{ kN}$$

$$\text{Tek tekerleğe gelen maksimum yük } 10.41 \text{ ton} = 10.41 \times 9.96402 = 103.7254 \text{ kN}$$

$$1 \text{ psi} = 6.89476 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Tekerlek Basıncı } 123 \text{ psi} = 123 \times 6.89476 = 848.0555 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Tekerleğin Yüzeye Temas Alanı} = 103.7254 \text{ (kN)} / 848.0555 \text{ (kN/m}^2\text{)} = 0.122 \text{ m}^2$$

Kaplama kalınlığı tablosunda lasitiğin yüzeye temas alanı inch² cinsinden verildiğinden,

$$1 \text{ m}^2 = 1550 \text{ inch}^2, \quad 0.122 \text{ m}^2 = 0.122 \times 1550 = 189.1 \text{ inch}^2$$

2.2.4 PCA Yöntemine göre kalınlık tasarımı

Eskişehir Merkez Gündüzler Göletinde kullanılan SSB nin min. basınç dayanımı DSI raporlarına göre 16,5 MPa olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu betonun kullanılarak yapılacağı yol tabakası kalınlığının belirlenmesinde eğilme dayanımına ihtiyaç vardır. SSB nin basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki geleneksel betona benzer şekildedir (ACI, 2004).

$$f_r = C \sqrt{f_c}$$

f_r = eğilme dayanımı (üç nokta yüklemesi)

f_c = basınç dayanımı (psi birimi cinsinden)

C = gerçek SSB karışımına bağlı 9 ile 11 arasında bir sabit

Kalınlık Tasarımı için Eğilme Dayanımı Hesabı

$$1 \text{ MPa} = 145.0377 \text{ psi}$$

$$16.5 \text{ MPa} = 2393.1221 \text{ psi}$$

$$f_r = 9 \times \sqrt{(2393.1221)}$$

$$f_r = 440.28 \text{ psi} = 3.04 \text{ MPa} \text{ bulunur.}$$

Kalınlık tasarımı tablosunda psi değeri kullanıldığından $f_r = 440.28 \text{ psi}$ değeri kullanılır.

2.2.4.1 Kalınlık tasarımı için yük tekerrürü hesabı

Yük tekerrürü, hesap edilen tekerlek yüklerinin tasarımı yapılan yoldan geçiş sayısıdır ve bu değer yolun hizmet süresiyle doğrudan alakalıdır. Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti'nde, 260 000 m³'lük gölet dolgusunun 50 000 m³'ü tamamlanmış olup ortalama 210 000 m³'lük

bir dolgu kalmıştır. SSB yüklü kamyonlar 12 m³'lük malzemeyi dolguya taşımaktadır. 210 000 m³'lük malzeme 210000/12 = 17 500 adet seferle taşınabilir. Güvenli tarafta kalmak için kamyonların gidiş gelişi yüklü olarak düşünülerek tasarımda izin verilen tekerrür yük sayısı 17500 x 2 = 35000 olarak bulunur.

Tablo 5. Gerilme oranları ve izin verilen yük tekerrürleri (PCA IS233)

Gerilme Oranları	İzin Verilen Yük Tekerrürü	Gerilme Oranları	İzin Verilen Yük Tekerrürü
0.41	465000	0.56	9700
0.42	360000	0.57	7500
0.43	280000	0.58	5800
0.44	210000	0.59	4500
0.45	165000	0.60	3500
0.46	130000	0.61	2700
0.47	100000	0.62	2100
0.48	76000	0.63	1600
0.49	59000	0.64	1200
0.50	46000	0.65	950
0.51	35000	0.66	740
0.52	27000	0.67	570
0.53	21000	0.68	440
0.54	16000	0.69	340
0.55	12000	0.70	260

PCA yöntemine göre, izin verilen yük tekerrürü 35000 için, gerilme oranı Tablo 5'den 0.51 olarak seçilir. Bu gerilme oranı SSB yol kaplamasının eğilme dayanımıyla çarpılarak izin verilen gerilme hesaplanır.

$$\sigma = fr \times GO$$

GO = gerilme oranı (Tablodan yük tekerrürüne göre 0.51 olarak seçildi.)

σ = izin verilen gerilme

fr = eğilme dayanımı (fr = C $\sqrt{f_c}$ 'den fr = 440.28 psi olarak bulundu.)

$$\sigma = 440.28 \times 0.51 = 224.54 \text{ psi} = 1548.1488 \text{ KN/m}^2$$

Kalınlık tasarımı tablosunda izin verilen gerilme, psi cinsinden verildiğinden izin verilen gerilme = 224.54 psi değeri alınır.

PCA yaklaşımına göre, 1000 lb için izin verilen gerilmenin, tekerlek temas alanı ve SSB nin oturduğu zeminin yatak katsayısıyla (Tablo 6) kesiştiği nokta bize SSB yol tabaka kalınlığını verir (Şekil 1).

2.2.4.2 K katsayısı seçimi

Tablo 6. Çeşitli Zeminler için yatak katsayısı değerleri (Bowles, 1996)

Zemin Cinsi	Ks (KN/m ³)
Gevşek Kum	4800 – 16000
Orta Sıklıkta Kum	9600 – 80000
Sıkı Kum	64000 – 128000
Killi Orta Sıklıkta Kum	32000 – 80000
Siltli Orta Sıklıkta Kum	24000 - 48000

Eskişehir Merkez Gündüzler Göletinin zemin sınıfı killi orta sıklıkta kum olarak belirlenmiştir. Tablo 6'ya göre yatak katsayısı $K_s = 50000 \text{ KN/m}^3$ olarak seçilir.

2.2.4.3 PCA tasarım grafiği kullanılarak kalınlığın belirlenmesi

Tekil teker yükleri tasarım grafiği için,

Grafikte K yatak katsayısı pci cinsinden verildiğinden, $1 \text{ KN/m}^3 = 0.003684 \text{ pci}$

$K = 50000 \text{ KN/m}^3 = 50000 \times 0.003684 = 184.20 \text{ pci}$ (pound per cubic inch)

Grafikte her bir 1000 pound (lb) tekerlek yükü için gerilme kullanıldığından

$1 \text{ ton} = 2204,62 \text{ lb}$,

Maksimum Tek Tekerlek yükü $P = 10.41 \text{ ton} = 10.41 \times 2204.62 = 22950.09 \text{ lb}$

Her bir 1000 lb tekerlek yükü için gerilme = $\left(\frac{\sigma}{P/1000}\right)$

$\sigma = \text{Tekerrür sayısına göre seçilen Gerilme Oranı} \times \text{eğilme dayanımından} = 224.54 \text{ psi}$ olarak bulunmuştur

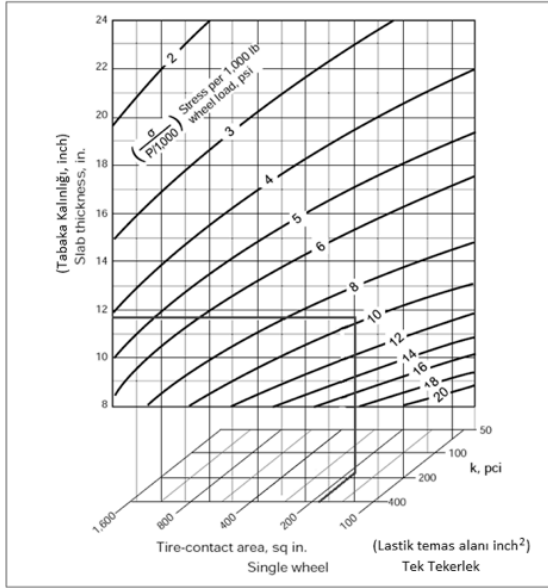
$P = \text{Maksimum Tek Tekerlek yükü} = 22950.09 \text{ lb}$

$\left(\frac{\sigma}{P/1000}\right) = \left(\frac{224.54}{22950.09/1000}\right) = 9.78 \text{ psi}$ her bir 1000 lb tekerlek yükü için gerilme

Her bir 1000 lb için denilen kısım, $1000 \text{ lb} = 1 \text{ kip}$ eşitliği düşünüldüğünde;

Her bir 1 kip tekerlek yükü için gerilme = 9.78 psi/kip

Tekerlek yüzey temas alanı = 189.1 inch^2 olarak bulunmuştur



Şekil 1 Tekil teker yükleri için tasarım grafiği (PCA 1987)

Tekil teker yükü için tasarım grafiğine göre tabaka kalınlığı 11,73 inch= 11,73 x 2,54 = 29,8 cm bulunur (Şekil 1). Tabaka kalınlığı uygulamada 30 cm seçilmiştir.

Taze beton taşındıktan sonra paletli sericiyle serilmeye başlandı. Sıkışmış tabaka kalınlığı 30 cm olarak hesaplandığından, 30 cm'lik kalınlığın biraz üstünde serim yapıldı. Serim işlemi, şantiye imkanları dahilinde, kamyonlarla taşınıp boşaltılan SSB'nin, paletli dozerle serilmesi şeklinde yapıldı. Serilmiş olan taze betonun görüntüsü gri ile kahverengi arasında, kıvamı ise kartopu kıvamındadır. Sıkıştırmaya, sermeden hemen sonra başlanmalı ve sıkıştırma SSB nin beton santralinden çıkışından itibaren maksimum 60 dk içerisinde tamamlanmış olmalıdır. Özellikle sıcak havalarda SSB serimi yapıldıktan sonra mümkün olduğunca çabuk bir şekilde sıkıştırılmalıdır (Adaska, 2006).



Şekil 2. SSB'nin sıkıştırılması

Tabaka kalınlığı 30 cm olarak seçilen SSB yol, serimi tamamlandıktan sonra, şekil 2'de görüldüğü üzere vibrasyonlu tek tamburlu silindirle, 5 pas geçilerek nükleer yoğunluk ölçerle ölçülen sıkışma oranı %101 olarak, sıkıştırıldı. Deneme yolu için getirilen malzemenin, numuneler alınarak Kango Tokmağıyla sıkıştırıldı. Alınan numunelerde basınç deneyi yapıldı. Tasarımı yapılan 30 cm tabaka kalınlığındaki deneme yolundan beton yüklü kamyonların geçişine Şekil 3'te gösterildiği üzere başlandı.



Şekil 3. SSB yüklü kamyonların yapılan yoldan geçişi

4 Bulgular

Silindirle Sıkıştırılmış Beton yoldan alınan numunelerin mukavemet değerleri Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. SSB deneme yolu numune basınç dayanımları

Numune Alım Tarihi	Katkı Cinsi	Beton Sınıfı	N u m u n e Cinsi	Mukavemetler (MPa)			
	Kullanım oranı			7 . Gün	2 8 . Gün	9 0 . Gün	1 8 0 . Gün
10.10.2018	Fosroc 330 W	SSB	15x30	10,1	13,5	18,7	22,2
	%1						

SSB yol dökümünden 51 gün sonra şantiye, Devlet Su İşleriyle yapılan sözleşmede de belirtildiği üzere, Eskişehir İlinde 1 Aralık – 1 Nisan arası olumsuz hava koşulları nedeniyle çalışılmayan döneme girilmesi sebebiyle kapanmıştır. 51 günlük süre boyunca Şekil 4’te görünen SSB yoldan, ortalama 6800 kamyon geçişi yapılmıştır.



Şekil 4. Yolun son durumu, 51 günlük sürenin sonunda

5 Sonuçlar

SSB yolun tasarımı 16,5 MPa'a göre yapılmıştır. Numunelerin basınç değerleri değerlendirildiğinde, 28. günde hedef dayanımına yaklaşılmış olunmasına rağmen 28. ve 90. günler arasında bu değere ulaşılmış ve 90. günde de dayanım, daha yüksek değerlere çıkmıştır. Yorulma hesabı yapılırken 16,5 MPa tasarımda kullanıldığından, dayanımın zamanla giderek artması, yapılan hesapların uygulamada tasarıma göre daha güvenli tarafta kaldığını gösterir. Gölet yapımında kullanılan SSB'nin kalınlık tasarımı yapılarak yolda kullanılması, kaplamada çalışacak iş makinalarının ve kamyonların tekerleklerinden kaplamaya yabancı madde taşınması sorununu çözebilecek niteliktedir. Daha farklı karışım tasarımlarıyla gerekli dayanım değerlerine daha kısa zamanda da ulaşılabilir.

Eskişehir Merkez Gündüzler Göleti'nde kullanılan SSB'den, yol için PCA yöntemiyle kalınlık tasarımı yapılmasıyla oluşturulan SSB deneme yolu, 51 günlük süre boyunca ortalama 6800 adet SSB yüklü kamyonun geçişine maruz kalmıştır. 51 günlük sürenin sonunda tasarımı yapılmış SSB yolda gözle görülür bir deformasyona rastlanmamıştır. SSB Baraj yapımlarında, iş makinalarının ve kamyonların Baraj gövdesine tekerlekleri vasıtasıyla yabancı maddeleri taşımalarının önüne, ulaşım yollarının da SSB'den yapılmasıyla, geçilebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak Yorulma dayanımı ve tasarım kalınlığının yeterli olup olmadığı uzun süreli servis performansına bağlıdır. Gelecek çalışmalarda daha uzun süreli deneylerle baraj yapımı için kullanılan SSB'nin ulaşım yollarında da kullanılabilirliği incelenmelidir.

Tasarımı yapılan SSB deneme yolu gereksinimleri karşılamıştır. SSB yolun yapımında alınan numunelerin 180. gün basınç değeri 22,2 MPa olarak bulunmuştur. Hedef dayanımı olan 16,5 MPa'ya 28. gün ile 90. gün arasında ulaşılmıştır. İmalatı yapılan yoldan alınan numunelerin, tasarımda kullanılan 16,5 MPa'lık yük değerinin üstünde çıkması, RCC-Pave programının "imalatı yapılan üst yapılar yıllar geçtikçe sağlamlık kazanır ve buna göre eğilme dayanımı, tasarım dayanımından daha yüksek olacaktır" yargısını doğrular niteliktedir. Bu şekilde tasarım yapılırken güvenli tarafta kalınmış olur.

Kaynaklar

- Adaska, W. 2006. Roller-Compacted Concrete (SSB). PCA Research & Development Information Serial No. 2975. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- American Concrete Institute Committee 325. 2004. State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI Report 325.10R-95. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Bowles, J. E., 1996. Foundation Analysis and Design: McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.
- Hustrulid, W. Kuchta, M. (1995). Open Pit Mine Planning and Design. Nederland: A.A. Balkema.
- Kaufman W.W. ve Ault J.C. (1977) Design of Surface Mining Haulage Roads. Bureau of Mines, Information Circular 8758.

- Portland Cement Association. (2002). RCC-PAVE Computer Program. Item Code MC043. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Portland Cement Association. 1987. Structural design for roller-compacted concrete for industrial pavements. Concrete Information. Publication IS233.01. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- Yaman, İ. Ö., Ceylan, H., 2015, “ Silindirle sıkıştırılmış beton yollar ” TMH – 487 – 2015/4, pp. 44 – 61.

Alternatif Beton Yol Kesit Önerisi

Erhan Burak Pancar

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, klasik beton yol kesitine alternatif olarak 36, 50 ve 72 mm çaplarında kemer kesitli beton plaklar SAP2000 programında tasarlanmış ve söz konusu plaklar üzerinde oluşacak olan gerilmeler trafik yüklemesi altında tespit edilmiştir. Çalışmadaki mantık, kemer bir yapının üzerine gelen yükü dağıtması üzerine kurulmuştur. Bu amaçla, 15 cm kalınlığında, 4 m x 4.5 m boyutlarındaki beton plak kesitlerine sabit aralıkla ve 3 farklı çapta kemerler açılmış, yatak katsayısı 5000 kN/m³ olan zayıf zeminlerde, 70 km/sa hızla tek ve arka arkaya 50 araç geçişi sırasında oluşacak olan gerilmeler analiz edilmiştir. C30/37 sınıfı beton kullanılması durumunda söz konusu zemin tipinde de 36 mm çapındaki kemer kesitli beton plak kullanılmasının ideal sonuçları verdiği görülmüştür. Kemer kesitlerin, derz aralığının açılmasında, plak altı kablolamalarında, plak ve temel arasındaki sürtünmenin azaltılmasında ve daha sessiz yol üretiminde ekonomik ve alternatif bir sonuç doğuracağı kanaatine de varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton yol, kemer kesit, SAP2000

1 Giriş

Beton yol kaplamaları beton plaklardan imal edilirler. Betonun basınç, eğilmede çekme, yorulma, vb. mekanik özellikleri dikkate alınarak tasarlanan beton kaplamalar çeşitli etkilerden dolayı oluşan gerilmelere, inşa edilen kaplamaya en uygun beton plaklarla karşı koyarlar. Çeşitli etkilerle oluşan bu gerilmeler; taşıt ve trafik yükleri, ısı değişimleri (burulma, kıvrılma, büzülme, vb.), hacimsel değişimler (don kabarması, oturma, vb.), plak ile temel arasında oluşan sürtünme, plaklar arasındaki sürtünme ve yük geçişi gibi nedenlerden dolayı farklı şiddetlerde meydana gelmektedir. Bu sebeplerle, beton kaplama kalınlıklarının tasarımı için; zemin taşıma gücü, betonun mekanik özellikleri, iklim ve trafik (dingil yükü ve tekrerrür sayısı) gibi etkenler dikkatle incelenerek göz önüne alınmalıdır.(Ulusoy, 2010).

Beton yol kaplamalarında plak üzerine etki eden teker yükü plağın farklı bölgelerinde farklı eğilme gerilmeleri oluşturur. En kritik gerilmeler plağın köşe noktasına yük etkimesi durumunda, en düşük gerilmeler ise plağın orta noktasına yük etmesi durumunda oluşmaktadır. Bir beton kaplama plağı üzerine etki eden teker yükü; teker yükünün büyüklüğü, yükün etki ettiği pozisyon, yükün etkide bulunduğu alan gibi parametrelere bağlı olarak yüzeyde deformasyonların oluşmasını sağlar. (Ulusoy, 2010)

Dingil gruplarının kaplama üzerine yerleştirilmesinde Packard ve Tayabji (1985) çalışmalarında tek ve çift dingil yüklemelerinde beton kaplamada oluşan en büyük çekme gerilmesinin, plak kenarında iki enine derzin ortasında olduğunu, derzli beton yollarda en büyük çökmenin ise plak köşesinde olduğunu tespit etmişlerdir.

Kemer yapısı, üzerine etkileyen yükleri aşağıya aktarmakta emniyetli olduğu ve yapı hizmet ömrü süresince olumlu sonuçlar verdiği için açıklıkları geçmede önemlidir. Kısa veya uzun açıklıklar için faydalanılan yapı şekillerinden birisidir. Kısa açıklıklar için ahşap, taş, çelik ya da betonarme kirişler kullanılırken geniş açıklıklar için ise çelik veya betonarme kirişler tercih edilmektedir.

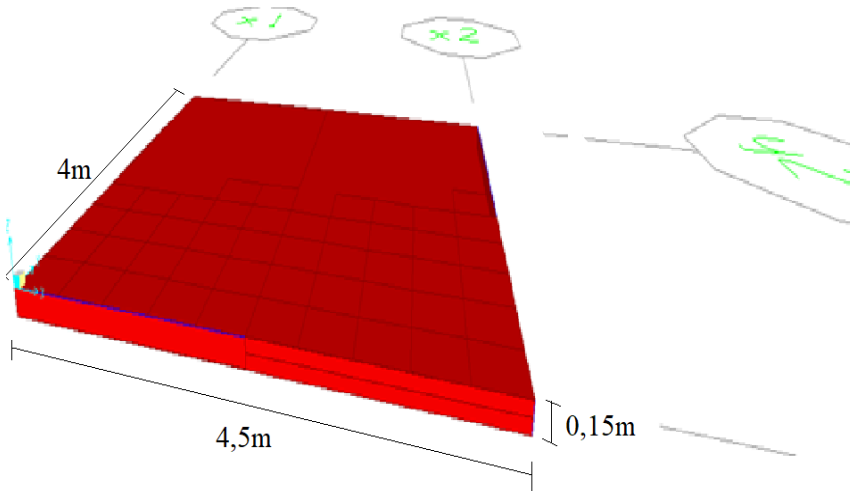
Kemer yapısı, açıklıklarda çekme gerilmesinin oluşmaması, basınç gerilmelerinin meydana gelmesi açısından da önemlidir. Bu sebeple kemer yapılarında bu özellikleri sağlayacak yapı malzemeleri tercih edilir. Çekmeye karşı mukavemeti olmayan yapı malzemelerinin tercih edilmesiyle ilk başta taşıyıcı sistemler genel olarak kemer yapısında inşa edilmiştir. Eğik kirişlerde yüksek eğilme momentleri oluşurken, kemerler yapısında küçük eğilme momentleri oluşur. Küçük eğilme momenti oluşumundan ötürü kemer yapısı birçok alanda uygulanmaktadır (Uçar ve Şakar, 2011).

Ulusoy (2010) SAP2000 bilgisayar analiz programı kullanılarak beton yollarda taşıt hızlarının ve beton özelliklerinin yer değiştirme ve gerilmelere etkisi üzerine yaptığı çalışmasında beton yolun uzunluğunu 60 m, genişliğini 11 m, plak kalınlığını 30 cm olarak almıştır. Zemin yatak katsayısı sabit olup 1000 t/m³ olarak sisteme yay olarak atanmıştır. Çalışmada C30, C40, C50 beton sınıfları kullanılmıştır. Taşıt tipi HSn-44 olarak tanımlanmıştır. Hızları 72 km/saat,

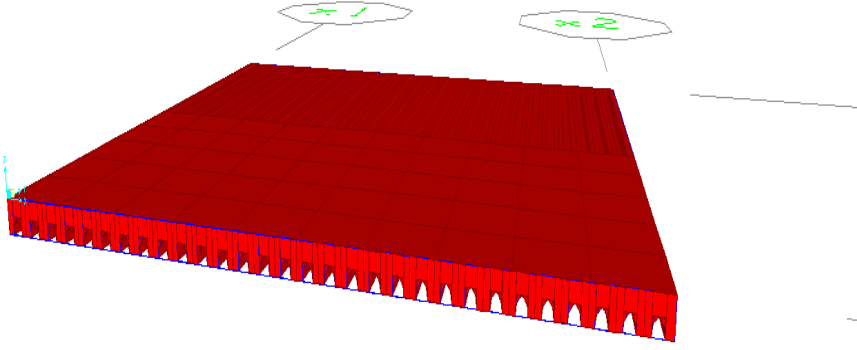
108 km/saat, 144 km/saat, 180 km/saat olarak tanımlanmış ve beton yoldaki deplasman ve gerilme değerlerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm beton sınıflarında düşük hızlarda deplasman değerinin sabit kaldığı, hız belli bir değere ulaştığında deplasman değerinin azaldığı saptanmıştır. Betonun basınç dayanımı arttıkça yolda oluşan deplasmanlar azalmıştır. Belli bir araç sayısının gerilme üzerinde farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Plak kalınlığının artmasıyla oluşan deplasman değerlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Ulusoy (2010) un yaptığı bu çalışma beton yolda hızların, plak kalınlığının, beton kalitesinin gerilmeye etkisini göstermiştir. Çalışmamızda bu verilere ek olarak tanımlanan beton yol kesimine farklı çaplarda kemer kesit açılmasının farklı zemin türlerinde, farklı sayıda araç geçişi için gerilmeye nasıl etkideği gösterilmiştir.

2 Materyal ve Yöntem

Beton yol kaplaması plak eleman olarak modellenmiştir. Yol uzunluğu 4.5 m, genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olarak alınmıştır. Beton plak 0.45 m aralıklarla sonlu elemanlara bölünmüştür. Zemin yatak katsayısı zayıf zeminler için 5000 kN/m³, orta sağlam zeminler için 15000 kN/m³ kabul edilip sisteme yay olarak tanımlanmıştır (Bowles, 1996). Sistemin modellenmesi için 36 mm, 50 mm ve 72 mm çaplı kemer kesitler oluşturulmuştur. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 de gösterilmektedir.

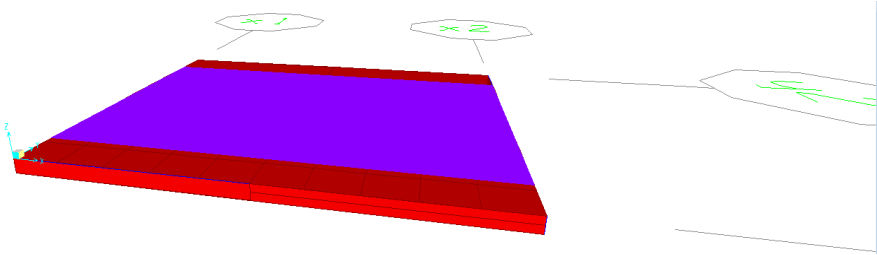


Şekil 2.1 Sonlu elemanlara bölünmüş plak



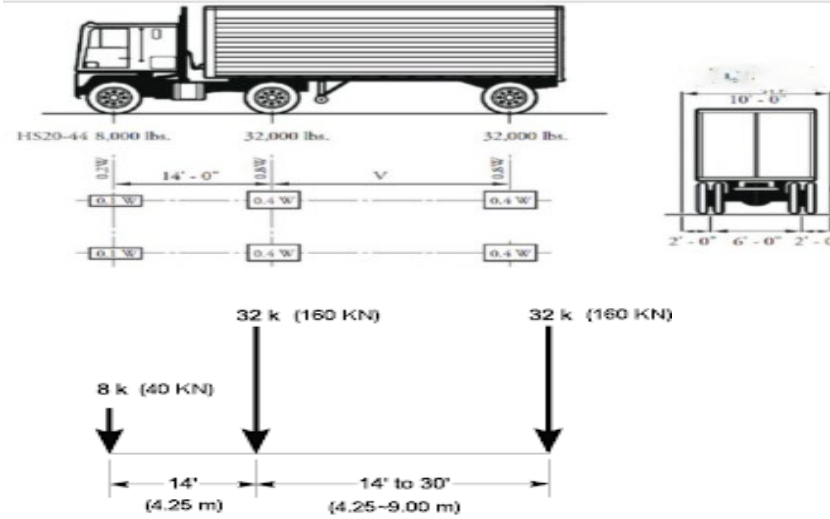
Şekil 2.2 Sonlu elemanlara bölünmüş kemer kesitli plak

Taşıt yüklemesi için önce taşıtın geçeceği çizgi belirlenmiştir. Çizgi belirlendikten sonra trafik şeridi oluşturulmuştur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Trafik şeridi

Hareketli yükün analizi için taşıt sınıfları tanımlanmıştır. Taşıt sınıfı hareketli yükün analizinin yapılacağı bir veya birden fazla taşıttan oluşan kısımdır. Programda çok sayıda taşıt tanımı mevcuttur. Bu çalışma için Tip=HSn-44 ismi ile AASHTO Şartnamesinin standart HS kamyon yüklemesini temsil eden taşıt tipi tanımlanmıştır. AASHTO Standart HS20-44 kamyonuna ait dingil yüklemesi Şekil 2.4. de verilmiştir.

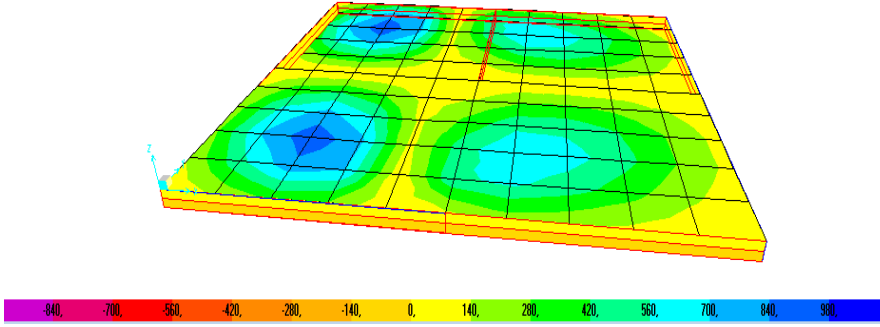


Şekil 2.4 AASHTO HS20-44 kamyonu dingil yüklemesi (Matthew B.Gries vd, 2013)

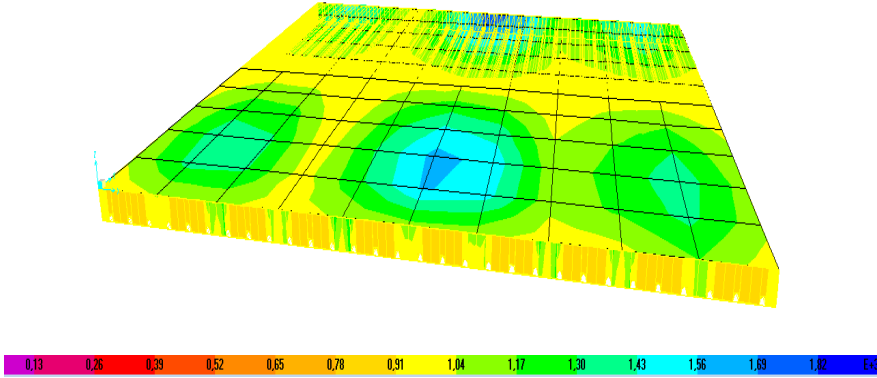
Taşıt tipi belirlendikten sonra trafik şeridi üzerinde hareket eden taşıtların doğrultu, başlangıç zamanı ve hızları tanımlanmıştır. Çalışmada taşıt geçişi için 70 km/sa hız tanımlanmıştır. Tanımlanan bu veriler çalışmada belirlenen beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton yol kaplamalarında zayıf ve orta sağlam zeminler için sadece bir araç geçişi ve arka arkaya elli araç için uygulanmış ve gerilme analizi yapılmıştır.

3 Bulgular

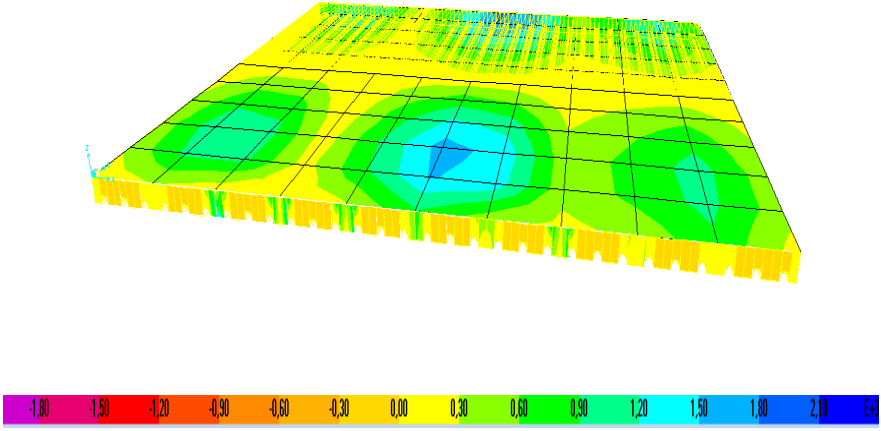
Beton yol kaplamasında C30/37 beton sınıfı malzeme olarak kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan yol kesiti şahit, 36 mm, 50 mm, 72 mm çaplı kemer kesitler ile açılarak zemin yatak katsayısı zayıf zemin için 5000 kN/m³ sisteme yay olarak tanımlanmış ve yol kesitinden hızı 70 km/sa olan bir araç geçmesi durumunda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 3.1., Şekil 3.2., Şekil 3.3. ve Şekil 3.4. de gösterilmektedir. Elde edilen gerilme değerleri Şekil 3.5. de grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



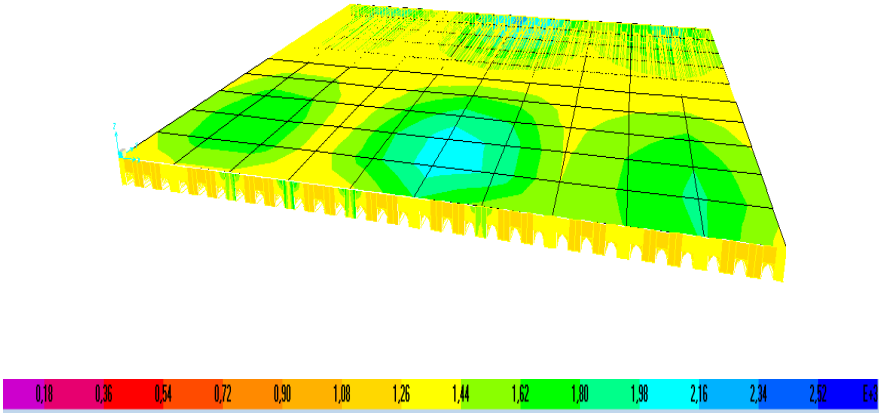
Şekil 3.1. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 0,98 MPa



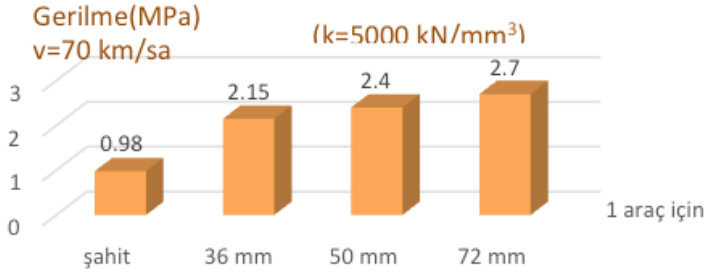
Şekil 3.2. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,15 MPa



Şekil 3.3. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa

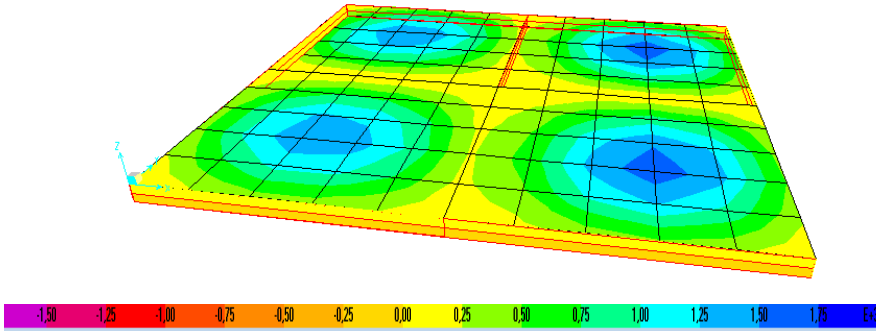


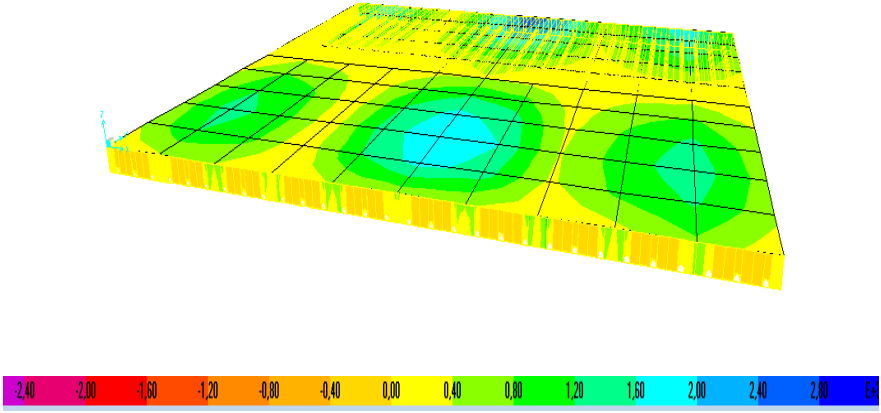
Şekil 3.4. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,7 MPa



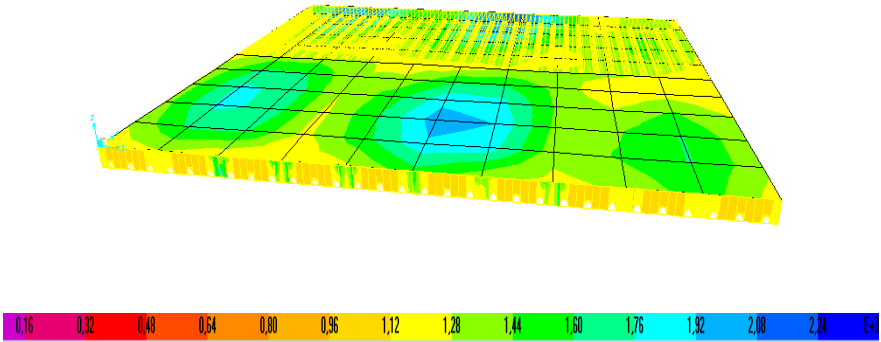
Şekil 3.5. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde bir araç için oluşan gerilme grafiği

Beton yol kaplamasında C30/37 beton sınıfı malzeme olarak kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan yol kesiti şahit, 36 mm, 50mm, 72 mm çaplı kemer kesitler ile açılarak zemin yatak katsayısı zayıf zemin için 5000 kN/m³ sisteme yay olarak tanımlanmış ve yol kesitinden hızı sabit 70 km/sa olan arka arkaya elli araç geçmesi durumunda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 3.6., Şekil 3.7., Şekil 3.8. ve Şekil 3.9. da gösterilmektedir. Elde edilen gerilme değerleri Şekil 3.10. da grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

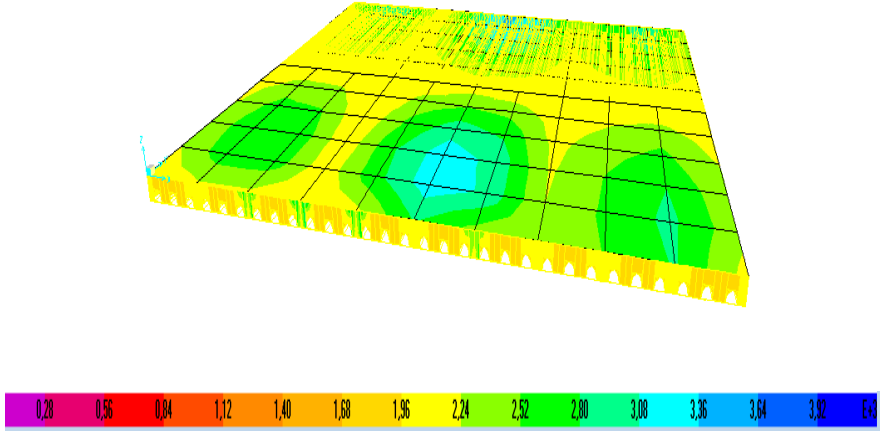




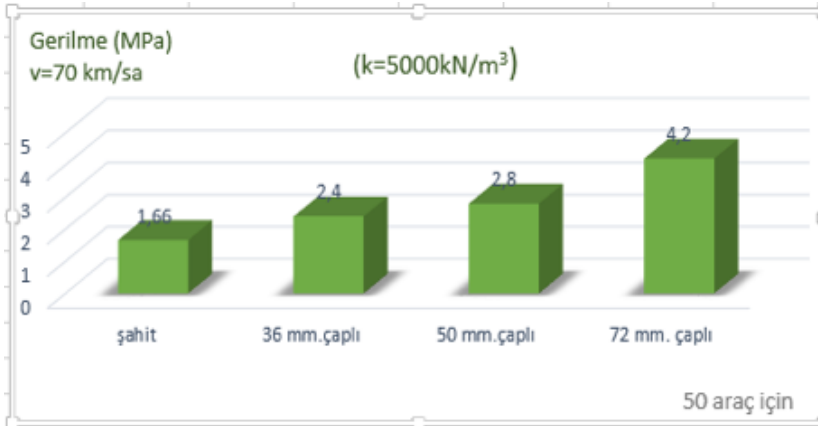
Şekil 3.7. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa



Şekil 3.8. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,8 MPa

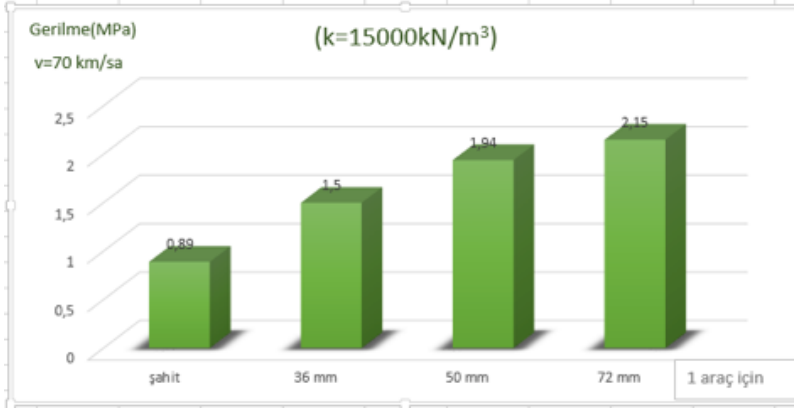


Şekil 3.9. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 4,2 MPa

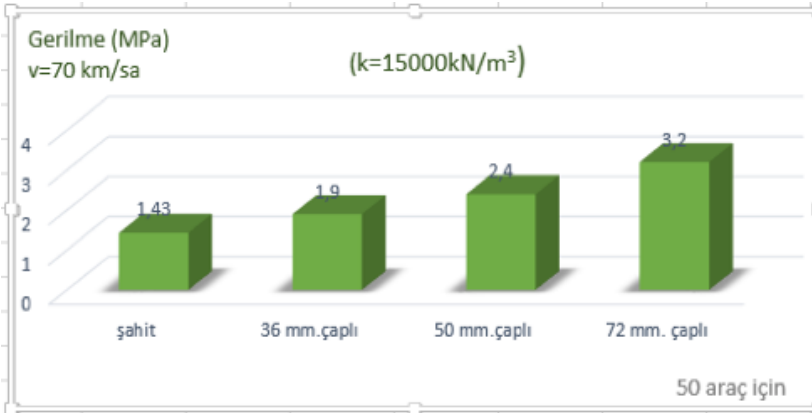


Şekil 3.10. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde elli araç için oluşan gerilme grafiği

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 de ise aynı şartlarda zemin yatak katsayısı 15000 kN/m³ olması durumunda elde edilen gerilmeler hızı sabit 70 km/sa olan tek araç ve arka arkaya elli araç geçmesi durumuna göre sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.11. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde bir araç için oluşan gerilme



Şekil 3.12. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde elli araç için oluşan gerilme

3 Sonuçlar

Yapılan çalışmada, zayıf zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, bir araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %119,5 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %145 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %172,5 arttığı görülmektedir. Orta sağlam zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, bir araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %68,5 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %117 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %141,5 arttığı görülmektedir.

Zayıf zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, arka arkaya elli araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %45 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %69 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %153 arttığı görülmektedir. Orta sağlam zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, arka arkaya elli araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %33 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %67 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %123,7 arttığı görülmektedir.

Yüzdeler artışı, her iki zemin türünde arka arkaya elli araç geçişinde tek araç geçişine göre daha az olmasının sebebi beton yol kaplamasında şahit durumunda oluşan gerilmelerin daha yüksek olmasıdır. Beton yol kesitinde kemer kesit çaplarının artmasıyla oluşan gerilmelerin arttığı, en yüksek gerilmenin 72 mm çapında oluştuğu gözlenmektedir.

Beton yol kesitinde kemer kesitli çap açılması durumunda, çalışmada kullanılan en uygun çapın 36 mm olduğu görülmüştür. Bu durum, çalışmamızda kullanılan her iki zemin türü için de aynı sonucu vermiştir. Zeminin sağlamlığı arttıkça, oluşan gerilmelerin azaldığı ve tasarlanan yol kaplamasında sayıca fazla araç geçişinin de gerilmeyi arttırdığı tespit edilmiştir.

Kemer kesitli beton yol uygulaması, yol için kullanılan beton miktarını düşürmektedir. Kemer kesitli plakların aynı zamanda çatlamalara yol açabilecek gerilmeleri azaltmak için uygulanan derzlerin ara mesafelerini de arttırılabileceği düşünülmektedir. Kemer kesitlerin, plak altı kablolamalarında, plak ve temel arasındaki sürtünmenin azaltılmasında ve daha sessiz yol üretiminde ekonomik ve alternatif sonuçlar doğuracağı kanaatine de varılmıştır.

4 Kaynaklar

Bowles, J.E., 1996, Foundation Analysis and Design: Mc Graw- Hill Companies, Inc. New York, USA.

Uçar, T. ve Şakar, G. 2011. Kemerlerin statik analizi için basitleştirilmiş bir yaklaşım. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 24, 35-41.

Ulusoy, T. 2010. Beton yollarda taşıt hızlarının ve beton özelliklerinin yer değiştirme ve gerilmelere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 82, Samsun.

Packard, R.G., Tayabji, S.D. 1985. New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highway and Street Pavements, Concrete Pavements&Rehabilitation Conference, Purdue, USA.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Hızlandırılmış Yol Testleriyle Uzun Dönemli Beton Yol Kaplama Performanslarının (LTPP) araştırılması: KTÜ Örneği

Dr. Muhammet Çelik¹, Dr. Mehmet Tevfik Seferoğlu², Prof. Dr. Muhammed Vefa Akpınar²

¹Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Trabzon, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Trabzon, Türkiye

Özet

Rijit kaplamalı yollar ülkemizde esnek kaplamalara göre oldukça düşük oranlarda inşa edilmektedir. Esnek kaplamaların 70 yılı aşkın sürelik yapım tecrübesi bunun en önemli sebeplerinden biridir. Beton yollar için de benzer tecrübenin elde edilebilmesi için daha fazla uygulama ve deneysel çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Hızlandırılmış Yol Testi (HYT) tesisleri 3 ay gibi kısa sürede en az 10 yıllık veriyi toplayabilen tesisler olarak, bu tecrübenin elde edilmesi için oldukça önemli bir deney düzeneğidir. Bu çalışma kapsamında, Karadeniz Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Türkiye'nin ilk ve tek tam ölçekli HYT tesisinin kurulum aşamaları, beton yol yapımı ve yorulma deneylerinde elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre yaklaşık 1 milyon ESAL yüklenmiş olan 2*2 metre uzunluklarına sahip 24 plakta yorulmalar öncesi ve sonrasında oluşan çatlaklar incelenmiştir. Bu çatlaklar tek sıra hasır donatı yerleştirilen plaklarda, hasır donatı olmayan plaklara oranla 6 kat daha az olduğu görülmüştür. Ağır tonajlı ve sık yüklemeye rağmen beton yollarda yüklemeye sonrası kayda değer çatlak oluşmadığı görülmüştür. Bu noktada hasırla güçlendirilmiş beton yolların ağır ve sık yüklemeye oldukça uygun olduğu sonucuna tekrar ulaşılmıştır.

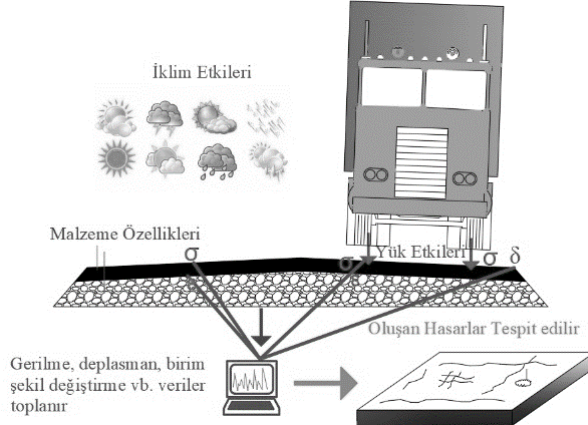
Anahtar Kelimeler: Hızlandırılmış Yol Testi, Beton Yollar, Mekanistik Ampirik Deneyler, Ulaşım, Üstyapı.

1 Giriş ve Literatür

Ulaşım yapıları hakkında laboratuvar ortamında yapılan deneylerde, arazi şartları ve yükün uygulama şekli tam olarak modelleyememektedir. Bu nedenle bilim insanları, yol yapıları hakkında tam zamanlı deneyler yapabilmek için iki yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerden biri hızlandırılmış yol testleri (HYT) ikincisi ise uzun dönemli kaplama performans programlarını (LTPP) (long term pavement performance) olarak adlandırılmaktadır (Steyn, 2012).

Ulaşım yapıları hakkında yapılan deneysel çalışmaların büyük kısmı kaplama, üst ve alt yapı hakkında olmaktadır. Bu deneler neticesinde yol hakkında çeşitli bilgi ve performans değerlerinin bilinmesi, ileride yapılacak yatırımlarda, tasarruf, sürdürülebilirlik, konfor vb. birçok konuda daha verimli yollar yapılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle ilk defa 1966 yılında yayımlanan AASHTO (American Association of State Highway Officials) yollar hakkındaki deneysel veriler ile teknik şartnamelerden oluşmaktadır (Kırbaş, Gürsoy, 2007). Bu verilerin zamanla her yol için aynı sonucu vermediği gözlemlenmiş ve yollarda tam ölçekli ve mümkün mertebe bütün değişkenlerin değerlendirileceği kaplama deneylerine ihtiyaç duyulmuştur. Yukarıda da belirtildiği gibi iki deney yöntemi ile bu bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır. Her iki yöntem de yol modeli olarak tam ölçekli kaplama/üstyapı çalışmalarına imkân verdiği için, fonksiyonel veya yapısal bütün faktörler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki benzer konularda laboratuvar çalışmalarında genellikle alınan numuneler ile laboratuvar ortamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, arazi deneyleri kadar çeşitli ve doğru sonuçlar vermemektedir (Hugo, Martin, 2004).

LTPP yol inşaatları sırasında belirlenen yol kesitlerinde çeşitli ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi ve bu yolların uzun vadeli ve sürekli hasar takip ile incelenmesiyle oluşturulan bir deney yöntemidir. Böylelikle yollar üzerinden geçen araç/dingil sayısı oluşan gerilmeler ve oluşan hasarlar hakkında toplanan bilgiler ile değerlendirilmektedir. İlk olarak ABD’de kaplamalarının uzun dönem davranışlarında oluşan problemleri tespit etmek ve çeşitli faktörlerin (iklim, malzeme özellikleri, trafik tasarımı, ilk yapım, bakım vb.) kaplama üzerindeki etkilerini belirlemek için tasarlanmıştır. LTPP 1984’de planlanmış 1987’de ilk sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır. Veriler 2578 farklı test kesitinden alınmıştır ve halen daha yeni test kesitleri yapılmaya devam etmektedir (FHWA, 2010). Test kesitlerinin tamamı servise açık hizmet veren yollarda hazırlanmıştır. Bu yollarda yapılan deneyler dünyanın en uzun süreli ve en geniş kapsamlı kaplama deneyleri olmuştur. Böylelikle; temelde iki soruya cevap verilmeye çalışılmıştır: “Neden servise açık yolların bazıları diğerlerinden daha uzun ömürlü olmaktadır?” ve “Yollar ne zaman ve nasıl bozulmaktadır?” (Kırbaş, Gürsoy, 2007, FHWA, 2010, Miller, Bellinger, 2003, Menendez, 2017) Şekil 1’de LTPP’lerin çalışma özeti gösterilmektedir (Çelik, 2019)



Şekil 1. LTPP çalışmalarının görsel özeti [7].

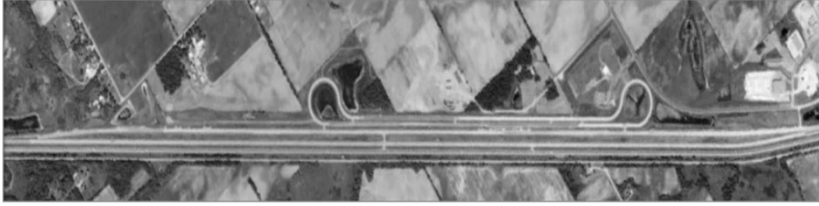
Hızlandırılmış yol testi (HYT-Accelerated Pavement Test-APT) tesisleri ise dingil yüklerini istenilen miktarda ve sıklıkta, kontrollü şekilde nem, ısı gibi çevresel şartların istenilen seviyelerde uygulanabildiği, bu sayede yol katmanlarında oluşan hasarların kısa sürelerde tespit edilebildiği tesislerdir (Çelik 2019, Steyn, Hugo, 2016). HYT tesislerinde, istenilen zamanda bilgi alınan, çalışmayı engelleyecek her türlü olumsuz etkilerden uzak ve dinamik yükler ile çalışan bir sistem olduğundan arazi ölçümlerine çok yakın değerleri veren testler yapılabilmektedir (Metcalf, 1996, Jameson vd. 1992). HYT çalışmaları yapan birçok laboratuvar kısa sürelerde, uzun vadede yolda oluşan veriler elde edebilmektedir (3-12 ay gibi sürelerde 5-20 sene arasında yüklemeyi yapabilmektedir) (Metcalf, 1996, Jameson vd. 1992, Huang, 2017, Nokes Vd., 1996, McCullough Vd., 1996). NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) , hızlandırılmış yol testini: “Yasal dingil yükü veya üzerinde bir yükü, belirli bir tekerlek tipi seçilerek, kontrollü şekilde hızlandırılmış, oluşan hasarların birikmesini deney süresi ile ilişkilendiren ve bu esnada kaplamanın (Yol yapısının) tepki ve performansını belirleyen kontrollü bir uygulamadır.” olarak tanımlamıştır (Metcalf, 1996). 1950’li yıllarda ABD’de ilk HYT tesisi kurulmuştur, günümüzde ihtiyaç nedeniyle ABD’de yaklaşık 40 adet tesis bulunmaktadır. Bu kadar çok fazla tesis olması konu hakkında deney çalışmalarının düzenlenmesi gereğini doğurmuştur bu nedenle ABD içerisinde bulunan NCHRP tarafından HYT’lerle ilgili 3 farklı tarihte hazırlanan dokümanlar ile konu hakkında düzenlemeler ve bilgilendirmeler yapılmıştır. Bu dokümanlar sırasıyla şöyledir; NCHRP 235 (Metcalf 1996), NCHRP 325 (Hugo, Martin, 2004) ve NCHRP 433 (Steyn 2012).

HYT’lerin küçük bir modeli olan ALF’ler (Accelerated Loading Facility) ise tekerleğin sabit olarak tutulduğu yerde yukarı aşağı inip kalkarak yüklemeyi yaparak altında test edilen yol modelini yorulmaya maruz tuttuğu sistemler olarak çalışmaktadır. ALF’ler genellikle özel veya basit sistemlerin çalışıldığı ve HYT/LTPP gibi detaylı sonuçların toplanmadığı sistemlerdir. Maliyetinin az olması ve deneylerin nispeten daha kolay yapılabilir olması nedeniyle birçok yerde deneylerde ALF’ler kullanılmaktadır (Huang, 2017).

HYT ile LTPP çalışmaları karşılaştırıldığında, HYT'ler; kontrollü olmaları, yükün ayarlanabiliyor olması (LTPP'lerde o an oradan geçen araçların yükü deneyde kullanılır), deney ekipmanı için ortamın her zaman bulunuyor olması ve her zaman yükleme yapılabilme gibi üstünlüklere sahiptir. HYT tesisleri genellikle trafik olan yollarda yapılmadıklarından, deneyler sırasında trafik hiç aksamamaktadır. Ancak LTPP'ler de bazı özellikler ile HYT'lerden üstündür. Örneğin yapılan deneyin doğrudan arazi üzerinde olması (Bazı HYT'ler mobil olduklarından doğrudan arazi üzerinde deney yapılabilir) böylelikle sonuçların yerinde görülmesi, yük dağılımının daha doğru olması gibi özellikleri ile HYT'lere göre daha üstündür. Bazı kaynaklar, HYT ve LTPP çalışmalarının beraber yürütülmesinin faydalı olacağı fikrindedir ve laboratuvar deneyleri ile iki çalışma türünün desteklenmesi gerektiğini savunur (Metcalf, 1996). LTPP deneyleri yapılamayan ortamlarda, HYT deneyinde tasarlanan yol tipi ve iklim yapısına sahip ulaşım yapılarında gözlemsel incelemeler yapılmasında fayda vardır (Huang, 2017). Dünya üzerinde birçok gelişmiş ülkede HYT tesisi bulunmaktadır. Amerika, Kanada, Çin, Japonya, Kore, İngiltere, Fransa, Almanya, İspanya, Hollanda, Güney Afrika, Brezilya, Avustralya ve benzeri birçok ülke bu tesise sahiptir. Çin 10 adet, Japonya ise 4 adet ile ABD'den sonra en çok tesise sahip olan ülkelerdir. Tesislerin ortalama maliyetlerinin 2-3 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir (Huang, 2017). Örnek olması açısından birkaç tanesinden bahsetmek gerekirse; Caltrans Hvs (California Department of Transportation) 1994 yılında kurulmuştur. En önemli özelliği mobil olmasıdır. İstenilen yerde deney yapma imkânı sağlamaktadır. 15- 20 yılda yapılan gözlemleri, 2-3 ay gibi kısa bir sürede yapmak için oluşturulmuş sistemdir. Dışarıda yüklenici hizmeti veren firmalara da test imkânı sunabilmektedir. Sistem en az 120 tonluk vinçler ve 7-10 dingilli treylerler ile taşınabilmektedir (FHWA, 1990, Christopher 2000). ATLAS, Illinois Üniversitesi bünyesinde geliştirilmiş ve ulaştırma laboratuvarları kapsamında bulunmaktadır. 1993 yılında 2 Milyon dolarlık yatırımla yapılmıştır. 4 palet üzerinde hareket edebilir olduğundan çeşitli arazi/iklim koşullarında kullanılmaktadır. Tek Çift Lastik veya uçak lastiği ile yükler iletilebilmektedir. 0-36.5 Ton arası hidrolik başlıkla yükleme yapılabilir. ATLAS, deneyler sırasında günlük sıcaklık değişimlerini kayıt etme özelliğine sahiptir. Oluşan statik ve dinamik bütün verileri toplayabilecek veri toplayıcılarına sahiptir. 26 metresinde yükleme yapılmaktadır. Bunun yaklaşık 20 metresinde sabit hız, kalanı ise frenleme mesafeleridir. İki yönde de maksimum hız 4.47 m/s (10 mph) 'dir. Yanal yönde 3 metre oynayabilir. Bir günde 9 ton 5 Milyon ESAL (Equivalent Single AxleLoad) yükleyebilir (URL 1, 2019, Kohler, Roesler, 2006). Şekil 2'de görülen Crrel-Hvs Amerika Ordusunun Mühendislikte soğuk hava araştırmalarını yapan kurumunun Şekil 2'de görülen tesisidir. -6 ile 26 Derece arasında soğutucu bir depoda devamlı donma çözünme etkisi ile oluşan deformasyonları incelemektedir. Tekerlek yükleri 2 ton ile 10 ton arası değiştirilebilmekte, böylelikle kamyon veya uçak yükleri modellenebilmektedir. 20 yıllık yüklemeler 6 ay gibi kısa sürede yüklenebilmektedir. Soğutma sistemlerine ek olarak zemin soğutma panelleri bulunmaktadır. (URL 1, 2019, URL 2, 2019) Mn/Road Minnesota'da 1991-1993 arası 25 milyon dolar harcanarak tamamlanmış tesislerdir. Şekil 3'de görüldüğü gibi paralel iki yoldan oluşmaktadır. 3.5 km'lik test düzeneği günde 26,400 araçlık yükleme kapasitesine sahiptir. Kaplamaların altından ve üstünden nem, ısı ve don verileri alınmaktadır (URL 1, 2019, URL 3, 2019).



Şekil 2. CRREL-HVS Soğuk hava deposuna yapısı (URL 2, 2019).



Şekil 3. Açık alanda içinde dōngüleri olan Mn/Road HYT tesisi (URL 3, 2019).

2 KTÜ HYT Tesisi Özellikleri ve Kurulumu

Türkiye'nin ilk tam ölçekli HYT Tesisi Karadeniz Teknik Üniversitesi bünyesinde 2010 yılında kurulmuştur. İlk kurulduğunda açık alanda hizmet veren tesis çeşitli nedenlerden dolayı kapalı hale getirilmiştir. Bu hali ile tesisin boyutları 35 metre uzunluk ve 7 metre genişlik şeklindedir. 35 m²'lik kısmın sadece 26 metesinde verimli deney yapılabilmektedir. Kalan kısmı ofis olarak kullanılmaktadır. Tesisin elektrik kısmı sanayi tipi elektriktir. Tesis içerisinde su ve internet hattı bulunmaktadır. Şekil 4'de tesisin kapatıldıktan sonraki hali görülmektedir.



Şekil 4. KTÜ HYT tesisi kapatılmasından sonra görüntüsü

Tesiste bir ofis kapısı bir de büyük ana kapı bulunmaktadır. Tesisin ana kapısı sayesinde HYT yükleme cihazı Şekil 5’de görüldüğü gibi gerek duyulduğunda dışarıya çıkartılabilmektedir. Böylelikle arazi çalışmaları yapılmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca tesis içerisinde yapılacak kaplama veya üstyapı modellerinin imalatı da yükleme cihazı dışarıda olduğunda yapılabilmektedir.



Şekil 5. HYT yükleme cihazı dışarıya çıkartılması.

Yükleme cihazı üzerinde 6’da görüldüğü gibi kamyon dingilini temsil eden tekerlekler mevcuttur (E). Bu tekerleklerin ölçüleri 295/80R 22.5 şeklindedir ve tekerlekler bir elektrikli motor (A) ve ucunda bir redüktör (E) yardımıyla döndürülmektedir. Sistemin yükleme sistemi 2 adet piston (D) ve bir hidrolik pompadan oluşmaktadır. Her bir piston bir tekerleği yüklemektedir. Elektro manyetik frenler sayesinde, binlerce fren yapmasına rağmen mekanizma aynı hassasiyette çalışmaktadır. Sistemde durma ve iz değiştirme gibi hassas işlemler sensörler yardımıyla yapılmaktadır (G). Sistemin, frenleme esnasında meydana gelebilecek herhangi bir problemin sisteme hasar vermemesi için hareketli sistemin ana sisteme temas noktasına yaylar mevcuttur (F). Ayrıca elektrikli motor ve redüktörün ağırlığını dengelemek amacıyla hareketli sistemin diğer tarafına ağırlık monte edilmiştir (C). Bu sayede sistemde yük dengesi sağlanmış olup hareket esnasında momentten oluşabilecek sıkıntılar önlenmiştir (Akpınar, 2010).



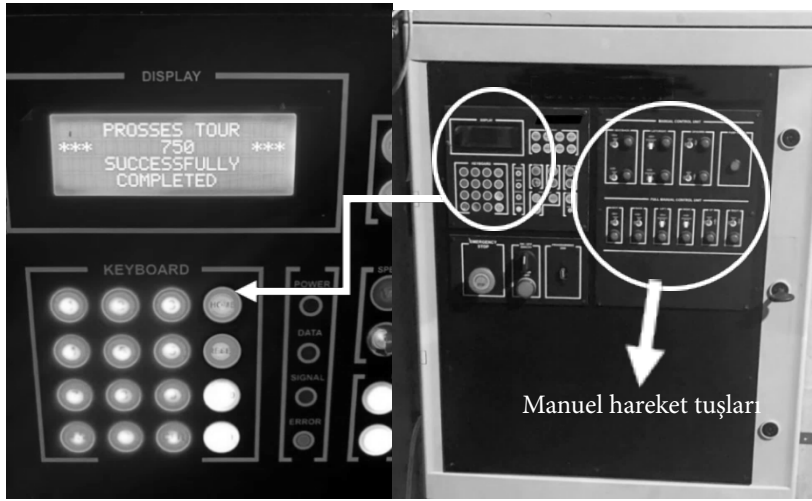
Şekil 6. KTÜ HYT kurulumu ve çalışma mekanizmaları [20].

Sistemin temel özellikleri Dünya çapında bulunan sistemlere uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Tablo 1 incelendiğinde sistemin iki tekerleği toplamda 80-127 kN arasında yüklenebilmektedir. Dünya üzerindeki HYT tesisleri 10-440 kN arası yük uygulayabilmektedir. Sistem en yüksek hızda tam güzergâhta çalıştırıldığında saatte 400 yükleme yapabilmektedir. Bu şekilde yükleme yapıldığında gün içerisinde 9600 geçiş kapasitesine sahiptir. Ancak hızlı ve dinlendirmeden çalışma tavsiye edilen bir çalışma değildir. Dünya üzerinde bulunan çeşitli HYT tesislerinden, tam ölçekli olanların maksimum yükleme sayıları da yaklaşık bu seviyelerdedir. Sistem farklı modlara sahiptir. En çok kullanılan modlarından; 1. mod istenilen güzergâhta gidip gelmesinden oluşmaktadır. 2. Modda ise sistem istenilen güzergâhta gitmekte dönüşünde sensörler vasıtasıyla tanıtılmış başka sabit bir güzergâh üzerinden dönmektedir. Sistemde mevcut 8 mod bulunmaktadır ve bu rakam istenildiği zaman artırılabilir. Hız aralığı 2 ile 15 km/saat arasında ince ayarla değiştirilebilmektedir.

Tablo 1. KTÜ HYT'nin özellikleri

Tesisin Adı	Yük (kN)	Tekerlek Özellikleri	Yük Tekrar Sayısı	Yükleme Şekli	Yükleme Yönü	Hız (km/sa)
KTÜ-HYT	127	295/80R 22.5	Max. 400 Yük/ Saat	Doğrusal	İki Yönlü	2-15

Sistemdeki bütün hareketler otomasyon sistemi vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Şekil 7'de görülen TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği) katkılarıyla yaptırılan otomasyon sistemi ve panosu; hareket, duruş, yükleme, hız ve iz değiştirme işlemlerinin zamanlamasını yapmaktadır. Pano yardımıyla sisteme farklı modlarda yüklemeler/frenleme girilebilmekte ve gerekirse yeni modlar eklenebilmektedir. Ayrıca pano gerek görüldüğünde manuel hareketlerle de izin vermektedir.



Şekil 7. TÇMB tarafından desteklenerek yapılan otomasyon sistemi.

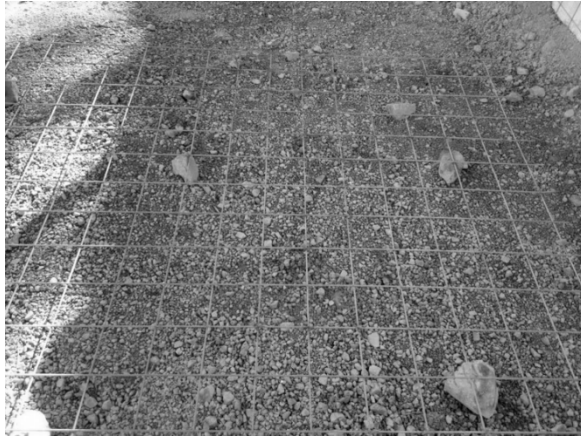
3 Tesise Deney için Beton Yol Yapılması

KTÜ bünyesinde bulunan HYT tesisinde, ilk olarak 2011 yılında deneyler için Şekil 8'de görüldüğü gibi 18 cm kalınlığında 6 metre genişliğinde ve 16 metre uzunluğunda beton yol yapılmıştır. Beton plaklar C 20/25 basınç dayanımına sahiptir.



Şekil 8. Tesiste deneyler için beton yol yapımı.

Beton yollar 4 metrede bir tam derzler ile ayrılmış böylelikle 4 tane plak oluşturulmuştur. İlk 4 metrelik kısımda Şekil 9’da görüldüğü gibi 150*150 mm. göz açıklığında ve Ø6 mm. çapa sahip tek sıra S 220 çeliğinden Q tipi A252 hasır donatı serilmiştir.

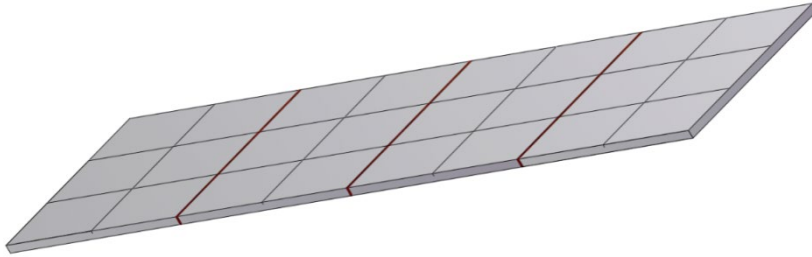


Şekil 9. 1. Beton plak içerisine tek sıra hasır donatı yerleştirilmesi

Tesisin içerisinde beton yapımı bittikten sonra yarım Şekil 10’da görüldüğü gibi derz kesimleri yapılmıştır. Tam derzler ile 4*6 metrelik plaklar haline imal edilen beton yol güzergahı her bir plağın ortasında ve boyuna 2 tane yarım derz kesilerek Şekil 11’de görüldüğü gibi 2*2 m’lik plaklar haline gelmiştir. Boyuna derzler beton yolu 3 ayrı güzergâha bölmüştür.



Şekil 10. Beton plaklarda derz kesimi.



Şekil 11. Tam ve yarım derzler ile oluşan 2*2 m uzunluklara sahip beton plaklar.

4 Beton Yolun Yorulma Çalışmaları

Tesis içerisindeki beton plaklar ilk üretildikleri tarihten itibaren 2010-2017 arası çeşitli deneyler sırasında devamlı yük ve çevresel etki altında kalmışlardır. Ayrıca beton plakların her bir güzergâh (boyuna derzler ile ayrılan üç kısım) 25,000 kere ağır dingil yükü ile olmak üzere toplamda 75,000 kere daha yüklenerek yorulmuştur. Yüklemeler aynı doğrultuda bir gidiş bir geliş şeklinde olmaktadır. Yani her bir tur iki yüklemeyi temsil etmiştir. Yükleme cihazı her bir güzergâhta 25,000 yükleme yaptıktan sonra yatay hareket ettirilerek diğer güzergâh üzerine getirilmiştir. Yükleme hızı 3 km/saat olarak ayarlanmıştır (15 km/saate kadar çıkabilmektedir.). Böylelikle yolun daha uzun süreli yüke maruz kalması sağlanmıştır. Beton plakların yorulması günde 1,000 yükleme yapılmak suretiyle yaklaşık 90 günde bitirilmiştir. Yüklemeler her bir teker 32 kN olmak üzere toplam 64 kN yükle yapılmıştır. Yükleme sırasında uygulanan yük çifttekerde 64 kN kadardır bu tam bir dingilde 128 kN'a karşılık gelmektedir. Literatürde bulunan dingil eşdeğerlik faktörü (LEF) formüllerine göre bu yükün ESAL karşılığı 5.93 olmaktadır (Çelik, 2019). Yani bir yükleme 5.93 ESAL değerindedir. Ayrıca hızlandırılmış yol tesislerinde yükleme ile ilgili verilen literatür bilgilerine göre; hızlı tesiste yollar çok sık yorulmaya tabi tutulduğundan her bir yüklemenin arazi şartlarında 1.5-3 kat yüklemeye karşılık geldiği belirtilmektedir (Metcalf, 1996, Perez, Vd., 2011, Romanoschi, Vd., 1998). Bu çalışma kapsamında sistemin hızının yavaş olması, ağır tonaj olarak seçilmesi ve günde 1,000 yükleme yapılmasından dolayı yük tekrar sayısının gerçek arazi koşullarına göre en az 2 kat fazla olacağı kararı verilmiştir. Bu hali ile yüklemenin ESAL değerleri arazi şartlarında tesisin

içerisindeki beton yolun 889,500 kere yorulduğu anlaşılmaktadır. Şekil 12’de yorulmalar sırasında tekerleklerin beton plağa temas ettiği alan gözükmektedir. Yüklemeler bittiğinde her c güzergahta Şekil 13’de görüldüğü gibi kauçuk izi oluşmuştur.



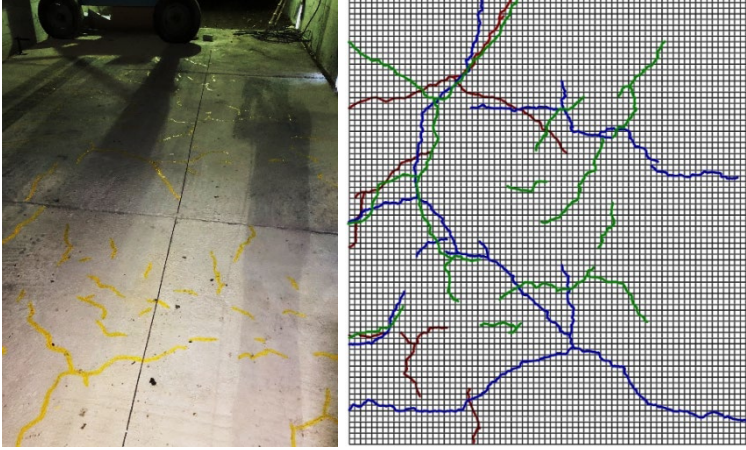
Şekil 12. Tekerlerin beton plaklara temas alanı.



Şekil 13. Yüklemeler sonrasında oluşan kauçuk izi.

5 Bulgular

Yüklemeler ncesi ve sonrası oluşan çatlaklar işaretilenerek yaklaşık 1 milyon ESAL sonrası beton plaklarda çatlak oluşup oluşmadığı veya mevcut çatlakların uzayıp uzamadıkları incelenmiştir. Yüklemeler ncesi aşağıda Şekil 14’de görüldüğü gibi plaklar üzerinde çatlaklar önce boyanmış sonrada bilgisayar ortamına taşınmıştır. Ayrıca çatlakların kalınlık incelemesi de yapılmıştır.



Şekil 14. Plaklarda yüklemeler öncesinde tespit edilen çatlaklar

Yapılan incelemelerde şu sonuçlar elde edilmiştir.

- Yüklemeler öncesinde 7 yıllık beton plaklarda ortalama $0,7075 \text{ m}^2/\text{m}^2$ çatlak tespit edilmiştir.
- Tespit edilen çatlakların tamamı rötre çatlağı ve benzeri çatlaklar olduğu görülmüştür.
- Çatlaklar genellikle orta güzergâhta ve tam derzlerden uzak noktalarda toplandığı görülmüştür.
- Hasır donatılı plaklarda ortalama $0,158 \text{ m}^2/\text{m}^2$ olduğu halde hasır donatı koyulmamış plakların ortalama birim m^2 'de çatlak oluşumunun yaklaşık 6 kat arttığı ve $0,983 \text{ m}^2/\text{m}^2$ olduğu görülmüştür.
- Yaklaşık 1 Milyon ESAL yüklemesinin sonrasında birkaç cm çatlak artışı tespit edilmiştir. Bu hali ile yüklemelerin çok az yeni çatlak oluşturduğu veya eskiden var olan ama tespit edilemeyecek kadar ince olan çatlakları görülebilir hale getirdiği tespit edilmiştir.

6 Sonuçlar ve Öneriler

Türkiye’de ilk ve tek tam boyutlu hızlandırılmış yol testi olan KTÜ-HYT bünyesinde daha önceki deneylerde kullanılmış 7 yıl önce inşa edilmiş beton güzerağ 2*2 plaklar haline getirilmiş ve yaklaşık 1 Milyon ESAL yüklenmiştir. Yüklemeler sonucunda birkaç cm çatlak oluşumu tespit edilmiş, ancak bu çatlakların yüklemeler öncesinde var olan ancak tespit edilemeyecek kadar dar olan ve yüklemeler sırasında ortaya çıkan çatlaklar olduğu düşünülmüştür. Buna göre beton yolların hızlı ve ağır tonajlı yüklemelere karşı oldukça başarılı sonuçlar verdiği bir kez daha görülmüştür. Ayrıca az da olsa donatı kullanılması beton plaklarda özellikle ilk yapım sırasında oluşan rötre çatlaklarını yaklaşık 6 kat azalttığı tespit edilmiştir.

Beton yollar ülkemizde yeni yeni yayılan kaplama tipidir. Bu yollar hakkında daha fazla mekanik bilginin ve kısa sürede tecrübenin artırılması gerekmektedir. Bu hususta 3 ayda en az 10 yıllık yüklemeye yapılan HYT’nin daha fazla kullanılması gerekmektedir. Bu hususta dünya bilimine katkı sağlayabilmesi için Türk bilim insanlarının hizmetinde olan KTÜ-HYT’ye daha aktif kullanılması için her türlü işbirliğinin uygun olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmaların hayata geçirilmesinde gerekli maddi destek 217M481 numaralı TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından sağlanmıştır. Katkılarından ötürü teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Akpınar, M., V., Hızlandırılmış Yol Testi, THBB, 97, (2010) 63-65.
- Çelik M., “İşlevsel Hasarlı Beton Yollarda Asfalt Takviye Tabakası Kullanımının Mekanistik Ampirik Yöntemlerle Araştırılması” Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon 2019
- Christopher, B., Maintenance of Highway Edge Drains, NCHRP Synthesis of Highway Practice 285, Transportation Research Board, Washington, 2000.
- FHWA, Long-Term Pavement Performance Program-Accomplishments and Benefits 1989-2009, Summary Report, FHWA-HRT-10-072, US. Department of Transportation, 2010.
- FHWA, Technical Guide Paper on Subsurface Pavement Drainage, Technical Paper 9001, Federal Highway Administration, Washington, 1990.
- Huang, Y., Evaluating Pavement Response and Performance with Different Simulative Tests, Virginia Polytechnic Institute and State University, Doktora Tezi, Blacksburg, Virginia, 2017.
- Hugo, F. ve Martin, A., E., Synthesis of Highway Practice 325: Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2004.
- Jameson, G., W., Sharp, K., G., ve Vertessy, N., J., Full-depth asphalt pavement fatigue under accelerated loading: The Mulgrave (Victoria) ALF trial, 1989/1991, Australian Road Research Board, Washington, 1992.
- Kırbaş, U. ve Gürsoy, M., Üstyapı Yönetim Sistemlerinde Kullanılan Veri Türlerinin Sınıflandırma Yöntemleri, 7. Ulusal Ulaştırma Kongresi, Eylül 2007, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 364-373
- Kohler, E. ve Roesler, J., Accelerated Pavement Testing of Extended Life Continuously Reinforced Concrete Pavement Sections, Project IHR-R32, Illinois Cooperative Highway Research Program, Illinois, 2006.
- McCullough, B., F., Dossey, T., Cho, Y., H., Case Study Of Overlay Performance on Rigid Pavement in Bowie County, Transportation Research Record, National Research Council, Texas, 1996.
- Menendez, R., Application of the Long Term Pavement Performance LTPP Data Base, Global Approaches on Sustainable Pavements, Cancún, Meksika, Ağustos 2017.
- Metcalf, J., B., The Application of Full Scale Accelerated Pavement Testing,

NCHRP Synthesis 235, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 1996.

Miller, J. ve Bellinger, W., Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program, Report No: FHWA-RD-03-031, Federal Highway Administration, 2003.

Nokes, W. A., P. J. Stolarksi, C. L. Monismith, J. T. Harvey, C. Coetzee, and F.C. Rust, Establishing the California Department of Transportation Accelerated Pavement Testing Program, in Transportation Research Record 1540, pp. 91-96, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1996.

Perez, S., A., Balay, J., M., Tamagny, P. ve Pelit, Ch., Accelerated Pavement Testing and Modelling of Reflective Cracking in Pavements, Engineering Failure Analysis, 14, 8 (2007), 1526-1537.

Romanoschi, S., A., Metcalf, J., B., Li, Y., ve Rasoulia, M., Assessment of Pavement Life at the First Full-scale Accelerated Pavement Test in Louisiana, Paper presented at the 1998 TRB Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, 1998.

Steyn, W., J., Significant findings from full-scale accelerated pavement testing, NCHRP Synthesis 433, Transportation Research Board, Washington, 2012.

Steyn, W., J. ve Hugo, F., Perspectives on Trends in International APT Research, in The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, Springer International Publishing, 2016.

URL-1: [https://sites.google.com/site/afd40web/homeFullScale/Accelerated Pavement Testing \(AFD40\)](https://sites.google.com/site/afd40web/homeFullScale/Accelerated%20Pavement%20Testing%20(AFD40)). 11 Aralık 2018.

URL-2: [http://www.erd.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article View/Article/476780/PavementTestingFacility](http://www.erd.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article%20View/Article/476780/PavementTestingFacility). 11 Aralık 2018.

URL-3: <http://www.dot.state.mn.us/mnroad/index.html> Minnesota's Cold Weather Pavement-Testing Facility. 30 Aralık 2018.

İki Farklı Teknik ile Beton Yol Uygulamaları, Manisa Örneği

Eray Özkan, Serdinç. Bulut, Kurtuluş Kuruçay

Manisa Büyükşehir Belediyesi, Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı, Manisa, Türkiye

Özet

Bu çalışmada Manisa ili, Saruhanlı ve Alaşehir ilçelerinde uygulaması yapılan beton yol çalışmalarında izlenen süreç, yapım aşamaları ve elde edilen bulgular yer almaktadır. Yol üstyapısı bozuk olan Saruhanlı ve Alaşehir ilçelerindeki mahalle yollarında Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) ve Beton Finişi ile olmak üzere iki farklı yapım yöntemi izlenmiş, sonuçlar kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton Yol, SSB, Beton Finişi

1 Giriş

İçinde bulunduğumuz çağda artan nüfus ve ticari gelişmeler doğrultusunda tüm dünyada ulaşım ihtiyaçlarının artmakta olduğu aşikardır. Günümüzde, bu ihtiyacın giderilmesi için tüm ulaşım sistemlerinde sürekli olarak alt ve üstyapı yatırımları, artarak devam etmektedir. Tüm dünyada en çok kullanılan ulaşım sistemi olan karayollarında, artan yol ağı ile birlikte bakım-onarım gerektiren yol miktarı ve bunun sonucunda bakım-onarım harcamaları da artmaktadır. Ülkemizde de bu harcamaların giderek artması ve yol yapım ve onarımında kullanılan hammaddelerdeki dışa bağımlılık, ekonomik bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunun çözülebilmesi için; olabilecek minimum yapım maliyetlerinin sağlanması ve ülkenin öz kaynaklarının daha fazla kullanılabilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu noktada;

yol yapım malzemesi olarak beton kullanımı, diğer yol kaplama yöntemlerine kıyasla daha dayanıklı ve uzun yıllar bakım onarım gerektirmeden kullanılabilir yollar yapılmasını sağlamaktadır. Beton yolların ana bağlayıcı malzemesi üretimi yerli kaynaklara dayanan çimentodur. Ülkemizin dört bir yanında çimento fabrikaları yer almakta olup; ülkemiz çimento sektöründe Avrupa'nın en büyük, dünyanın ise beşinci büyük üreticisi, ihracatta dünya pazarında altıncı sırada yer almaktadır (T.C. Ekonomi Bakanlığı, 2016). Bu sebeple, yol üst yapısında betonun tercih edilmesi kamu kaynaklarının etkin kullanımını sağlayacaktır. Buna ilave olarak, yol yapımında betonun bir alternatif olarak kullanılması ile birlikte yol yapım sektöründe rekabetin artacağı ve piyasa şartlarının iyileşerek teklif fiyatlarının düşmesi de mümkün olacaktır.

Beton yolların sağladığı ekonomik faydalar yalnızca yapım maliyetleriyle sınırlı değildir. Esnek üst yapılar oranla yol yüzeyinin daha düzgün olması ile birlikte lastiklere etkileyen sürtünme kuvveti de azalmaktadır. Böylece beton yollarda daha az yakıt tüketimi sağlanmaktadır. Taylor ve Patten (Taylor ve Pattern, 2002) tarafından Kanada'da yapılan çalışmada, farklı iklim koşulları, farklı ortalama hızlar ve yükleme koşulları altında; asfalt ve beton yollarda seyahat eden araçlarda beton yollarda yapılan seyahatlerde 100km mesafede 0,4 ile 0,7 litre arasında yakıt tasarrufu sağlandığı görülmüştür. Beton Yollarda, asfalt yollara göre daha az yakıt tüketimi sağlanması hem ekonomik olarak ciddi tasarruf sağlarken çevresel etkiyi de en aza indirmektedir. Ayrıca; Çelik ve Akpınar (Çelik ve Akpınar, 2015) yaptıkları çalışmada belirli bir süre hizmet veren rijit üst yapıların, sonrasında yapılacak olan esnek kaplamalar için temel görevi göreceğini belirtmiş, bu tipteki uygulamalarda rijit üst yapıların kırmataş veya plentmiks malzemelerden daha dayanıklı olacağını vurgulamışlardır.

Bunlarla birlikte; beton yolların esnek üst yapılar oranla taşıma kapasitesi oldukça yüksektir. Ağır taşıtların yoğun kullanıldığı kesimlerde yolculuk çatlakları, tekerlek izleri gibi deformasyonların gözlemlenmemesi sebebiyle yurtdışı uygulamalarda özellikle beton yollar tercih edilmektedir. Ayrıca, yollarda rijit üst yapı kullanılması ile, trafik yükleri esnek üst yapılar oranla daha geniş bir alana yayılır ve böylece çok fazla üst yapı tabakasına ihtiyaç duyulmaz.

Ülkemizde; il yolları, devlet yolları ve otoyollar Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluk sahası içerisinde yer almaktadır. Bu yolların büyük bir çoğunluğu sathi ve asfalt kaplama olup, beton yolların oranı ise bir hayli düşüktür. İlk olarak 2004 yılında başlayan beton yol imalatları kapsamında; Afyonkarahisar-Emirdağ yolunda 2km, Hasdal Kemerburgaz yolunda 3,5km, Ordu-Ulubey yolunda 1km ve İzmit-Karamürsel yolunda 1,6km olmak üzere toplam 8,1km beton yol imalatı yapılmıştır. 01.01.2019 tarihi itibarıyla 67.333km olan toplam yol ağının (www.kgm.gov.tr, 2019) yalnızca 8,1km'lik kısmı beton yoldur. Öte yandan, mahalle yolları ile şehirlerde bulunan meydan, bulvar, cadde ve ana yolları yapmak, yaptırmak, bakım ve onarımını sağlamak belediyeler ve il özel idarelerin sorumluluk alanına girmektedir. Net bir istatistik bilgi bulunamamakla birlikte, bu yolların toplam uzunluğunun 350.000 km'den fazla olduğu tahmin edilmektedir. Bu yol ağlarında da son yıllarda rijit üst yapılar olan ilgi artmış, Antalya, Samsun, Kocaeli Büyükşehir Belediyeleri gibi yerel idareler özellikle

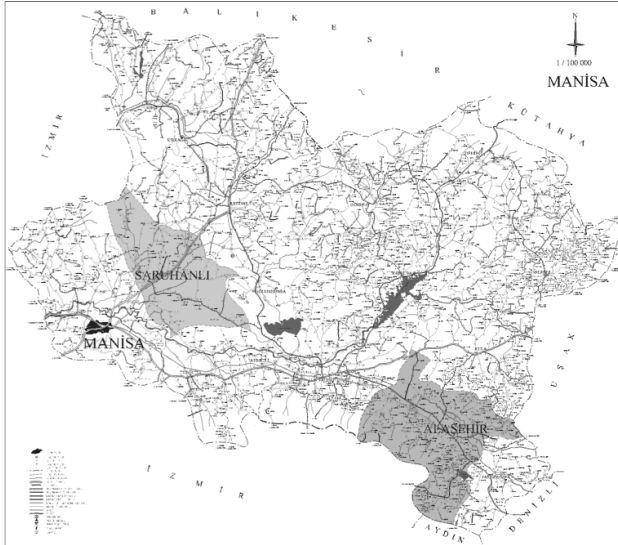
mahalle yollarında beton yol imalatları gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışma ile, Manisa Büyükşehir Belediyesi, Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı'nın 2019 yılı içerisinde yapılan ve yapım işleri halen devam eden beton yol uygulamaları hakkında bilgiler verilecektir. Beton yol uygulamasının tasarım, maliyet ve yapım aşamalarına değinilecek olup, halihazırda yapım işleri tamamlanan yaklaşık 13km'lik kısım ile ilgili veriler aktarılacaktır.

2. Manisa Büyükşehir Belediyesi Mevcut Yol Ağı

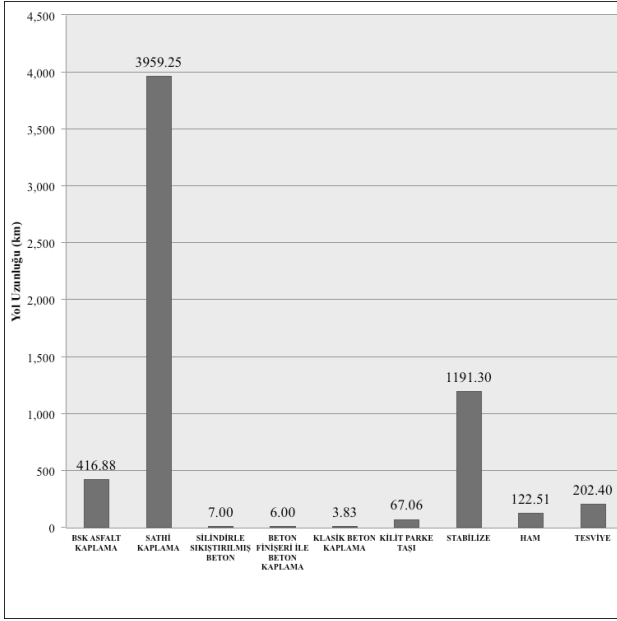
2012 yılında yayımlanan 6360 sayılı kanun ile Manisa ilini de kapsayan toplam 13 ilde Büyükşehir Belediyesi kurulması karara bağlanmış, böylece Manisa ili büyükşehir vasfı kazanmıştır. 2014 yılındaki mahalli idareler seçimi sonrasında büyükşehirlerde il özel idareleri kapatılmış, Manisa İl Özel İdaresinden ve ilçe belediyelerinden aktarılan yollar ile birlikte; Manisa Büyükşehir Belediyesi 5.976,22 km yol ağına sahip olmuştur. Mevcut yol ağı ve beton yol uygulaması yapılan Alaşehir ve Saruhanlı ilçeleri Şekil 1 ile gösterilen haritada incelenebilir.

Şekil 1. Manisa Büyükşehir Belediyesi yol ağı ile Alaşehir ve Saruhanlı ilçeleri



Manisa Büyükşehir Belediyesi sorumluluk sahasında bulunan mevcut yol ağının büyük bir kısmı halihazırda sathi kaplamadır. Bununla birlikte, istatistiki verileri bulunmayan, 2014 yılı öncesinde büyük çoğunluğu sanayi bölgelerinde olmak üzere 3,83km yapım işleri tamamlanmış beton yol bulunmaktadır. 2019 yılı Eylül ayı itibariyle mevcut yol ağının kaplama türlerine göre dağılımı Şekil 2' de verilmiştir.

Şekil 2. Manisa Büyükşehir Belediyesi güncel yol ağının kaplama türlerine göre dağılımı



3 Tasarım Aşamaları

2018 yılında ülkemizde yaşanan döviz kurundaki dalgalanma, ithal ürünlerin fiyatlarına yüksek artışlar şeklinde yansımıştır. Petrol türevi bir ürün olan bitüm malzemesinin bağlayıcı olarak kullanıldığı asfalt malzeme ile yol yapım maliyetleri de bu artışlardan nasibini almış, asfalt yol yapım maliyetleri hızlı bir şekilde yükselmiştir. Bu yükseliş hem yüklenicileri hem de idareleri zor durumda bırakmış, yol üstyapı kaplamalarında alternatif arayışına gidilmiştir. Bu doğrultuda; bakım-onarım masraflarının düşük olması, uzun ömürlü ve belki de hepsinden önemlisi yerli üretim olması sebebiyle beton yol yapımı, Manisa Büyükşehir Belediyesince asfalt yollara en uygun alternatif olarak belirlenmiştir.

Yapılan uygulama çalışmasına bir AR-GE projesi gibi yaklaşmış, klasik beton yapımından farklı olarak yol üstyapısı bozuk olan Saruhanlı ve Alaşehir ilçelerinde seçilen mahalle grup yollarında Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) ve Beton Finişi ile olmak üzere iki farklı yapım yöntemi izlenerek beton yol yapımı gerçekleştirilmiştir. Her iki farklı uygulamada da kaplama tipi olarak *Derzli Donatısız Beton Kaplama* kullanılmıştır. Bu iki farklı yöntem ile üstyapısı yapılan yol kesimlerine ait geometrik özellikler Tablo 1 ile listelenmiştir.

Tablo 1. Beton kaplama yapılan yolların geometrik özellikleri

	YOL KAPLAMA YÖNTEMİ	
	SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ	BETON FİNİŞERİ İLE SERİLMİŞ
UYGULAMA İLÇESİ	SARUHANLI	ALAŞEHİR
UZUNLUK	7 km	6 km
PLATFORM GENİŞLİĞİ	7,2 m	7,2 m
MAX BOYUNA EĞİM	% 6	% 7

Beton yol yapımında çimento türü TS EN 197-1'e uygun olarak CEM II/B-M(L-W) 42,5R seçilmiştir. Bunun sebebi yapım uygulamalarının yaz aylarına denk gelmesi ile oluşan yüksek sıcaklık sonucu oluşabilecek ani prizlenmenin önüne geçebilmektir. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine (BYKTS, 2016) uygun olarak hazırlanan karışımda kullanılan agregalarda en büyük tane çapı 32mm seçilmiş, ayrıca su/çimento oranının yaklaşık 0,40 olmasına dikkat edilerek C30/37MPa beton sınıfı kullanılmıştır.

3.1 Beton Kaplama Kesit Tayini

Beton yol uygulamalarında kaplama kalınlığının tayini; tekrarlı trafik yüklerinden dolayı yol kaplamasına etkiyen yüklere, beton dayanımına ve zemin sınıfının parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerden yola çıkarak elde edilen dayanımı sonucunun aynı zamanda istenilen konforu da karşılayacak nitelikte olması beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında uygulanan beton yol kaplamalarının kesit kalınlıklarının tayini için pratik bir yöntem aranmış ve sonuç olarak Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından hazırlanan *Caddeler ve Yerel Yollardaki Derzli Beton Kaplamalarının Tasarım Rehberi* (ACI, 2002) 'nden faydalanılmıştır. Rehberde yer alan kalınlık tasarımı, düşük hacimli cadde ve yerel yollar için Portland Çimento Birliği ve benzeri kuruluşların katkıları ile oluşturulan tablolar yardımı ile yapılmaktadır. Tabloların oluşturulmasında yoğun akışkan temel üzerine elastik döşeme kaplaması analizinin saha gözlemleri ile modifiye edilmesi ve yorulma etkilerini de içerecek şekilde geliştirilmesi ile elde edilmiştir.

Kesit kalınlığının bu yöntem ile belirlenmesinde; doğal zemin yatakla katsayısı (k) değeri, beton eğilme dayanımı (kopma modülü), trafik sınıflandırması ve yıllık ortalama günlük kamyon trafiği (ADTT) verileri bilindiğinde, kaplama kalınlığı abak tablolardan doğrudan elde edilmektedir. Alaşehir ve Saruhanlı ilçelerinde uygulaması yapılan beton yolların kaplama kalınlıklarının tayininde kullanılan veriler Tablo 2 ile belirtilmiş olup, tasarımda kullanılan abak tablolar ise Tablo 3 ile verilmiştir. Uygulamada yol kenarlarında destek vazifesi görebilecek herhangi bir hendek veya bordür çalışması yapılmamış, rehberde de buna uygun olarak yanal desteği olmayan kesimler için hazırlanan abak tablosundan yararlanılmıştır.

Tablo 2. Beton kaplama yapılan yolların kesit tayininde kullanılan özellikler

	<u>YOL KAPLAMA YÖNTEMİ</u>	
	SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ	BETON FİNİŞERİ İLE SERİLMİŞ
UYGULAMA İLÇESİ	SARUHANLI	ALAŞEHİR
DOĞAL ZEMİN YATAKLAMA KATSAYISI (k)	27,80 MPa/m	20,68 MPa/m
BETON EĞİLME DAYANIMI (KOPMA MODÜLÜ) (MOR)	4,54 MPa	4,54 MPa
TRAFİK SINIFLANDIRMASI	Kollektör	Kollektör
YILLIK ORTALAMA GÜNLÜK KAMYON TRAFİĞİ (AADT)	20	50

Tablo 3. Kaplama kalınlığı, mm (bordür, hendek veya banket kullanılmayan kenarları desteksiz uygulamalar) (2002)

$k = 13.5 \text{ MPa/m}$					$k = 27 \text{ MPa/m}$					Traffic classification	
MOR MPa					MOR MPa						
3.4	3.8	4.1	4.5	4.8	3.4	3.8	4.1	4.5	4.8		
175	175	150	150	150	175	150	150	150	125	ADTT = 3	Light residential
200	200	175	175	150	175	175	175	150	150	ADTT = 10	Residential
200	200	200	175	175	200	175	175	150	150	ADTT = 20	Collector
200	200	200	175	175	200	175	175	175	150	ADTT = 50	
250	225	225	200	200	225	200	200	175	175	ADTT = 50	Minor arterial
250	225	225	200	200	225	200	200	200	175	ADTT = 100	
275	250	225	225	200	250	225	200	200	200	ADTT = 500	
275	250	225	225	200	250	225	200	200	200	ADTT = 100	Major arterial
275	250	250	225 [*]	225 [*]	250	225	225	200	200 [*]	ADTT = 500	
300	275	250	225	225	275	250	225	225	200	ADTT = 400	Business
300	275	275	250 [*]	250 [†]	275	250	250	225	225 [*]	ADTT = 800	
300	300	275 [*]	275 [†]	275 [‡]	275	250	250	250 [*]	250 [‡]	ADTT = 1500	Industrial
250	250	225	225	200	225	225	200	200	175	ADTT = 300	
275	250	225	225	225 [*]	250	225	225	200	200	ADTT = 700	Industrial
300	275	250	250	225	275	250	225	225	200	ADTT = 400	
300	300	275	250 [*]	250 [†]	275	250	250	225	225 [*]	ADTT = 800	—
$k = 54 \text{ MPa/m}$					$k = 81.5 \text{ MPa/m}$					Traffic classification	
MOR MPa					MOR MPa						
3.4	3.8	4.1	4.5	4.8	3.4	3.8	4.1	4.5	4.8		
150	150	125	125	125	150	125	125	125	125	ADTT = 3	Light residential
175	150	150	150	125	150	150	150	125	125	ADTT = 10	Residential
175	175	150	150	150	175	150	150	150	125	ADTT = 20	Collector
175	175	150	150	150	175	150	150	150	125	ADTT = 50	
200	200	175	175	150	200	175	175	150	150	ADTT = 50	Minor arterial
200	200	175	175	175	200	175	175	150	150	ADTT = 100	
225	200	200	175	175	200	200	175	175	175	ADTT = 500	
225	200	200	175	175	200	200	175	175	175	ADTT = 100	Major arterial
225	200	200	200	200 [*]	225	200	200	175	175 [*]	ADTT = 500	
250	225	225	200	200	225	225	200	200	175	ADTT = 400	Business
250	225	225	200	200 [*]	225	225	200	200	200	ADTT = 800	
250	225	225	225 [†]	225 [‡]	250	225	225	225 [*]	225 [†]	ADTT = 1500	Industrial
225	200	200	175	175	200	200	175	175	175	ADTT = 300	
225	200	200	175	175	200	200	175	175	175 [*]	ADTT = 700	Industrial
250	225	225	200	200	225	225	200	200	175	ADTT = 400	
250	225	225	200	200 [*]	225	225	200	200	200	ADTT = 800	—

Note: 1 in. = 25.4 mm; and 1 psi/in. = 0.27 MPa/m.

^{*}If doweled, thickness can be decreased by 13 mm.

[†]If doweled, thickness can be decreased by 25 mm.

[‡]If doweled, thickness can be decreased by 38 mm.

[§]If doweled, thickness can be decreased by 50 mm.

3.2 Maliyet Analizi

Bu çalışma kapsamında sunulan Manisa ili Alaşehir ve Saruhanlı ilçelerinde iki farklı kaplama yöntemi kullanılarak yapılan beton yolların yaklaşık maliyetleri, 2019 yılı için ilgili kamu kurumları tarafından yayımlanan birim fiyatlar kullanılarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, yol yapımında kullanılan farklı kaplama yöntemlerinin ilk yapım maliyetlerinin kıyaslanabilmesi için, **Tablo 4** (AASHTO, 1986) kullanılarak yolun hizmet ömrü boyunca 3-10 milyon adet aralığında 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısında yüklenen yollarda uygulanan Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Asfalt kaplamasına ait yaklaşık maliyetler de hesaplanmıştır. BSK kaplaması hesabında 5cm aşınma, 8cm binder, 20cm plentmiks temel ve 25cm kırmataş temel tabakaları kullanılmıştır.

Tablo 4. Dingil yüküne göre üstyapı kalınlıkları (AASHTO, 1986)

Esnek Üstyapı (cm)	T8,2: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca (Milyon)										
	3-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-65	65-80	80-100	100-160	160-250	>250
Aşınma	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Binder	8	6	6	6	7	7	7	8	8	8	8
Bitümlü Temel	0	8	9	10	10	11	12	12	14	16	18
Plentmiks Temel	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Kırmataş Temel	25	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25
Derzli Donatısız Rijit Üstyapı (cm)	T8,2: 8,2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı - Yolun hizmet ömrü boyunca (Milyon)										
	3-10	4-10	20-30	30-40	40-50	50-65	65-80	80-100	100-160	160-250	>250
Beton Kaplama	19	22	23	25	25	26	27	30	33	36	38
Kırmataş Alttemel	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	25

SSB ve Beton Finişi ile uygulanan beton yolların maliyetlerinin sağlıklı bir şekilde kıyaslanabilmesi için her iki yöntemde de eşit kalınlık olarak 19cm beton kaplama ve 20cm kırmataş alttemel uygulamasına göre maliyet hesapları yapılmış, elde edilen maliyetler **Tablo 5** ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Farklı kaplama yöntemlerine ait 2019 yılı birim fiyatları ile yaklaşık maliyetleri

KAPLAMA YÖNTEMİ	KAPLAMA KALINLIĞI	BİRİM	2019 BİRİM FİYATI (TL/m ²)	7m GENİŞLİĞİNDE 1km YOL YAPIM MALİYETİ
SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON	19cm Beton ve 20cm Alttemel	m ²	94,34	679.261,15 TL
BETON FİNİŞERİ İLE SERİLMİŞ BETON	19cm Beton ve 20cm Alttemel	m ²	101,52	730.913,48 TL
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIM ASFALT	5cm Aşınma, 8cm Binder, 20cm PMT ve 25cm Temel	m ²	143,63	1.034.149,76 TL

Farklı kaplama yöntemleri için sunulan maliyetler, ilgili kurum birim fiyatları kullanılarak hesaplanan yaklaşık maliyetlerdir. İmalatların gerçek maliyetleri; uygulama alanının konumu, saha koşulları, işçilik kalitesi, işin büyüklüğü ve hatta yüklenicinin ekonomik gücü gibi bir çok etkene bağlı olarak değişiklik arz etmektedir.

4 Beton Yol İmalatları

2019 yılı içerisinde Manisa ili Alaşehir ve Saruhanlı ilçelerinde iki farklı kaplama yöntemi kullanılarak yapılan beton yolların uygulamaları ile ilgili fotoğraflar Şekil 3 ile Şekil 8 arasında gösterilmektedir. Yol üstyapısı bozuk olan Saruhanlı ve Alaşehir ilçelerinde seçilen mahalle grup yollarında SSB ve Beton Finişi ile olmak üzere iki farklı yapım yöntemi izlenerek beton yol yapımı gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda kaplama tipi olarak *Derzli Donatsız Beton Kaplama* kullanılmıştır. Her iki grup yolda da platform genişlikleri ortalama 7,2m olup, yatay ve düşey eksenler yol geometrisi olarak birbirlerine benzerlik arz etmektedir.



Şekil 3. Silindirle sıkıştırılan beton yol uygulaması, beton kıvamı



Şekil 4. Silindirle sıkıştırılan beton yol uygulaması, serim ve kütleme



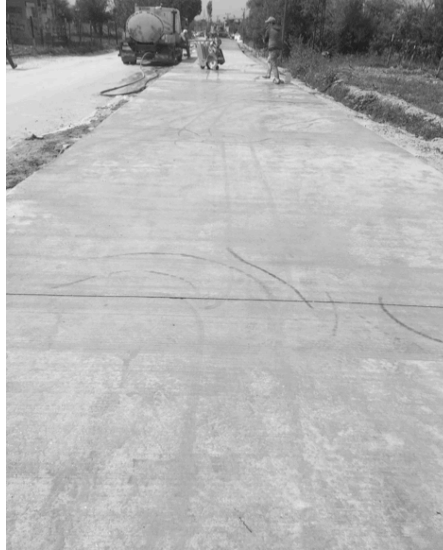
Şekil 5. Silindirle sıkıştırılan beton yol uygulaması, son durum



Şekil 6. Beton finişeri ile serilen beton yol uygulaması, serim



Şekil 7. Beton finişeri ile serilen beton yol uygulaması, yüzey pürüzlendirme



Şekil 8. Beton finişeri ile serilen beton yol uygulaması, derz kesimi ve son durum

5 Sonuç ve Öneriler

Ülkemiz çimento üretiminde bölgede söz sahibi olmasına rağmen, yol imalatlarında ağırlıklı olarak bitümlü kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Bu durum dışa bağımlılığa yol açmakta olup, bunun yanı sıra yol yapım maliyetleri de küresel ekonomik verilere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Nitekim 2018 yılında döviz kurlarında yaşanan ani yükseliş, maliyetlerin hızla artmasına yol açmıştır. Yaşanan ekonomik sıkıntılar yalnızca yol yapımıyla sınırlı kalmamış, bir çok sektör bu dalgalanmadan etkilenmiş, tüm yurttan tasarruf tedbirleri hayata geçirilmiştir. Tüm diğer kamu kurumları gibi Manisa Büyükşehir Belediyesi de bu bağlamda hareket ederek, ekonomik açıdan özellikle uzun vadede daha avantajlı olan beton yol uygulamalarını hayata geçirmiştir.

Manisa il sınırları içerisinde 2019 yılı itibarıyla; Saruhanlı ilçesinde SSB yöntemi ile 7 km uzunluğunda ve Alaşehir ilçesinde Beton Finişi ile 6 km uzunluğunda beton yol imalatları yapılmıştır. Bu imalatlar yaz aylarında tamamlanarak yollar kullanıma açılmış olup, il bazında beton yol yapım çalışmaları halen devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında beton yol yapım işleri tamamlanan grup yollarında; imalat yöntemlerinin birbirlerine kıyasla farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Beton Finişi kullanarak imalatı gerçekleştirilen yollarda sathi düzgünlüğü SSB ile yapılan yollara kıyasla daha iyi seviyededir. Öte yandan, her ne kadar iki uygulamanın birim fiyatları birbirlerine oldukça yakın olsa da SSB yaklaşık maliyetleri Beton Finişli imalata kıyasla %7,6 daha ekonomik olmaktadır. SSB imalatlarının Beton Finişli imalatlara oranla daha ekonomik olmasındaki temel etken; serme ve sıkıştırma işlemlerinin asfalt ekipmanları ile yapılabilmesi ve yüzeyde herhangi bir tamamlayıcı işleme (kürleme, pürüzlendirme vb.) gerek olmamasıdır.

Beton Finişi kullanarak yapılan beton yollar ile ilgili olarak; yaklaşık 7m genişliğindeki mahalle grup yollarındaki bazı imalatlarda, platformun her iki yanında ilave terasman oluşturulması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Beton finişi çalışması prensibi gereği, finişi her iki yanındaki taşıyıcı paletlerin düzgün sayılabilecek bir satıhta ilerlemesi gerekmektedir. Yapılan imalatlarda finişi paletlerinin denk geldiği bölgelere beton seriminin yapılamamakta olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, Beton Finişi uygulamasının yapıldığı platform genişliğinin az olduğu yollarda yaklaşık 1 m genişlikte ilave temel imalatlarının yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Ekonomik avantajlarının yanı sıra; tamamen yerli malı yapı malzemeleri kullanılarak üretilmesi, Manisa bölgesinde neredeyse her iklim koşulunda imalat yapılabilmesi ve asfalt kaplamalara kıyasla uzun süre bakım ve onarım gerektirmeden kullanılabilirliğini muhafaza etmesi sebepleriyle beton yollar, özellikle mahalle grup yollarında BSK asfalt ve sathi kaplama yollara iyi bir alternatif konumundadır. Manisa ili sınırları içerisinde yapılan iki farklı yol uygulaması sonucunda; beton yol imalatlarında SSB yönteminin kullanılmasının, mahalle grup yollarında Beton Finişi kullanarak yapılan imalatlara göre daha uygun bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır. Beton yol uygulamalarında uzun dönemde karşılaşılabilecek

yüzeyde çatlak oluşumu, zemin oturmaları, yüzeyde pürüz oluşumu ve altyapı inşaatları gibi problemler incelenecek, ilerleyen yıllarda maliyet analizleri yapılarak beton yol imalatları planlamaları yeniden yapılacaktır.

Kaynaklar

- AASHTO, 1986. American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D.C.
- American Concrete Institute Committee 325. 2002. Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads. ACI Report 325. 12R-02.: American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 2016. Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Çelik, M. ve Akpınar, M.V., (2015). Uzun Süre Hizmet Veren Beton Yol Kaplamalarının Temel Malzemesi Olarak Yerinde Yeniden Kullanılması: Doğu Karadeniz Bölgesi Uygulamaları. 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan 2015, Antalya.
- Devlet ve İl Yolları Envanteri, Satış Cinsine Göre Yol Ağı (km). Son erişim 24.10.2019. Karayolları Genel Müdürlüğü.<http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGM-documents/Istatistikler/DevletIIYolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf>
- İhracat Genel Müdürlüğü, Kimya Ürünleri ve Özel İhracat Daire Başkanlığı, 2016. Sektör Raporları, Çimento Sektörü, Türkiye Cumhuriyeti Ekonomi Bakanlığı, Ankara.
- Taylor, G. and Patten, J., (2002). Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption. Centre for Surface Transportation Technology (CSTT), National Research Council of Canada (NRC), Ontario, Canada.

New Jersey Tipi Beton Bariyerler İçin Yaralanma Şiddetinin (ASI) Optimal Ağırlıklı Noktasal Birlik Metamodeller ile İyileştirilmesi

Dr. Sedat Özcanan, Prof. Dr. Ali Osman Atahan

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Özet

Malzeme ve montaj/demontaj kolaylığının sağladığı avantajla beraber, sürdürülebilirlik ve çarpışmadan sonra oluşan minimum deformasyonun sağladığı tamir kolaylığı yol kenar güvenliği hususunda beton bariyerlerin tercih edilmesini öne çıkarmaktadır. Fakat rijit sistemler olması nedeniyle beton bariyerler çarpma durumunda yaralanma riski yüksek sistemlerdir. Öncelikli uygulama amacı güvenlik olması nedeniyle, ilgili standartlarda ki gerekli güvenlik kısıtlarını sağlayacak, çevre ve özellikle sürücüler açısından yüksek güvenli olan tasarımlar istenmektedir. Bu çalışmada New Jersey tipi beton bariyer için öncelikli EN1317/2 standardındaki güvenlik kriterlerini sağlayan, ivme/hızlanma çarpma endeksi (ASI)'ne bağlı yaralanma seviyesini düşüren eniyi güvenli tasarım, benzetim tabanlı tasarım eniyilemesi yoluyla yapılmıştır. Sonuç olarak; önerilen analitik model ve izlenen yol yardımıyla yaygın olarak kullanılan orijinal modelle aynı kesit alanına sahip, fakat yaralanma güvenlik seviyesi %22-23 daha düşük tasarım elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: NJ tipi beton bariyer, Radyal tabanlı fonksiyon, metamodel tabanlı eniyileme

1 Giriş

Beton bariyerler, kaza anında araçların yoldan ayrılmasını engellemek ve/veya trafik güvenliğini ihlal etmeyecek şekilde yönlendirmek için kullanılan hareketli, yola paralel koyulan engellerdir. Bunlar, araç ve yaya trafiğini çalışma alanlarından uzak tutmak, işçileri korumak, iki yönlü trafiği ayırmak ve karayolu çalışma alanlarındaki inşaat ekipmanlarını korumak için sıklıkla kullanılan en yaygın yol kenarı donanım türlerinden biridir. Taşınabilirliği ve çok yönlülüğü, öncelikle ihtiyat payı az olan alanlarda avantaj sağlar. Tipik olarak, bölümlendirilmiş bariyerler, bir yük taşıyıcı bağlantı ile uçtan uca tutturulur. Bariyerin bölümlendirilmesi, çalışma alanında kolayca kurulmalarını ve sökülerek yeniden konumlandırılmalarını sağlar. Beton bariyerlerin yardımcı bir aparat ile yere yarı kalıcı uygulamalarda mevcuttur. Yukarıda bahsedildiği üzere farklı uygulama amaçları için kullanılan beton bariyerlerin ilgili standartlardaki güvenlik kısıtlarını sağlamaları gerekmektedir. Özellikle yol kenar güvenliği amacıyla tasarlanan bariyerlerin sağlaması gereken minimum güvenlik ölçütleri, dünyada referans olarak alınan MASH (2009) ve EN1317 (2014) standartlarında belirtilmiştir. Bariyer tasarımı süreci baştan sona, hem nümerik hemde gerçek çarpışma testi gerektiren maliyetli bir süreçtir. Ampirik ve nümerik testleri ekonomik ve zaman açısından maliyetli olan mühendislik tasarımlarında, bu maliyet yükünü büyük ölçüde azaltan gerçek modeli taklit eden metamodel yöntemler geliştirilmiştir.

Deneysel ve hesaplamalı simülasyon teknikleri karmaşık mühendislik sistemlerinin tasarımında ve optimizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Queipo ve diğ., 2005; Forrester ve diğ., 2007; Gorissen ve diğ., 2010; Song ve diğ., 2013). Tasarım ve optimizasyon için kullanılan bu teknikler yüksek maliyet ve doğruluk oranı gerektirmektedir (Peri and Campana, 2005; Yang ve diğ., 2016). Optimizasyon işlemlerinin maliyetli ve zaman alıyor olması, sürdürülebilirliği açısından önemli bir problemdir. Bu problemin üstesinden gelmek için, deneysel ve hesaplamalı simülasyon tekniklerinin yerine geçen (substitute) vekil modeller (surrogate) (metamodel olarak da bilinir) kullanılmaktadır (Ong ve diğ., 2005). Vekil modeller, sınırlı veriler ile sistem girdileri ve çıktılar arasında gerekli ilişkiyi kurarak hesaplama açısından pahalı simülasyon modelleri veya deneylerini taklit etmek için kullanılır. Polinom yanıt yüzeyi (PRS) (Draper and Smith, 2014; Yang ve diğ., 2016), Kriging (KRG) (Matheron, 1963; Sacks ve diğ., 1989a, 1989b), radyal temel fonksiyonu (RBF) (Fang and Horstemeyer, 2006) ve destek vektör regresyonu (SVR) (Vapnik, 1998; Girosi, 1998), gibi birçok vekil model türü, birçok yapı ve multidisipliner tasarım optimizasyonu probleminde başarıyla uygulanmıştır.

Son dönemde yapılan çalışmalarda, hem küresel hem de yerel tahmin doğruluğunu yakalayabilen melez vekil modeller geliştirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmalarda, uyarlanabilir melez vekil modeller genellikle sabit ağırlığa sahip melez modellerden daha iyi performans gösterdiği ispatlanmıştır (Acar, 2010a; Zhang ve diğ., 2012). Liu ve diğ. (2016), RBF modellerinin yerel olarak doğru tahminlerini farklı temel fonksiyonlarla birlikte birleştirmek için optimal ağırlıklı noktasal birlik (OWPE) geliştirdiler. Bu çalışmada, geliştirilen RBF-OWPE melez modelinin Acar (2010b), AHF (Zhang ve diğ., 2012), Goel (2007) ve Lee and Choi (2014) melez/topluluk modellerinden daha doğru tahminler yaptığı belirtilmiştir.

Daha önce yol kenar güvenliği elemanları (Hou ve diğ., 2014a, 2014b; Yin ve diğ., 2016; Yin ve diğ., 2017; Ozcanan and Atahan, 2019a, 2019b) ve çarpışma dayanıklılığı (Acar, 2010b; Acar, 2014) konularında yapılmış başarılı RBF tabanlı optimizasyon çalışmaları mevcuttur.

Bu çalışmalardan alınan motivasyonla, bu çalışmada NJ tipi beton bariyerin OWPE-RBF yöntemiyle optimizasyonu amaçlanmıştır.

2 Yöntem

2.1 Radyal Temel Fonksiyonu (RBF) ve Optimal Ağırlıklı Noktasal Birlik (OWPE)

RBF, çok boyutlu enterpolasyon yöntemlerinden biridir ve pahalı sayısal simülasyonları içeren mühendislik sistemi tepkilerine yaklaşmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Yin ve diğ., 2016). Bu fonksiyonlar, dağınık çok değişkenli veri enterpolasyonu için geliştirilmiştir (Benki ve diğ., 2017). Teorik olarak, gerçek amaç işlevi ve yaklaşık ise, RBF'nin temel formu şu şekilde formüle edilebilir:

$$\tilde{y}_{RBF}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \beta_i \phi_i(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) = \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\phi} \quad (1)$$

Burada n örneklem sayısı, \mathbf{x} değişkenlerin n - boyutlu bir vektördür, \mathbf{x}_i örnekleme noktasındaki tasarım değişkenlerinin i nci vektörüdür, ϕ_i temel fonksiyondur, $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$ Öklid mesafesi ve β_i i nci temel fonksiyonunun katsayısıdır.

RBF'yi oluşturmak için, Tablo 1'de listelenen yaygın olarak kullanılan temel fonksiyonların bazıları verilmiştir. Burada, d Öklid mesafesi ve c ($c > 0$) kullanıcı tanımlı bir sabittir.

Tablo 1. RBF enterpolasyonu için sık kullanılan bazı temel fonksiyonlar (Özcanan, 2019)

İsim	Fonksiyon
Multikvadrik-MQ	$\phi(d) = \sqrt{c^2 + d^2}$
Ters multikvadrik-TMQ	$\phi(d) = 1/\sqrt{c^2 + d^2}$
Gauss-GA	$\phi(d) = \exp(-cd^2)$
Kübik-KB	$\phi(d) = (c + d)^3$
İnce plakalı yiv-İPY	$\phi(d) = d^2 \ln(cd^2)$
Liner-LN	$\phi(d) = cd$

Katsayı vektörü $\boldsymbol{\beta}$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\boldsymbol{\phi}^{-1} \cdot Y = \boldsymbol{\beta} \quad (2)$$

Hesaplamalı olarak pahalı bir kara kutu işlevi için bir RBF modeli oluşturduktan sonra, modelin tahmin doğruluğu değerlendirilmelidir. Öncelikle, metamodellerin yerel doğruluğunu ölçmek gerekir. Bu nedenle, sadece gözlemlenen noktalardaki veriler için çapraz doğrulama hata ölçütü kullanılması gerekir. Genelleştirilmiş ortalama kare çapraz doğrulama hatası (GMSE), kareler (PRESS) istatistik tahmin hata toplamına çok benzemektedir. Eğer adet eğitim noktası varsa, her seferinde eğitim noktalarından her birini dışarıda bırakarak, defa metamodel oluşturulur. Daha sonra ihmal edilen noktadaki kesin cevap ile her değişken metamodel tarafından tahmin edilen arasındaki fark, küresel hatayı değerlendirmek için kullanılır.

$$GMSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y^k - \bar{y}^{(k)})^2 \quad (3)$$

Burada, y^k x_k noktasındaki gerçek cevaptır, $\bar{y}^{(k)}$ ise kinci tasarım noktası dışında tümü kullanılarak oluşturulan metamodelden çıkarılan noktaya karşılık gelen tahmini değerdir. (3) 'de görüldüğü gibi, eğitim noktalarının sayısı arttıkça, GMSE metriğini hesaplamının maliyeti de artmaktadır. Bu ölçüm, seçilen eğitim noktalarındaki tahmini cevap ortalama bir hata değeri verir. Bu nedenle, eğitim noktalarının sayısına ve dağılımına bağlı olarak, GMSE, girdi değişkenlerinin tüm alanında küresel bir hata kanıtı sağlamayabilir. Bu nedenle, bu hata ölçütü yalnızca metamodelin noktasal doğruluğunu ölçmek kaydıyla metamodeller topluluğunu (ensemble) inşa etmek için kullanıldı. Sonlu elemanlar (SE) modellerini doğrulamak ve metamodel topluluğunun yerel ve genel doğruluğunu hesaplamak için yapılan hata ölçümleri bir sonraki bölümde verilmiştir.

Metamodel'in noktasal hata hesaplamasından sonra, metamodel grubu aşağıdaki ifade edildiği gibi ağırlıklı toplam formülasyonu kullanılarak oluşturulur.

$$\bar{y}_e(x) = \sum_{j=1}^k w_j(x) \bar{y}_j(x)$$

Burada $\sum_{j=1}^k w_j(x) = 1$ (4)

Eşitlik (6)'da, \bar{y}_e inşa edilmiş grup/topluluk modelidir, \bar{y}_j jnci RBF modeli bileşenidir, $w_j(x)$ \bar{y}_j nin x noktasındaki ağırlığıdır ve k ise farklı temel fonksiyonlar ile oluşturulan RBF modelleri bileşenlerinin sayısıdır.

Bu çalışmada, gözlenen noktalardaki ağırlıkları elde etmek için 0-1 ağırlık stratejisini kullanıyoruz. Bu basit strateji, RBF grup modellerinin yerel olarak doğru tahminlerinde etkilidir.

2.2 Metamodel Doğrulama Ölçütleri

Hata miktarı belirleme yöntemleri, küresel ve yerel hata tahmin yöntemleri olarak sınıflandırılabilir (Goel ve diğ., 2007). Metamodelin tüm alan üzerindeki performansı genel hata ölçütleriyle değerlendirilirken, yerel veya nokta kaynaklı hata ölçütleri tasarım alanının farklı konumlarındaki vekil doğruluğunu sağlar.

RBF modellerinin doğruluğu "görece mutlak hata" (RAE) kullanılarak değerlendirilecektir. Görece mutlak hata, i nci test noktasında ki gerçek değer (y_i) ile tahmin değeri (\bar{y}_i) arasındaki farkın gerçek değere bölünmesidir. Göreceli mutlak hata (RAE) yerel sapmaların göstergesidir.

$$RAE_i = \left| \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \right| \quad (5)$$

Bu çalışmada aynı zamanda metamodellerin tüm tasarım uzayı üzerindeki genel doğruluğunu sınamak için “*k*-kat çapraz doğrulama”nın ortalama karesel hatası (RMSECV) (Meekesheimer ve diğ., 2002) kullanıldı.

$$RMSE_{cv} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_i^{(-i)})^2} \quad (6)$$

Burada, *k* çıkarılan örneklem noktalarının sayısıdır. Bu yöntemde, *k*'nin *i*'den *k*'ye değişimi araştırılır. Daha sonra her bir *k* değeri için, metamodelin genel doğruluğunun ölçülmesini sağlamak için *k*'nin mümkün tüm kombinasyonları için ortalama hata ölçümü yapılır.

Bu çalışmada, yerel hata ölçümleri için RAE ve genel hata ölçümü için *k*-kat çapraz doğrulama (RMSECV) kullanılmıştır.

2.3 Çok Amaçlı Eniyileme ve Problemi

Genel olarak çok amaçlı eniyileme problemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi formüle edilebilir;

$$\begin{cases} \min f_i(x), i = 1, \dots, m_f \\ \text{s. t. } g_j(x) \leq 0, & j = 1, \dots, m_g \\ h_k(x) = 0, & k = 1, \dots, m_h \\ x^l \leq x \leq x^u, & x = [x_1 \dots, x_m] \end{cases} \quad (7)$$

Burada *x* tasarım değişkenlerinin *n* boyutlu bir vektördür, $f_i(x)$ *i*nci amaç fonksiyonudur, $g_j(x)$ *j*inci eşitsizlik kısıtıdır ve $h_k(x)$ *k*inci eşitlik kısıtıdır. Tasarım aralıkları sırasıyla ile x^l ve x^u olarak verilmiştir, sırasıyla x^l 'in alt ve üst sınırlarını gösterir.

2.4 Latin Hiperküp Deney Tasarım Yöntemi

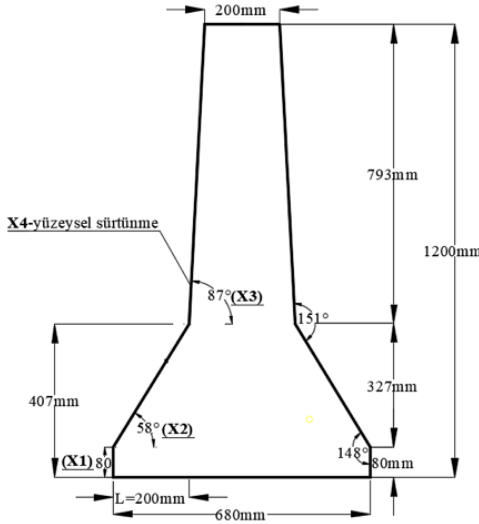
Daha az benzetimle eniyi koşulları belirleme işlemlerindeki adımlardan biri olan deneysel tasarım yöntemi, temsili tasarım noktaları oluşturmak için etkili bir yol sağlar. Benzetim tabanlı eniyileme çalışmalarının tasarım uzayında örnekler üreten yaygın olarak kullanılan deneysel tasarım yöntemleri, tam faktöryel tasarımı, Latin hiper küp tasarımı, merkezi kompozit tasarım ve Taguchi ortogonal dizisidir (Hou ve diğ. 2013, 2014; Yin ve diğ. 2016, 2017).

Bu çalışmada çeşitli örnekleme noktaları için Latin hiper küp tasarımı kullanıldı. Latin Hiperküp kullanılmasının nedeni uygulaması basit ve istikrarlı olmasıdır.

3 Yapılan Çalışmalar ve Bulgular

3.1 Çok Amaçlı Eniyileme İçin Değişkenler ve Amaç Fonksiyonları

Çalışma kapsamında yapılacak eniyileme için Şekil 1’de verilen NJ tipi beton bariyer tasarımında etkili kritik tasarım noktaları değişken ve bu tasarım noktalarının güvenlik değerlendirilmesinde kullanılan ve EN1317 de belirtilen çarpma şiddeti indeksi (ASI), Çıkış açısı (ÇA) ve Dönme açısı (DA) gibi ölçütler amaç fonksiyonu olarak alınmıştır (Özcanan, 2019). Bu değişkenler ve amaç fonksiyonlarının sınır değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu değerler NJ tipi bariyerin geometrik şeklini bozmayacak şekilde ayarlanmıştır. Sürtünme katsayısı-x4 ise değer büyüdükçe ASI değerinin büyüdüğü ve aracın takla atma olasılığının arttığı anlaşılmış olup, bu değer ne kadar küçük olursa o kadar iyi oldu tespit edilmiştir (Özcanan, 2019). Bundan dolayı eniyilemede x4 faktörü dikkate alınmamıştır.














Şekil 1. NJ tipi beton bariyerin kritik tasarım noktaları (Özcanan, 2019)

Tablo 2. Değişken ve amaç fonksiyonları için sınır değerleri (Özcanan, 2019)

Değişken ve Amaç Fonksiyonları	Sınır değerler
x1 (cm)	0-10
x2 (°)	55-65
x3 (°)	80-90
ASI	≤1.42
ÇA (°)	≤19
DA (°)	≤20

Tablo 2’de verilen tasarım değişkenleri, Latin Hiperküp Tasarım (LHD) metodu kullanılarak 11 tane örneklem noktası türetilmiştir. Bunun için MATLAB *lhsdesign* komutu kullanılmıştır. Türetilen örneklem değerleri ve bu değerler ile tasarlanan bariyerler Tablo 6’da görülmektedir. Bu tasarımların SE ortamında modellenmesi ile türetilen örneklemelere karşılık gelen ASI, ÇA ve DA amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri elde edilmiş ve Tablo 3’te verilmiştir.

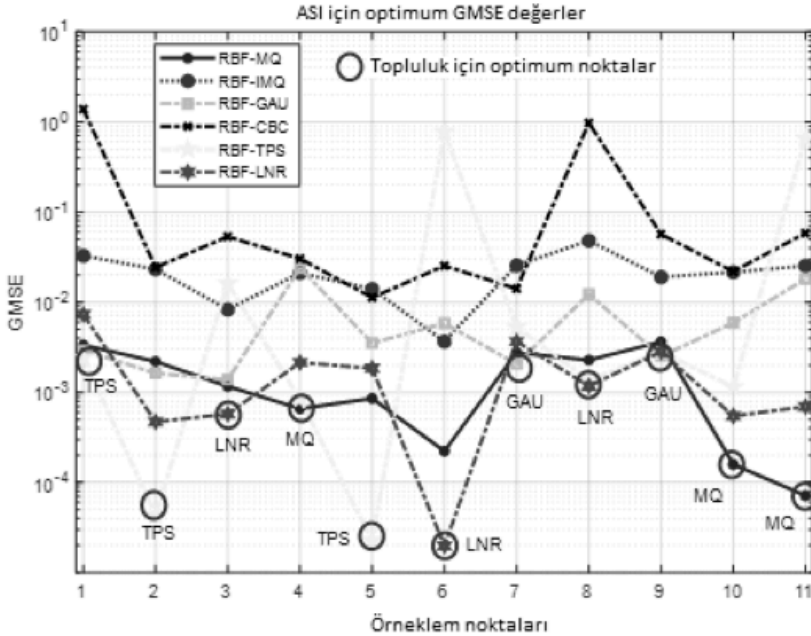
Tablo 3. Değişkenler ve amaç fonksiyonlarının SE benzetim sonuçları (Özcanan, 2019)

Örneklem	Değişkenler		Tasarım	Amaç fonksiyonları	
1	x1	5		ASI(t)	1.38
	x2	65		ÇA	9
	x3	89		DA	8
2	x1	4		ASI(t)	1.41
	x2	61		ÇA	4
	x3	90		DA	4
3	x1	6		ASI(t)	1.45
	x2	60		ÇA	3
	x3	88		DA	5
4	x1	3		ASI(t)	1.35
	x2	57		ÇA	8
	x3	81		DA	28
5	x1	0		ASI(t)	1.43
	x2	56		ÇA	5
	x3	83		DA	11
6	x1	7		ASI(t)	1.35
	x2	59		ÇA	4
	x3	85		DA	13
7	x1	10		ASI(t)	1.36
	x2	63		ÇA	9
	x3	86		DA	19
8	x1	2		ASI(t)	1.38
	x2	64		ÇA	4
	x3	81		DA	8
9	x1	9		ASI(t)	1.27
	x2	62		ÇA	2
	x3	82		DA	13
10	x1	1		ASI(t)	1.49
	x2	55		ÇA	5
	x3	84		DA	6
11*	x1	8		ASI(t)	1.53
	x2	58		ÇA	3
	x3	87		DA	35

*Standart ölçüler

3.2 Metamodellerin Kurulması

Yukarıda ki bölümde verilen değişken ve amaç fonksiyonları yardımıyla Bölüm 2.1’de açıklanan yol izlenerek RBF vekil modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin, “bir-dışarı çapraz doğrulama” tabanlı GMSE yöntemiyle doğrulukları ölçülmüştür. 11 adet değişkenin her birinin çıkartılması ile modelin o noktalar için yaptığı tahmin doğruluğu ölçülüp, GMSE hata ölçeceği ile hesaplanmıştır. ASI amaç fonksiyonuna ait her bir nokta için hesaplanan GSME değerleri aşağıda, Şekil 2’de verilmiştir. Şekilde işaretlenen en düşük hata noktaları belirlenerek, ASI, ÇA ve DA amaç fonksiyonlarına ait örneklem noktalarına ait ağırlık matrisleri Formül 8’deki gibi elde edilmiştir. değeri, nci RBF modelinin nci örneklem nokta etrafında daha doğru tahminler sağladığını göstermektedir. Formülden anlaşılacağı üzere ASI, ÇA ve DA amaç fonksiyonları için verilen OWPE-RBF modellerde 6 temel fonksiyonun (Tablo 1) her biri kullanılmıştır. Buradan anlaşıldığı üzere her bir fonksiyonun örneklem uzayında üstün olduğu bölgeler olabilmektedir. Bu anlamda metamodel kurulumunda münferit modeller yerine topluluk modellerin tercih edilmesi daha yüksek doğrulukta tahmin sağlamaktadır.

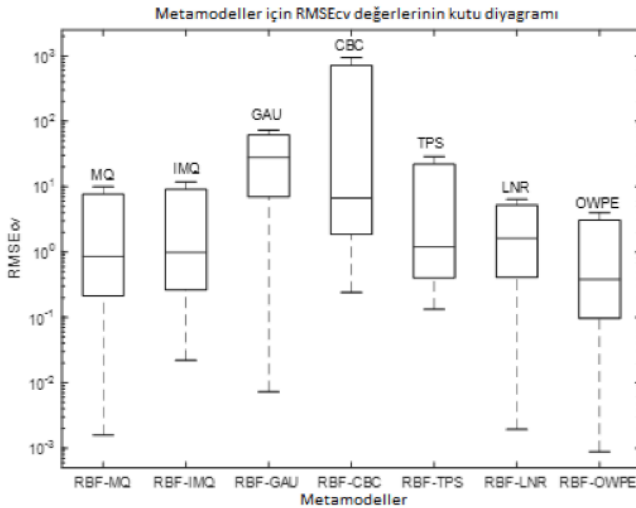


Şekil 2. ASI amaç fonksiyonuna ait optimal GMSE noktaları (Özcanan, 2019)

$$W_{ASI,EA,ROI1A} = [W_{MQ}W_{IMQ}W_{GAU}W_{CBC}W_{TPS}W_{LNR}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.3 OWPE-RBF Modellerin Doğrulanması

RBF modellerine ait amaç fonksiyonlarının hata değerlerinin, tüm modele ait ortalama hata değeri olarak ifadesi Şekil 3'te verilmiştir. Buradan anlaşıldığı üzere hata oranı en düşük model, başka bir deyişle tahmin doğruluk oranı en yüksek model OWPE topluluk modelidir. Sırasıyla, LNR, MQ, IMQ, TPS, GAU ve CBC modelleri gelmektedir. Münferit modeller yerine topluluk modellerin daha yüksek doğrulukta tahmin ettiği anlaşılmaktadır. Özellikle OWPE modelinin ortalama hata değeri 0-1.5 arasında olduğu görülebilir. $RMSE_{CV}$ tarafından eğitilmiş RBF'lerin, mühendislik tasarım modeline neredeyse mükemmel bir uyum sağladığını söyleyebiliriz. $RMSE_{CV}$ için 0 değeri mükemmel uyumu gösterir. RWF modelinin OWPE'si için elde edilen bu yüksek doğruluk oranının bir sonucu olarak, eniyileme ve mühendislik tasarım modellerinin sonuçlarının tutarlı olduğu söylenebilir. Bütün bunlar, bu çalışma sonucunda elde edilen eniyi değerlerin kullanılabilir olduğu desteklemektedir.



Şekil 3. RBF modellerinin $RMSE_{CV}$ değerleri (Özcanan, 2019)

3.4 MOO formulation and solution

Formül (7) 'de verilen eniyileme metodolojisi kullanılarak, ASI'ye bağlı yaralanma seviyesini azaltmak için NJ tipi beton bariyeri optimize etme problemi aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

$$\begin{cases} \text{Min. [ASI, } \zeta A, DA(x_1, x_2, x_3)] \\ \text{s. t.} & 0 \leq x_1 \leq 10 \text{ cm} \\ & 55 \leq x_2 \leq 65 \\ & 80 \leq x_3 \leq 90 \\ & \zeta A(x_1, x_2, x_3) \leq 19 \\ & DA(x_1, x_2, x_3) \leq 20 \end{cases} \quad (9)$$

Burada ASI, ζA ve DA amaç fonksiyonlarıdır. ASI; çarpma şiddeti indeksi, ζA ; çıkış açısı ve DA; dönme açısıdır. Eniyileme değişkenleri olarak x_1 , x_2 ve x_3 Şekil 2'de görüldüğü üzere NJ tipi beton bariyerin geometrik tasarım parametreleridir.

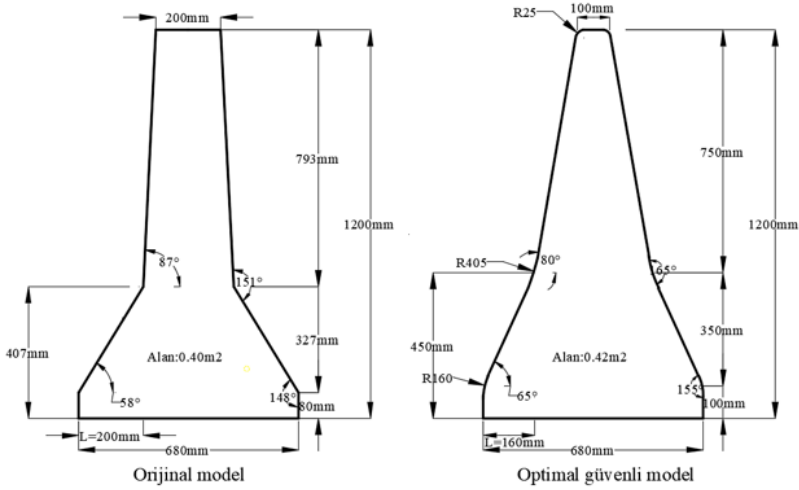
Optimizasyon problemi, bir NSGA-II (Deb ve diğ., 2002) nin başka bir şekli olan *gamultiobj* komutu kullanılarak MATLAB kodu ile çözüldü. NSGA-II iyi bilinen, hızlı seçen ve elit olan çok amaçlı genetik algoritmadır. NSGA-II, çoğu problemde, farklı bir Pareto-optimal cephenin oluşturulmasına özel önem veren diğer seçkin çok amaçlı genetik algoritmalar ile karşılaştırıldığında gerçek Pareto-optimal cephenin yakınında çok daha iyi bir çözüm yayılımı ve yakınsama bulabilir (Deb ve diğ., 2002). NSGA-II'nin etkili bir yöntem olduğu, "Holland, 1975" ve "Deb ve diğ., 2002" tarafından gösterilmiştir.

3.5 Eniyi Değerler

Yapılan optimizasyonda, NSGA-II yakınsak Pareto çözüm ile elde edilen optimum değişken ve amaç fonksiyonları Tablo 4'te verilmiştir. Orijinal tasarım ASI değerine göre optimal tasarım ASI değeri %14.1 kadar düşürülmüştür. Buda ASI ye bağlı yaralanma seviyesinin aynı seviyede düşürüldüğü anlamına gelmektedir. Şekil 19'da orijinal tasarım ile optimum güvenli tasarım verilmiştir. Orijinal tasarımın enkesit alanı 0.40 m², optimum güvenli tasarımın enkesit alanı ise 0.42 m²'dir. Elde edilen optimum tasarımın enkesit alanının orijinal ile yaklaşık aynı olduğu görülebilir. Buda aynı maliyet ile daha güvenli bir tasarım elde edildiği anlamına gelmektedir.

Tablo 4. Orijinal ile optimal tasarımların karşılaştırılması (Özcanan, 2019)

Tasarım	x1 (cm)	x2 (°)	x3 (°)	ASI	ζA (°)	DA (°)
Orijinal tasarım	8	58	87	1,42	12,5	10
Optimal tasarım	10	65	80	1,22	5	19



Şekil 4. Orjinal ve optimal modellerin kesit ölçüleri (Özcanan, 2019)

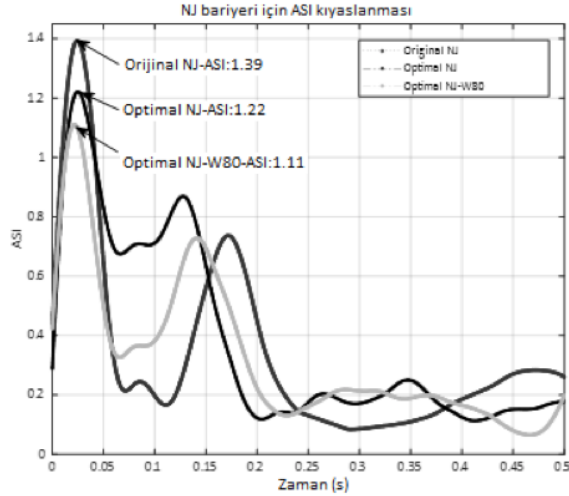
Orjinal tasarımda bariyer zemine çivi ile sabitlendiğinden, bariyerin 0 deplasman yaptığı varsayılarak optimum güvenli tasarım geliştirilmiştir. Fakat esasında bariyerin deplasman yapmasına izin verilirse, aracın enerjisinin daha fazla sönmüneceği ve dolayısıyla ASI değerinin düşeceği açıktır. Geliştirilmeye çalışılan KİPER bariyerinin çalışma genişliği W2 (WN≤0.8m in EN1317/2) olarak test edilmiştir (CSI, 2018). Taban genişliği 0.68 m olduğundan esasında W2 sınırını aşmayacak şekilde 12 cm deplasman yapma olanağı mevcuttur (CEN, 2014). Tasarlanan optimum güvenli bariyere 12 cm deplasman izni verilerek, deplasman ile ASI değerindeki değişim gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuç Tablo 5’de verilmiştir. Elde edilen optimum güvenli modele W2 çalışma genişliği içinde kalacak şekilde deplasman izni verilmesi ile ASI değerinde %9.4 kadar azalma gözlemlenmiştir. Deplasmanın/çalışma genişliğinin çarpma enerjisi sönmülmesi üzerinde önemli bir etken olduğu buradan anlaşılmaktadır. ASI üzerindeki etkisi düşünüldüğünde deplasman tabanlı bariyer tasarımı sonraki çalışmalar için düşünülebilir.

Tablo 5. Optimal tasarım için sabit ve hareketli durumlarının niceliksel karşılaştırılması (Özcanan, 2019)

Tasarım tipi	Kısıt/sabit	x1 (cm)	x2 (°)	x3 (°)	ASI	ÇA (°)	DA (°)
Optimal tasarım	var	10	65	80	1,22	5	19
Optimal tasarım (NJ-W80)	yok	10	65	80	1,11	3	10

Sonlu elamanlar (SE) ortamında doğrulanmış orijinal tasarım, optimum güvenli tasarım ve deplasmana izin verilen optimum tasarımın ASI değerlerinin karşılaştırılması Şekil 20’de verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere, bu çalışmada izlenen analitik method ile tasarlanan

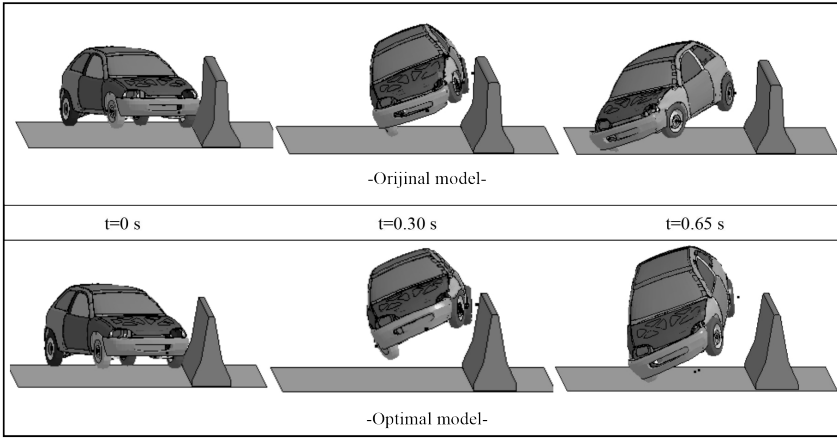
optimum modelin ASI değeri, orijinal modele göre %22-23 oranında düşürülmüştür. Buradan, ASI'ye bağlı yaralanma riskinin yaklaşık dörtte bir oranında düşürüldüğü söylenebilir.



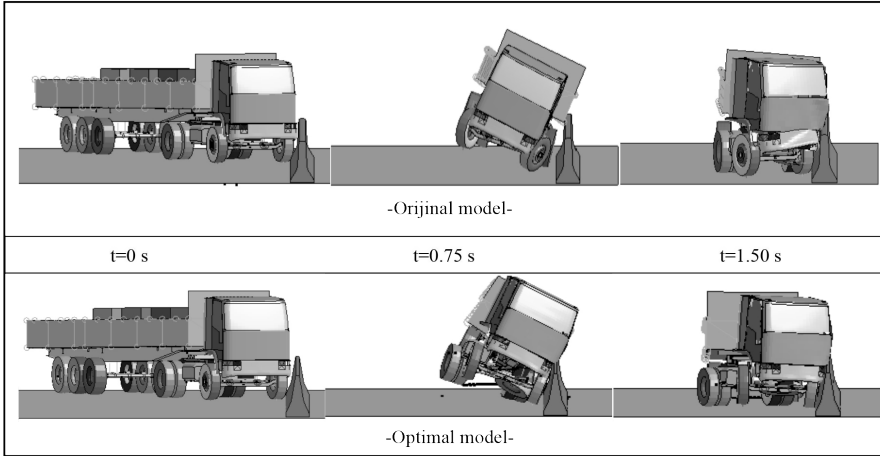
Şekil 5. NJ tipi bariyer için ASI değerlerinin kıyaslanması (Özcanan, 2019)

3.6 Orijinal ile optimal modellerin karşılaştırılması

Elde edilen optimum güvenli model ile orijinal modelin niteliksel ve niceliksel karşılaştırılması aşağıda verilmiştir. Şekil 6'da orijinal tasarım ile optimal tasarımın TB11 testi için niteliksel karşılaştırması verilmiştir. Tasarlanan optimum güvenli model EN1317 standardında belirtilen ÇA ve DA şartlarını sağladığı görülmüştür. Orijinal model ile optimal model arasındaki ASI değerinin farklı olmasına etki eden önemli etken, optimal tasarım aracı daha kolay tırmandırarak daha yüksek ve daha fazla uçmasını sağlamak yolu ile aracın çarpma enerjisini söndürmektedir. Bu fark 0.30 ve 0.65 s'lerde rahatlıkla görülebilir. Tasarlanan optimal tasarımın H4b sınıfında olmasından dolayı EN1317'de TB81 testi için belirtilen kriterleri sağlaması gerekmektedir. Şekil 7'de orijinal ile optimal tasarımlar TB81 testi için karşılaştırılmıştır. Şekilden ÇA ve DA açısından testin başarılı olduğu görülmektedir. OWPE-RBF metamodel ile elde edilen optimum güvenli modelin ASI, ÇA ve DA değerleri ile optimum değişkenlerin FE modelinden elde edilen ASI, ÇA ve DA değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Aradaki göreceli hata oranının (RAE) baya düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Orijinal ve optimal modellerin TB11 testi için SE modellerinin niteliksel kıyaslanması (Özcanan, 2019)



Şekil 7. Orijinal ve optimal modellerin TB81 testi için SE modellerinin niteliksel kıyaslanması (Özcanan, 2019)

Tablo 6. Optimum modelin SE analizi ve OWPE-RBF metamodeli optimum modelinin niceliksel kıyaslanması (Özcanan, 2019)

Analiz tipi	ASI	ÇA (°)	DA (°)
OWPE-RBF metamodeli optimum modeli	1.2211	5.14	19.86
Optimum modelin SE analizi	1.2200	5.00	19.00
RAE (%)	0.09	2.72	4.33

4 Sonuçlar

Bu makale NJ bariyer tasarımında ASI ye bağlı yaralanma seviyesinin minimizasyonu için analitik method olarak, metamodel tabanlı optimizasyonun geçerliliğini incelenmektedir. Çalışmada vekil model olarak OWPE-RBF tabanlı metamodel optimizasyonun MOGA (NSGA-II) ile çözümü önerilmiştir. Önerilen model mevcut metamodeller ve topluluk (ensemble) metamodeller içinde, çok amaçlı mühendislik optimizasyon problemleri çözümündeki en başarılı modellerden biridir. Çalışma içinde kurulan OWPE-RBF modelinin ortalama tahmin hata oranı değerinin 0-1.5 arasında olması elde edilen sonuçların tutarlılığı açısından önemlidir. Bu çalışma OWPE-RBF modeli ile ilgili önemli tespitler ve hedeflenen yaralanma seviyesinin (ASI) düşürülmesi ile ilgili elde edilen neticeler şöyledir;

- Münferit modeller yerine topluluk modellerin çok amaçlı optimizasyon için tercih edilmesi daha yüksek doğrulukta tahmin sağlamaktadır.
- Orijinal tasarım ASI değerine göre optimal tasarım ASI değeri %14.1 kadar düşürülmüştür. Buda ASI ye bağlı yaralanma seviyesinin aynı seviyede düşürüldüğü anlamına gelmektedir.
- Orijinal tasarım ile optimum güvenli tasarımın enkesit alanları yaklaşık aynıdır. Buda aynı maliyet ile daha güvenli bir tasarım elde edildiği anlamına gelmektedir.
- Elde edilen optimum güvenli tasarıma W2 çalışma genişliği içinde kalacak şekilde deplasman izni verilmesi ile ASI değerinde %9.4 kadar iyileşme gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmada izlenen analitik method ile tasarlanan optimum modelin ASI değeri %22-23 oranında düşürülmüştür. Buradan, ASI'ye bağlı yaralanma riskinin yaklaşık dörtte bir oranında düşürüldüğü söylenebilir.
- Orijinal model ile optimal model arasındaki ASI değerinin farklı olmasına etki eden önemli fark, optimal tasarım çarpan aracı daha kolay tırmandırarak, daha yüksek ve daha fazla uçmasını emniyetli sağlamak yolu ile enerjisini sönmölemektedir.
- Deplasman/çalışma genişliği çarpma enerjisi sönmölemesi üzerinde önemli bir etken olduğu anlaşılmıştır. Bu anlamda deplasman/çalışma genişliğine bağlı daha emniyetli ASI/yaralanma seviyesi bariyer tasarımı sonraki çalışmalarda araştırılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- AASHTO MASH-1., 2009. Manual for assessing safety hardware (MASH). 1st ed. Washington (DC): American Association of State Highway Transportation Officials.
- Acar, E., 2010a. Various Approaches for Constructing an Ensemble of Metamodels Using Local Measures. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 42(6), pp. 879–896.
- Acar, E., 2010b. Optimizing the Shape Parameters of Radial Basis Functions: An Application to Automobile Crashworthiness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 224, No. 12, pp. 1541–1553. doi:10.1243/09544070JAUTO1560
- Acar, E., 2014. Simultaneous Optimization of Shape Parameters and Weight Factors in Ensemble of Radial Basis Functions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 49, No. 6, pp. 969–978. doi:10.1007/s00158-013-1028-0.
- Benki A., Habbal A., and Mathis G., 2017. A metamodel-based multicriteria shape optimization process for an aerosol can. *Alexandria Eng J.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.03.036>.
- CEN., 2014. European Committee for Standardization. European Standard EN1317, Testing and Evaluation of Road Restraint Systems, Brussels.
- CSI., 2018. Crash testing of KİPER-H4b-DS6.0 barrier systems. 0089\ME\HRB/18, Bollate, Italy.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans on Evolutionary Comput.*, 6(2):182-197.
- Draper, N. R., and Smith, H., 2014. *Applied Regression Analysis*. 3rd ed., Wiley, New York.
- Fang, H., and Horstemeyer, M. F., 2006. Global Response Approximation With Radial Basis Functions. *Eng. Optim.*, 38(4), pp. 407–424.
- Forrester, A. I. J., Sobester, A., and Keane, A. J., 2007. Multi-Fidelity Optimization Via Surrogate Modeling. *Proc. R. Soc. London A*, 463(2088), pp. 3251–3269.
- Girosi, F., 1998. An Equivalence Between Sparse Approximation and Support Vector Machines. *Neural Comput.*, 10(6), pp. 1455–1480.
- Goel, T., Haftka, R. T., Shyy, W., and Queipo, N. V., 2007. Ensemble of Surrogates. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 33(3), pp. 199–216.
- Gorissen, D., Couckuyt, I., Demeester, P., Dhaene, T., and Crombecq, K., 2010. A Surrogate Modeling and Adaptive Sampling Toolbox for Computer Based Design. *J. Mach. Learn. Res.*, 11(1), pp. 2051–2055.
- Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan R., and Tucker, P. K., 2005. Surrogate-Based Analysis and Optimization. *Prog. Aerosp. Sci.*, 41(1), pp. 1–28.
- Holland JH., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press.
- Hou S, Zheng Y, Xie J, Han X., 2014a. Optimization design of NJ shaped guardrail based on collision safety consideration, *Int J Comput Methods.*, 11:1350083-1–1350083-20.

- Hou S, Tan W, Zheng Y, Han X, Li Q., 2014b. Optimization design of corrugated beam guard-rail based on RBF-MQ surrogate model and collision safety consideration. *Adv Eng Softw.*, 78:28–40.
- Lee, Y., and Choi, D., 2014. Pointwise Ensemble of Meta-Models Using t Nearest Points Cross-Validation. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 50(3), pp. 383–394.
- Liu, H., Xu, S., Wang, X., Meng, J., and Yang, S., 2016. Optimal Weighted Pointwise Ensemble of Radial Basis Functions With Different Basis Functions. *AIAA J.*, 54(10), pp. 3117–3133.
- Matheron, G., 1963. Principles of Geostatistics. *Econ. Geol.*, 58(8), pp. 1246–1266.
- MATLAB, 2017. Matlab and statistics toolbox release (2017b) The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA.
- Meckesheimer M., Booker AJ., Barton RR., Simpson TW., 2002. Computationally inexpensive metamodel assessment strategies. *AIAA J* 40(10):2053–2060.
- NCAC., 2008. Finite element model archive, George Washington University FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>, Virginia (Accessed 2008).
- Peri, D., and Campana, E. F., 2005. High-Fidelity Models and Multiobjective Global Optimization Algorithms in Simulation-Based Design. *J. Ship Res.*, 49(3), pp. 159–175.
- Sacks, J., Schiller, S. B., and Welch, W. J., 1989a. Designs for Computer Experiments. *Technometrics*, 31(1), pp. 41–47.
- Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., and Wynn, H. P., 1989b. Design and Analysis of Computer Experiments. *Stat. Sci.*, 4(4), pp. 409–423.
- Song, X., Sun, G., Li, G., Gao, W., and Li, Q., 2013. Crashworthiness Optimization of Foam-Filled Tapered Thin-Walled Structure Using Multiple Surrogate Models. *Struct. Multidiscipli. Optim.*, 47(2), pp. 221–231.
- Ong, Y. S., Nair, P. B., Keane, A. J., and Wong, K. W., 2005. Surrogate Assisted Evolutionary Optimization Frameworks for High-Fidelity Engineering Design Problems. *Knowledge Incorporation in Evolutionary Computation*, Springer, Berlin, pp. 307–331.
- Ozcanan S and Atahan AO., 2019a. RBF surrogate model and EN1317 collision safety-based optimization of two guardrails. *Struct Multidisc Optim.*, Epub ahead of print 23 January 2019. DOI: 10.1007/s00158-019-02203-z.
- Ozcanan S and Atahan AO., 2019b. Radial basis function surrogate model-based optimization of guardrail post embedment depth in different soil conditions. *Proc IMechE, Part D: J Automobile Engineering.*, Epub ahead of print 20 May 2019. DOI: 10.1177/0954407019848548.
- Özcanan, S., 2019. Radial basis function surrogate model-based optimization of road restraint systems: three case studies. *Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.*
- Vapnik, V. N., 1998. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York.
- Yang, J., Zhan, Z., Zheng, K., Hu, J., and Zheng, L., 2016. Enhanced Similarity-Based Meta-model Updating Strategy for Reliability-Based Design Optimization. *Eng. Optim.*, 48(12), pp. 2026–2045.

- Yin H, Fang H, Wang Q, Wen G., 2016. Design optimization of a MASH TL-3 concrete barrier using RBF-based metamodels and nonlinear finite element simulations. *Eng Struct.*, 0141–0296.
- Yin H, Xiao Y, Wen G, Fang H., 2017. Design optimization of a new W-beam guardrail for enhanced highway safety performance. *Adv Eng Softw.*, 112; 154-164.
- Zhang, J., Chowdhury, S., and Messac, A., 2012. An Adaptive Hybrid Surrogate Model. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 46(2), pp. 223–238.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Su/Çimento Oranı Değişiminin Dayanım, Ultrases Geçiş Hızı ve Elastisite Modülü Üzerindeki Etkileri

İsmail Kılıç¹, Saadet Gökçe Gök¹, Ahmet Okan Savaş²

¹Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, Türkiye

²Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Kırklareli, Türkiye

Özet

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), geleneksel betona göre yeni kullanılmaya başlanan bir yapı malzemesi olup yol ve baraj inşaatlarında kullanılmaktadır. Düşük su/çimento oranı ile üretilen SSB, rijit yol kaplama türlerinden biridir. SSB, üretim tekniğiyle esnek yol kaplamalarına benzemekle birlikte üretim sonrasında yolun hızlı bir şekilde kullanıma açılabilmesi ve geleneksel yapı malzemeleri kullanılarak üretilmesi sayesinde ekonomik fayda sağlayan alternatif yol kaplamasıdır.

Bu çalışmada CEM I 42,5 R Portland çimentosu, dolomitik kalker, doğal kum ve su kullanılarak C30/37 sınıfında silindirle sıkıştırılmış beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Su/çimento oranları 0,32, 0,35, 0,38 ve 0,41 olarak değiştirilmiş olup 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi için 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir, 28 günlük eğilme dayanımları için ise 15 cm×15 cm×75 cm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmıştır. Eğilme dayanımı testinden önce 28 günlük prizmatik numunelerden yararlanılarak ultrases geçiş hızı ve elastisite modülü değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton yol, Dayanım, Elastisite Modülü, Silindirle Sıkıştırılmış Beton, Ultrases Geçiş Hızı.

1 Giriş

Silindirle sıkıştırılmış betonlar, genellikle beton yol üretiminde karşımıza çıkmaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, alternatif üstyapılardan biri olup üretim sonrasında yolun hızlı bir şekilde kullanıma açılabilmesi ile ekonomik fayda sağlamaktadır. Petrol türevi kullanılan asfalt yol kaplamalarının yerine silindirle sıkıştırılmış beton yol kaplamalarının kullanılması, kullanılan hammaddelerin ulaşılabilirliği ve maliyeti açısından kaynakların verimli bir şekilde değerlendirilmesine katkı sunmaktadır.

SSB üretimi geleneksel betonda kullanılan bileşenlerin farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilmekte, işlenebilirlik özellikleri geleneksel betondan farklı olmakta ancak SSB, bitümlü sıcak karışım kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir. SSB ile geleneksel beton karışımları arasındaki önemli farklılıklardan biri betonun daha iyi sıkıştırılabilmesi için SSB üretiminde geleneksel betona göre daha yüksek oranda ince agregası kullanılmasıdır (Yaman ve Ceylan, 2015).

Silindirle sıkıştırılmış betonların taze halde çökmesi olmadığı gibi karışım oldukça kuru haldedir. Kuru haldeki karışım damperli kamyonlarla taşınıp tabakalar halinde serilmekte ve vibrasyonlu silindirlerle sıkıştırılmaktadır. Üretim sırasında kullanılan malzemeler, geleneksel beton üretiminde kullanılan malzemelerle benzerlik gösterdiğinden SSB avantaj sağlamaktadır. Silindirle sıkıştırılmış betonlar taze halde iken geleneksel betona göre işlenebilirlik açısından zayıftır ve daha çok zemin dolgu malzemesi gibi görünmektedir. Bununla birlikte silindirle sıkıştırılan betonlar katılaştıklarında, geleneksel beton gibi davranmaktadır. Silindirle sıkıştırılmış betonların uygulama avantajları son yıllarda bu konu hakkında yapılan çalışmaların artmasına olanak sağlamıştır (Adamu, Mohammed, & Shahir Liew, 2018; Atiş, 2005; Cao, Sun, & Qin, 2000; Chi & Huang, 2014; Courard, Michel, & Delhez, 2010; Debieb, Courard, Kenai, & Degeimbre, 2009; Jingfu, Chuncui, & Zhenli, 2009; Mardani-Aghabaglou, Andiç-Çakir, & Ramyar, 2013; Meddah, Beddar, & Bali, 2014; Modarres & Hosseini, 2014; C. Wang vd., 2018; X. hua Wang, Zhang, Wang, Liu, vd., 2018)Southern Region of Belgium; recycling has clearly to be promoted. Roller Compacted Concrete (RCC).

SSB yolların en önemli üstünlüğü beton kaplamalara ve çok tabakalı asfalt kaplamalara göre çok daha hızlı ve ekonomik olarak inşa edilebilmesidir. Ayrıca, SSB yollarda kalıp kullanılmamakta, genellikle yüzey düzeltme işlemi yapılmamakta ve kayma donatısı, bağ donatısı gibi herhangi bir çelik donatı kullanılmadığından maliyet azalmaktadır (Yaman ve Ceylan, 2015). Silindirle sıkıştırılmış betonların olumsuz yanları ve uygulamadaki sınırlılıkları göz önüne alındığında, kuru kıvamdaki yapılarından dolayı karıştırıcıdaki üretim hacmi geleneksel betona göre düşük olmaktadır (Topličić-Ćurčić vd., 2015). Bununla birlikte betonun üretimi, taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması aşamalarında planlı bir organizasyon yapılması gerekmektedir.

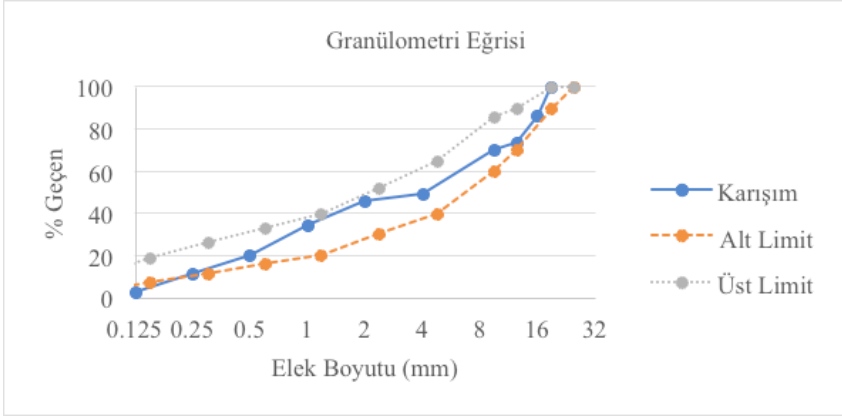
2 Malzeme ve Yöntem

Deneysel çalışmada bağlayıcı olarak Limak Çimento A.Ş.'den temin edilen CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan agregalar dolomitik kalker ve doğal kum olup agregaların elek analizi Tablo 1'de verilmiştir. Maksimum agrega tane çapı (dmaks) 19 mm olarak seçilmiştir. Agregalar kendi aralarında %25 oranında karıştırılarak kullanılmıştır. Agregaların granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Kullanılan agregaların özgül ağırlık değerleri kırmataş II, kırmataş I, taş tozu ve doğal kum için sırasıyla 2,80, 2,80, 2,81 ve 2,76 g/cm³'tür.

Silindire sıkıştırılmış beton (SSB) yollar teknik şartnamesinde belirtildiği üzere, silindire sıkıştırılmış betonun minimum karakteristik basınç dayanım sınıfı C30/37 olmalıdır (TÇMB, 2017). Silindire sıkıştırılmış betonun eğilme dayanımı ise C30/37 beton sınıfı için minimum 4,2 MPa olmalıdır (TÇMB, 2018).

Tablo 1. Agregaların elek analizi

Elek No (mm)	%Geçen				
	Kırmataş II	Kırmataş I	Taş Tozu	Doğal Kum	Karışım
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	42,46	100,00	100,00	100,00	85,62
12,50	1,05	90,97	100,00	100,00	73,01
9,50	0,00	71,32	100,00	100,00	67,83
8	0,00	51,73	100,00	100,00	62,93
4	0,00	5,06	93,37	98,93	49,34
2	0,00	0,00	66,20	96,01	40,55
1	0,00	0,00	43,71	86,22	32,48
0,50	0,00	0,00	29,37	57,26	21,66
0,25	0,00	0,00	22,30	20,97	10,82
0,125	0,00	0,00	17,31	3,46	5,19
0,075	0,00	0,00	10,99	1,13	3,03
0,063	0,00	0,00	6,25	0,80	1,76
pan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 1. Agrega gradasyonu

Beton karışım hesabı TS 802 (TS 802, 2016) standardına göre ve beton sınıfı C30/37 olacak şekilde tasarlanmış olup her bir üretim için karışımdaki malzeme miktarları Tablo 2’de verilmiştir. Beton karışımları yapılırken su miktarı sabit tutulmuş, çimento miktarı değiştirilmiş ve çökme değeri sıfır olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Çimento dozajı, beton yol kaplamaları teknik şartnamesinde belirtildiği üzere minimum 340 kg/m^3 olacak şekilde seçilmiştir (KGM, 2016). Bu dozajın silindirle sıkıştırılmış betonlar için yüksek bir değer olduğu bilinmekle birlikte, Kuzey Amerika’daki birçok SSB yol projesinde kullanılan çimento dozajı 300 kg/m^3 ile 500 kg/m^3 arasında değişmektedir (Harrington vd., 2010).

Tablo 2. Karışımdaki malzeme miktarları

S/Ç	Su (kg/m^3)	Çimento (kg/m^3)	Kırmataş II (kg/m^3)	Kırmataş I (kg/m^3)	Taş Tozu (kg/m^3)	Doğal Kum (kg/m^3)
0,32	150	469	479,25	479,25	479,25	479,25
0,35	150	429	488,25	488,25	488,25	488,25
0,38	150	395	495,75	495,75	495,75	495,75
0,41	150	366	502,25	502,25	502,25	502,25

Silindirle sıkıştırılmış beton üretimi ASTM C 1435 (ASTM C 1435, 2014) standardına göre yapılmıştır. Literatürde belirtilen alt ve üst sınırların arasında kalacak granülometride (Harrington vd., 2010) agrega karışımlarının hazırlanmasının ardından, su, çimento ve agrega içeren farklı beton karışımları üretilerek sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Silindir numuneler üretilirken sıkıştırma işlemi üç tabaka halinde yapılmış, her bir tabaka yirmi saniye boyunca sıkıştırılmıştır. Kiriş numune üretiminde ise iki tabaka halinde sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Sıkıştırma işlemleri, standarda uygun olarak vibratörlü çekiç ile yapılmıştır. Silindir numuneler

için 146 mm çapında dairesel başlıklı uç, kiriş numuneler için ise 146 mm kenar uzunluğunda kare başlıklı uç vibratörlü çekice takılarak kullanılmıştır.

Silindirle sıkıştırılan betonlarda su/çimento değişiminin mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla s/ç oranları 0,32, 0,35, 0,38 ve 0,41 olarak değişen dört farklı grup silindirle sıkıştırılmış beton üretilmiş, numunelerin farklı yaşlardaki eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi için 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir numuneler kullanılmıştır. 28 günlük eğilme dayanımlarının belirlenmesi için ise 15 cm×15 cm×75 cm boyutlarında çentiksiz prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve kırım gününe kadar kür havuzunda bekletilmiştir. Her bir seri için üçer numune test edilmiştir. Basınç dayanımları TS EN 12390-3 (TS EN 12390-3, 2003) standardına göre belirlenmiştir. Dört noktalı eğilme deneyi TS EN 12390-5 (TS EN 12390-5, 2002) standardına uygun olarak yapılmış ve eğilme dayanımları belirlenmiştir.

Ultrases geçiş hızı ve elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan deneylerde Proceq marka Pundit PL-200 ultrasonik test cihazından yararlanılmıştır. Ultrases geçiş hızı ve elastisite modülünün tespiti için, eğilme dayanımlarının belirlenmesi için üretilen 15 cm×15 cm×75 cm boyutlu prizmatik numuneler kullanılmış, her bir kiriş numunesi üzerinde üç farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı tespiti için dalga boyu 68,5 mm olan 54 kHz P dalgası duyargaları kullanılmıştır. Elastisite modülünün tespiti için ise ilk önce dalga boyu 68,5 mm olan 54 kHz P dalgası duyargaları ile ilk ölçüm yapılmış, ardından bu duyargalar çıkarılarak yerine dalga boyu 10 mm olan 250 kHz S dalgası duyargaları takılmış ve ikinci ölçüm yapılmıştır. S ve P dalgası duyargaları kullanılarak yapılan ölçümler sonrasında betonun elastisite modülü cihazın dijital ekranından okuma yapılarak tespit edilmiştir. Dalga boylarının hesaplanmasında 3700 m/s'lik boyuna dalga ve 2500 m/s'lik enine dalga darbe hızı kullanılmıştır.

3 Bulgular ve Tartışma

Silindirle sıkıştırılmış betonlarda kıvamın tespiti için çökme (slump) deneyi yapılmış, tasarlanan karışımların tamamında çökme değerleri sıfır olarak belirlenmiştir. Yüksek miktardaki su içeriğine rağmen çökmenin sıfır olması, kullanılan taş tozu miktarının fazlalığına bağlanmıştır.

Farklı su/çimento oranına sahip silindirle sıkıştırılmış beton numunelerden elde edilen basınç dayanımı sonuçları Tablo 3'te, eğilme dayanımı sonuçları Tablo 4'te verilmiş olup Şekil 2'de grafik olarak ifade edilmiştir. Yapılan çalışmalarda C30/37 sınıfı beton için, 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde 0,35, 0,38, 0,41 s/ç oranlarında hedeflenen değerlerin elde edildiği görülmüştür. Eğilme dayanımı değerlerinde ise bütün s/ç oranlarında literatürde istenilen minimum 4,2 MPa değerinin üzerine çıkmıştır. Hedeflenen dayanım değerleri sağlanmakla birlikte, çimento dozajının yüksek olması sebebiyle daha yüksek dayanım

değerleri beklenirken bu değerlere ulaşamamıştır. Kullanılan taş tozu miktarının fazla olması, bu sonuca etki etmiştir. Ayrıca, kullanılan silindir numunelerin sıkıştırılması sırasında tabaka kenarlarında oluşan boşlukların da bu sonuca ettiği düşünülmektedir. Kalıba yerleştirmede tabaka sayısı ve sıkıştırma süresi dayanım sonuçlarını etkileyebilmektedir.

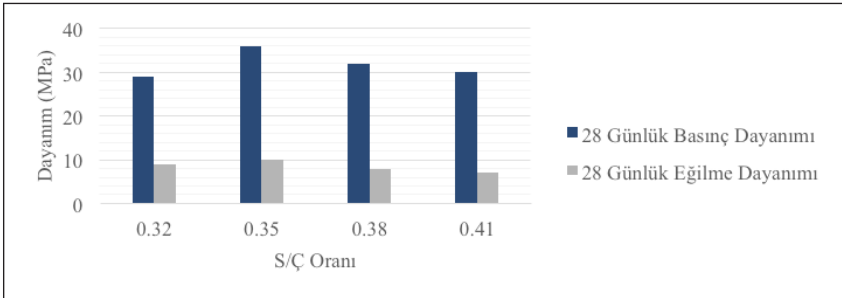
Tablo 3. Basınç dayanımı

Basınç Dayanımı (MPa)		
S/Ç	7 Günlük	28 Günlük
0,32	17,3	29,5
0,35	28,6	36,4
0,38	23,7	32,4
0,41	19,1	30,6

Uygulamada yolun hızlı bir biçimde kullanıma açılması gerektiği göz önünde bulundurulduğunda, erken yaşta beton basınç dayanımının yüksek olması önem kazanmaktadır. 7 günlük beton basınç dayanımı sonuçları incelenecek olursa, s/ç oranı 0,35 olduğunda silindir numunelerde 28,6 MPa basınç dayanımı elde edilebildiği görülmektedir. Bu karışım ile dayanım açısından en yüksek değerler elde edilmiş, 28 günlük beton basınç dayanımı 36,4 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı ise 10,2 MPa olmuştur.

Tablo 4. Eğilme dayanımı

S/Ç	28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)
0,32	9,8
0,35	10,2
0,38	8,3
0,41	7,5



Şekil 2. SSB için basınç ve eğilme dayanımları

Silindirle sıkıştırılmış betonlara ait ultrases geçiş hızı sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Ultrases geçiş hızı, s/ç oranı 0,38 iken en yüksek değerine ulaşmış olup s/ç oranı 0,41 olduğunda en düşük olmuştur. ASTM C 597'ye (ASTM C 597, 2002) göre ses hızı 4,5 km/s değerinin üzerinde olan betonların kalitesi çok iyi olarak verilmiştir. Farklı su/çimento oranlarında üretilen numunelerin tamamında bu değerlerin üzerine çıkmıştır.

Tablo 5. Ultrases geçiş hızı

S/Ç	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
0,32	5,33
0,35	5,29
0,38	5,38
0,41	5,20

Üretilen SSB numunelerinin elastisite modülü değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Bu çalışmada elastisite modülü, s/ç oranı 0,35 olduğunda en yüksek değerini almıştır. Elastisite modülü değerleri, 28 günlük beton basınç dayanımı değerleri ile uyum göstermiş, beton basınç dayanımı arttığında elastisite modülü artmıştır.

Tablo 6. Elastisite modülü

S/Ç	Elastisite Modülü (GPa)
0,32	34,99
0,35	35,21
0,38	33,69
0,41	33,42

4 Sonuç ve Öneriler

Çalışmalar sonucunda, farklı su/çimento oranlarına sahip silindirle sıkıştırılmış beton numuneleri içerisinde 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerleri incelendiğinde, yapılan SSB dizaynları içerisinde en uygun s/ç oranının 0,35 olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, yapılan çalışmaya ve karışım tasarımına özgü olup bir genelleme yapılamayacağı dikkate alınmalıdır. Su/çimento oranı 0,35 olan SSB numunelerinde, ultrases geçiş hızı 5,29 km/s olarak ölçülmüş ve beton kalitesi çok iyi olarak belirlenmiştir.

Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, bu çalışmadakinden daha düşük çimento dozajıyla da yeterli dayanım değerleri elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, sonraki çalışmalarda, ince madde miktarı azaltılıp buna bağlı olarak su ihtiyacının azaltılması sayesinde çimento dozajının düşürülmesi sağlanacaktır.

Hızlı ve ekonomik olarak inşa edilebilmesi, yolun alternatiflerine göre daha erken trafiğe açılabilmesi ve petrol ürünlerine olan bağımlılığın azaltılabilmesi açısından silindirle sıkıştırılmış betonların beton yol üretiminde kullanılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Adamu, M., Mohammed, B. S., & Shahir Liew, M. (2018). Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 171, 521–538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.138>
- ASTM C 1435, (2014). Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA.
- ASTM C 597, (2002). Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete, American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA.
- Atış, C. D. (2005). Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.037>
- Cao, C., Sun, W., & Qin, H. (2000). Analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 71–75. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00203-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00203-3)
- Chi, M., & Huang, R. (2014). Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.001>
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040>
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382–3387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031>
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C., (2010). Guide for Roller Compacted Concrete Pavements, National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University.
- Jingfu, K., Chuncui, H., & Zhenli, Z. (2009). Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(8), 1117–1124. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9447-x>
- KGM, (2016). “Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi”, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakır, Ö., & Ramyar, K. (2013). Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009>

- Meddah, A., Beddar, M., & Bali, A. (2014). Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement AAAA. *Journal of Cleaner Production*, 72, 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052>
- Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials and Design*, 64, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>
- TÇMB, (2017). “Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yollar Teknik Şartnamesi”, Ankara
- TÇMB, (2018). “Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar Tasarım Rehberi”, Ankara
- TS 802, (2016). “Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS EN 12390-3, (2003). “Sertleşmiş Beton Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”, TSE, Ankara
- TS EN 12390-5, (2002). “Sertleşmiş Beton Deney Numunelerinde Eğilme Dayanımının Tayini”, TSE, Ankara
- Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Ristić, N., & Grdić, Z. (2015). Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements. *Zaštita materijala*, 56(3), 345-353.
- Wang, C., Chen, W., Hao, H., Zhang, S., Song, R., & Wang, X. (2018). Experimental investigations of dynamic compressive properties of roller compacted concrete (RCC). *Construction and Building Materials*, 168, 671–682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.112>
- Wang, X. hua, Zhang, S. rong, Wang, C., Liu, F. cun, Song, R., & Wei, P. yong. (2018). Initial damage effect on dynamic compressive behaviors of roller compacted concrete (RCC) under impact loadings. *Construction and Building Materials*, 186, 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.141>
- Yaman, İ.Ö., Ceylan, H. (2015). “Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar”, TMH Sayı: 480, 60/2015-4, s:44-61.

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Prekast Beton Yol Uygulamaları

Murat Mazman¹, Selahattin Düzbasan², Erol Yakıt²

¹ Railone Ilgaz demiryolları, Ankara, Türkiye

² Ilgaz İnşaat, Ankara, Türkiye

Özet

Büyükşehirlerde trafik yoğunluğunun getirdiği yol bakım ve onarım maliyetlerinin artması ve uzun süreliğine yolun trafiğe kapatılmaması gibi durumlarda mevcut yolun rehabilitasyonu ya da yenilenmesi konusunda prekast beton yollar çözüm olabilir. Fabrika ortamında standartlara uygun ve kontrollü bir şekilde üretilmesinin getirdiği üstün kalite, kullanım ömrü, hızlı montaj imkânı ve ithal petrol türevi ürün gerektirmemesi prekast yol kaplamalarını ön plana çıkarmaktadır.

Bu çalışmada prekast beton yolların kullanım alanları, yerinde döküm beton yollara göre getirdiği avantajlar, üretim ve uygulama esasları ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: Beton yol, prekast yol, öngermeli beton yol, ard germeli beton yol

1 Giriş

Günümüzde her geçen gün artan metropol kentlerin nüfusu ve buna bağlı trafik yoğunluğu, uzun süreli yol yapımı ve onarım çalışmalarını oldukça zorlaştırmaktadır. Özellikle trafiğin en yoğun olduğu gündüz vakti yolun trafiğe kapatılıp tam bir trafik kaosu yaratmak yerine yolu gece 6 ile 8 saatlik zaman dilimleri arasında yenileyip ertesi sabah kullanılacak şekilde trafiğe açmak çok daha uygun olacaktır. Prekast beton yollar montaj kolaylığı, dayanıklılığı ve düşük bakım ve onarım maliyeti ile bu alanda aranan çözüm olabilir. Yolların yenilenmesi, rehabilitasyonu ya da tamiri prekast beton yol panellerinin öncelikli kullanım alanlarıdır.

Prekast beton yol kaplamasının yerinde döküme göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yollarda kaplama için kullanılacak prekast panellerin beton kalitesi yerinde döküme göre daha iyidir. Yerinde dökümde betonun döküm sahasına transferi ya da dökümü esnasında yaşanan gecikmeler çok sık görülmektedir. Bu gecikmeler betonun kalitesini, kaplama yüzeyinin tekstürünü ve yolun ömrünü doğrudan etkiler. Prekast yol kaplamalarında gecikmeden kaynaklı kalite sorunu, fabrika ortamında ve henüz panel monte edilecek yola ulaşmadan elimine edilir. Ayrıca yerinde döküm esnasında betonun yeterince ve homojen bir şekilde sıkıştırılmaması sorunu, üretim tekniğinden dolayı ön üretimli yol panellerinde görülmez. Monte edilen prekast yol panellerinin tamamı istenilen beton kalitesine ve standartlara uygundur.

- Prekast beton yol kaplamaları çok sıcak ya da çok soğuk hava şartlarında ve hatta hafif yağmur altında bile monte edilebilir. Yol çalışmalarının yerinde dökümde olduğu gibi sadece yaz ayları ile kısıtlı olmasına gerek yoktur.

- Prekast paneller kütle betonuna göre daha küçük hacimler halinde döküldüğü ve önceden fabrika ortamında kontrollü bir şekilde kürlendiği için rötre çatlakları hemen hemen hiç yoktur. Ayrıca uygulanan öngermeden veya kullanılan donatıdan dolayı kendiliğinden ya da yük altında oluşabilecek kılcal çatlaklar da ilerlemeyecektir.

- Prekast beton yol kaplamalarının en önemli avantajlarından biri de yenilenen yolun tekrardan trafiğe açılma süresidir. Prekast beton paneller fabrika ortamında önceden kürlendiği için montaj sonrası kullanıma hazırdır. Genellikle gece yapılan ve prekast beton kullanılan yol yenileme çalışmaları 6 ile 8 saatlik zaman dilimi sonucu tamamı ile yenilenmiş olarak ertesi sabah trafiğe açılabilir. Yol çalışması süresinin kısa olması yolda çalışan işçilerin iş güvenliği açısından da önemlidir.

- Yerinde dökülen betonlarda geç ya da yeteri derinlikte kesilmeyen derzlerin neden olduğu çatlaklar prekast beton yol kaplamalarında görülmez (Tayabji v.d., 2013).

Prekast beton yol uygulaması Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya eyaletinde son yıllarda adından daha fazla söz ettirmektedir. Özellikle Los Angeles ve San Francisco şehirlerinde trafik yoğunluğuna bağlı yol aşınmaları ve uzun süreli yol çalışmasının imkânsız olması prekast beton yol kullanımını artırmıştır.

Precast Pavement Projects



Location	System	Phase
10 El Monte, EB	PPCP	Completed 2004
UCPRC Research	Super Slab	Completed 2005
15 Ontario	Super Slab	Completed 2010
514 Sylmar	PPCP	Completed 2010
880 San Ramon	PPCP & IPSR	Completed 2012
80 Solano	PPCP	Completed 2014
580 Alameda	PPCP & IPSR	Completed 2014
5 LA, NB	PPCP & IPSR	Completed 2014
101 Santa Barbara	IPSR	Completed 2015
15215 San Bernardino	IPSR	Completed 2016
405 LA	PPCP	Completed 2016
101 Holly Wood	PJCP & IPSR	Completed 2016
101 LA	PJCP & IPSR	Completed 2016
15 San Bernardino	PPCP or Super Slab	Completed 2016
710 LA, NB	PPCP	Partially Cancelled
210 LA	PJCP & IPSR	Construction
605 LA	PJCP & IPSR	Construction
57 LA	IPSR	Construction
5 CAPM	IPSR	Construction
91 CAPM	IPSR	Construction
101 Monterey	IPSR	Construction
560/205 Alameda/SJ	PJCP	Construction
710-III LA	PJCP or PPCP	Cancelled
101 Sonoma	PJCP	Design
80 Alameda	PJCP or PPCP	Design
5 LA	IPSR	Design
680 Alameda	PJCP	Preliminary
5 Sacramento	PJCP	Preliminary
880 Alameda	PJCP & IPSR	Preliminary

Şekil 1. Kaliforniya eyaletinde son yıllardaki prekast beton yol projeleri (Parvini, 2016)

2 Prekast Beton Yol Kaplaması Uygulama Esasları

Prekast beton yol kaplamasında kullanılacak paneller tek bir yerin lokal olarak tamiri için kullanılabileceği gibi birbiri ardına eklenerek de uygulanabilir.

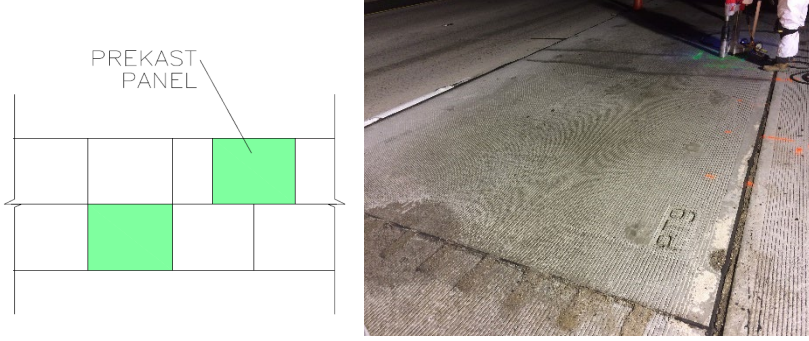
Prekast yol panelleri iki şekilde uygulanır:

- Tekil prekast yol panelleri
- Birbiri ardına eklemeli (sürekli) prekast beton yol panelleri

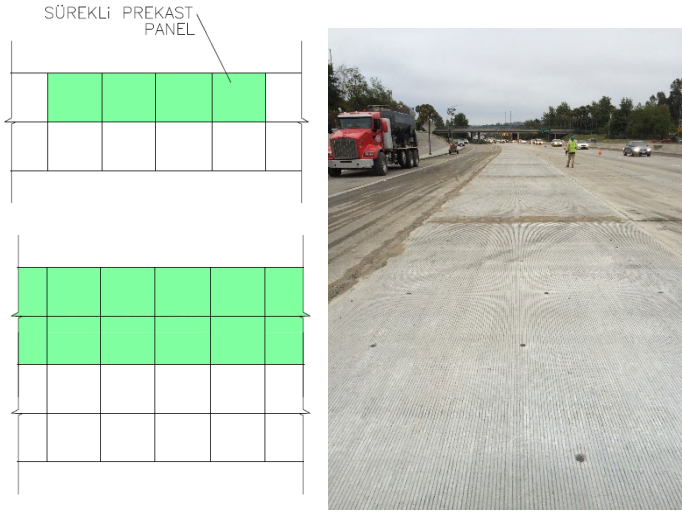
Tekil prekast yol panellerinin boyutları trafik yönünde 1,8 metre ile 4,8 metre arasında değişir ve genişliği de bir şeritin genişliğindedir. Tekil panellerdeki derz aralıkları tamiri yapılacak alanın uzantısı kadardır. Tekil prekast yol panelleri demir donatılı ya da öngermeli olarak üretilir. Parçalanmış panelin tamamının değişimi ya da kötüye giden derzin veya derin çatlakların tamiri için kullanılır (Tayabji, 2019).

Birbiri ardına eklemeli(sürekli) prekast yol panelleri tek bir şeritin genişliğinde olabileceği gibi iki şerit genişliğinde de olabilir. Tek şeritte kullanılan panellerin genişlikleri 3,6 metre ile 4,0 metre arasında iken trafik yönündeki panel boyutu beton kalınlığı 20 cm ile 25 cm olan paneller için genellikle 4,6 metredir. Bu panel boyutu yerinde dökümdeki enine derz aralığı ile aynıdır. Yapılan çalışmalar kalınlığı 25 cm. ile 30,5 cm olan paneller için derz aralığının 6,1 metreye kadar çıkabileceğini göstermiştir. Bu paneller derzli demir donatılı ve öngermeli, ya da ard germeli olabilir. Prekast panel boyutları taşıma esnasında trafikte izin verilen yasal limitleri geçmemelidir (Tayabji, 2019).

Tekil yol panelleri genelde tek bir şerit, birbiri ardına eklenen prekast paneller ise bir ya da iki şerit için uygulanabilir.



Şekil 2. Tekil prekast beton panel diyagramı ve mevcut kaplamayla birleşimi



Şekil 3. Sürekli prekast beton yol paneli diyagramı ve uygulaması

Yenileme ya da onarım için trafiğe kapatılan bir şeritte 6 ile 8 saatlik zaman dilimi içerisinde 14 ile 18 arası lokal yol tamiri yapılabileceği gibi 122 metre ile 183 metre arası sürekli

yol yenilenebilir (Tayabji v.d., 2013). Kaliforniya’da uygulanan bir projede 300 metre uzunluğundaki bir şerit bir gecede yenilenmiştir.

Prekast beton kaplamalarında dikkat edilmesi gereken hususlar inşa edilebilirlik, betonun durabilitesi, prekast beton panelin bağlantı noktalarındaki yük transferi ve panel mesnetlerinin durumu başlıca konulardır (Tayabji v.d., 2013).

Her ne kadar prekast panellerin kullanımı oldukça yeni olsa da 40 yıl veya daha fazla kullanım ömrünün olması beklenmektedir (Tayabji v.d., 2013).

Aşağıdaki çalışmada Amerika Birleşik Devletinin Kaliforniya eyaletinde 2016 yılında yapımı tamamlanan ve birinci yazarın da görev aldığı sürekli (ard germeli) prekast beton yol projesine ait dizayn, üretim ve uygulama detayları paylaşılacaktır.

3 Sürekli (Ard Germeli) Prekast Beton Yol Uygulama Projesi

Projenin yeri: I-405 Los Angeles, Kaliforniya

İşveren: Caltrans (The California Department of Transportation)

Yüklenici Firma: Myers & Sons Construction Company

Prekast panel üretici firma: Con-Fab California Corporation

Prekast beton yol panellerin yaklaşık kaplama alanı: 45,000 m² (Myers-sons.com, 2019)

Ön germeli prekast beton panel kalınlığı: 20,3 cm

Panel genişlikleri: 3,35 metre ve 3,96 metre

Panel Uzunlukları: minimum 3,25 metre, maksimum 6,5 metre

Transfer anı silindir beton basınç dayanımı: 27.5 MPa

28 günlük silindir beton basınç dayanımı: 41.5 MPa

Projenin uygulandığı yol, Kaliforniya’da trafiğin en yoğun olduğu otoyollardan biridir. Bu projede üretim ve uygulama metodu olarak sürekli, iki yönde öngermeli ve trafik yönünde ard germeli prekast beton yol panelleri seçilmiştir. Bu yöntemin seçilme nedeni ise hem uygulanan öngeme ve ard germe sayesinde prekast beton kaplama kalınlığının azaltılması hem de trafik yükü altında oluşabilecek çatlakların önlenmesi ya da minimize edilmesi olarak belirtilebilir.

Öngermenin yarattığı beton üzerindeki basınç gerilmesi, prekast beton panel üzerindeki teker yüklerinin oluşturduğu çekme gerilmelerini azaltır (Merritt v.d., 2005).

Birbiri ardına eklenen prekast panellere uygulanan ard germe kuvveti, basınç gerilmesini paneller arasında yayarak, panel kalınlığının derzli yerinde dökümlü beton yollara ya da derzli prekast beton yollara göre 5 cm. ile 10 cm. arasında azalmasını sağlar (Tayabji v.d., 2013).

3.1 Sürekli (Ard Germeli) Prekast Yol Paneli Üretim Aşamaları

Prekast panel kalıpları istenilen boyutlara getirildikten sonra uzun kenar ve kısa kenar yönünde 0,5 inç çapında öngörme halatları yerleştirildi. Kısa kenar doğrultusunda yerleştirilen öngörme halatları her 40 cm. de bir ard germe kanallarının üstüne ya da altına gelecek şekilde yer değiştirdi. Halatların sürülmesinden sonra ön germe uygulandı. Her iki yönde uygulanan ön germe kuvveti, çekme dayanımının %75'i kadardı. Öngörme işleminin tamamlanmasından sonra ard germe için 2,5 cm çapındaki kanallar prekast paneller içerisine sabitlendi. Kanalların döküm esnasında hareket etmemesi için gerekli tedbirler alındı. Yine bu kanallar üzerine ve panellerin değişik noktalarına ard germe sonrası büzülme grout enjekte etmek için bağlantı noktaları bırakıldı.



Şekil 4. Öngermeli prekast panel içerisine yerleştirilen ard germe kanalları

Hazırlığı tamamlanan kalıpların dökümüne geçildi. Döküm esnasında sırt vibratörleri ve dönen master kullanıldı.



Şekil 5. Öngermeli prekast panel hattı

Döküm sonrasında yüzeyin sürtünme katsayısını artırmak için taraklama işlemi gerçekleştirildi. Bu esnada beton yüzeyin kurumaması için priz geciktirici ve yüzeydeki su kaybını önleyici katkılar kullanıldı.



Şekil 6. Döküm sonrası yüzey taraklama işlemi



Şekil 7. Yüzeý priz geciktirici ve kür uygulaması

Takip edilebilirlik adına her bir panele proje numarası ve üretim tarihi işaretlendi.



Şekil 8. Panellerin işaretlenmesi

Buhar kürü sonucu istenilen transfer anı beton basınç değerine ulaşılmasının ardından her iki yöndeki ön germe halatlarının kesimine geçildi.



Şekil 9. Ön germe kuvvetinin prekast panellere transferi

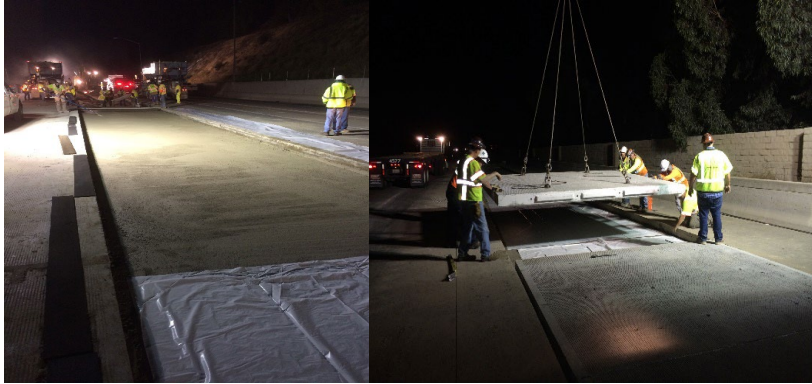
Üretimi gerçekleştirilen prekast paneller inşaat sahasına gönderilmeden önce stok sahasında bekletildi.



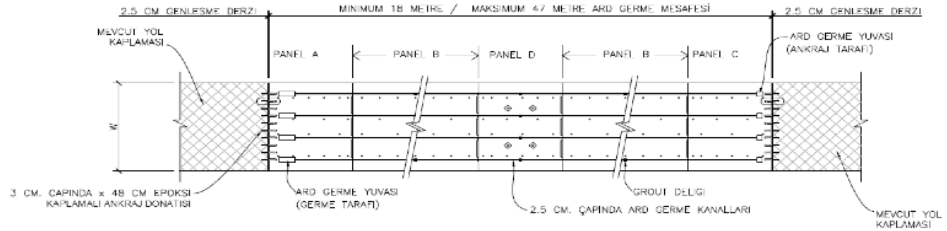
Şekil 10. Prekast panel stok sahası

3.2 Sürekli (Ard Germeli) Prekast Panel Montajı

Yenilenecek mevcut yol kırılıp, altına yaklaşık 23 cm kalınlığında (Myers-sons.com, 2019) hızlı priz alan çimento harcı döküldü ve yüzey tesviyesi yapıldı. Daha sonra tüm yüzey ard germe esnasında panel ile zemin arasında sürtünmeyi azaltmak için polietilen malzeme ile kaplandı.



Şekil 11. Panel yerleşimi öncesi hazırlık ve montaj anı



Şekil 12. Ard germe uygulama şeması

Prekast beton yol montaj ve ard germe aşamaları aşağıdaki şekilde uygulandı:

1. Mevcut yol kaplamasının yenilenecek kısmının başlangıç ve bitişi düzgün bir şekilde kesildi.
2. Başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki eski kaplama kırılarak montaj sahasından uzaklaştırıldı.
3. Mevcut kaplama 3,5 cm çapında delinerek, 3 cm. çapındaki epoksi kaplamalı filiz demiri mevcut yola epoksi ile ankrajlandı..
4. Prekast panel altına gelen kısımlar montaj öncesi hızlı priz alan tesviye harcı ile tesviye edildi ve tüm yüzey sürtünmeyi azaltıcı polietilen malzeme ile kaplandı.
5. Tesviye harcı istenilen dayanıma ulaştıktan sonra panellerin montajına başlandı.
6. Paneller arasındaki geçişlerde panel kenar yüzeyi epoksi ile kaplandı.
7. Panellerin en iç ve en dıştaki ard germe kanallarından 0,5 inç çapında halat geçirildi. Bu halatlara çekme dayanımının %75'i kadar geçici ard germe kuvveti uygulandı ve daha sonra kuvvet boşaltıldı.
8. En son panel monte edilene kadar 6 ve 7'nci adımlar tekrarlandı.
9. Geçici öngerme halatı çıkartılarak 0,6 inç çapındaki halatlar ard germe kanallarından geçirildi.
10. Ard germe halatları gerildi.
11. İlk ve son panel üzerinde bulunan ard germe yuvaları ve sonlardaki filiz demiri boşlukları grout ile dolduruldu.
12. Ard germe kanalları ve panel altlarına basınçlı grout enjekte edildi.

Birbiri ardına monte edilen panellerin yol boyunca değişik noktalandaki ard germe uzunluğu minimum 18 metre ve maksimum 47 metre olacak şekilde düzenlendi.



Şekil 13. Ard germe uygulaması

3.3 Montaj Ve Ard Germe Esnasında Karşılaşılan Sorunlar

- İşin başlangıcında montaj ekibinin yeterince tecrübesinin olmaması çok önemli bir sorundu. Yenilenecek yolun derzlerinin düzgün kesilememesi mevcut yol ile prekast paneller arasında eğri derz oluşmasına sebep oldu. Bundan dolayı başlangıçta monte edilen panellerin birçoğunda mevcut yol ile prekast panel arasındaki açıklık tam kapanmadı. İş ilerledikçe tecrübe ile bu sorun ortadan kalktı.
- Mevcut yolun kırılması sonrasında bazı panellerin altındaki zemin sıkıştırılmadı ve herhangi bir zemin iyileştirmesi de yapılmadan tesviye harcı döküldü. Bu panellerde çok geçmeden çatlaklar görüldü.
- Paneller arası geçişlerde iki panel tam olarak birbiri ile örtüşmedi. Bunun en büyük sebebi panellerin üretildiği kalıplarda fark edilmeyen ölçü kaymalarıydı. Her ne kadar toleranslar içerisinde de olsa panel kenarlarının birbirine dik olması önemliydi. İki panelin kenarlarındaki eğrilik, ard germe sonrası panellerin tam kapanmamasına ve ard germe kanalları içerisine uygulanan grout harcının sızmasına neden oldu. Projenin başlangıcında uygulanan test panellerinde bu sorun fark edilip düzeltildi.
- Teorik olarak, enjekte edilen grout harcının panel altlarını ve ard germe kanallarını tamamı ile doldurması gerekmektedir. Ancak pratikte bunun gerçekleşip gerçekleşmediğinin tam olarak bilinmemesi çok büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu alan geliştirmeye açıktır.

4 Sonuç

Öngermeli prekast beton yollar Amerika Birleşik Devletleri'nde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Yolların yenilenmesi ya da tamiri prekast beton yol panellerinin öncelikli kullanım alanlarıdır. Hızlı üretim ve montajı, kalitesi, dayanıklılığı ve öngermenin getirdiği daha yüksek yük taşıma kapasitesi prekast beton yol panellerinin ön plana çıkan özellikleridir. Bununla beraber prekast beton panel altının desteklenmesi durumu ve panellerin derzlerindeki yük transferleri prekast beton yol panellerinin dizaynında gözden geçirilmesi gereken iki kritik risktir (Tayabji v.d., 2013).

Kaynaklar

- Chen, Y., Chang, L. (2015), Paving for the future-Precast Prestressed Concrete Pavement (PPCP), Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 1, issue 1, pp.7-12
- Merritt, D., McCullough, B., Burns, N. (2005), Design-Construction of a Precast, Prestressed Concrete Pavement for Interstate 10, Elmonte, California, PCI Journal March-April 2005, pp. 18-27
- Mishra, T., French, P., Sakkal, Z. (2013), Engineering a better road: use of two-way prestressed. Precast concrete pavement for rapid rehabilitation. PCI Journal, Winter 2013, pp.129-141

Myers & Sons Construction website (2019), <https://myers-sons.com>

Parvini, Mehdi (2017), Precast Concrete Pavement California Update, National Concrete Consortium, SLC 1-24

Tayabji, S., Ye, D., Buch, N. (2013), Precast concrete pavements: Technology overview and technical considerations, PCI Journal Winter 2013, pp. 112-128

Tayabji, S. (2019), Precast Concrete Pavement Technology Implementation, FHWA-HIF-19-013, Washington, DC: Federal Highway Administration

This page is intentionally left as blank

Bu sayfa bilerek boş bırakılmıştır.

Trafik Güvenliği için Beton Bariyerler

Fatih Özalp¹, Fatih Piliş¹, H. Dilşad Yılmaz¹, Şenol Yaşar¹, Ali Osman Atahan²

¹İSTON İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. ve Tic.A.Ş., İstanbul

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, ülkemizde kullanılan bazı beton bariyer örnekleri ve beton bariyerlerde zaman içerisinde oluşan değişim ve gelişmeler verilmiştir. Bu kapsamda, H1 hizmet sınıfını sağlayan beton otokorkuluklar da çalışmada sunulmuştur. Türkiye'nin H1 sınıfında ilk CE belgeli hizmet sınıfı beton bariyeri, yapılan çarpışma test sonuçlarına göre yeterli performans göstermiştir. Ayrıca, H1 sınıfı beton bariyerinin yapısını oluşturan betonun bazı mekanik ve geçirimsizlik özellikleri verilmiştir. Son bölümde ise ileri uygulamalar için çok ağır hizmet seviyesine karşılık gelen H4b sınıfı beton bariyerlerin geliştirilmesinde kullanılabilir beton karışımı önerilmiş ve bu betonun mekanik davranış ve geçirimsizlik özelliklerine yönelik çalışma sonuçları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Beton bariyer, CE belgesi, TS EN 1317-2, servis ömrü, çarpışma testi

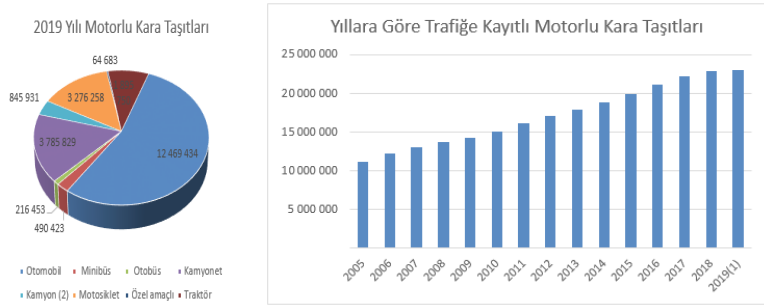
1 Giriş

Son yıllarda teknolojiadaki hızlı değişim özellikle motorlu taşıtların gücünde ve hızında artışa sebep olmuştur. Yine, son yıllarda ülkemizdeki ticari ve ekonomik gelişmeler karayolu ile yük taşımacılığını ve insanların seyahat talebini artırmıştır. Bu gelişmeler trafik yoğunluğunu artırmakla birlikte kazaların artışını da beraberinde getirmiştir.

Trafik kazalarında sorumluluğun sadece sürücülere yüklenmeyerek, bu sorumluluğun sürücüler ve karayolunu projelendiren idareler arasında paylaşılması önemli bir husustur. Böylece, herhangi kaza vb. olumsuz durumda sürücüler dışında, karayolları ve belediyelerin sorumlu olması (uygun olmayan projelendirme, saha uygulamaları vb.) bu kurumları trafik emniyeti için daha güvenilir ürünlerin araştırılması konusunda teşvik etmektedir. Bu

ürünlerden bir tanesi de beton bariyerlerdir. Beton bariyerler yol kenarlarında ve orta refüj uygulamalarında kullanılarak, sahip oldukları özel geometrik kesiti ile çarpan aracın hızını azaltmakta, aracın kendi şeridindeki istikametinden çıkmasını ve takla atarak karşı şeride geçmesini engellemektedir.

TÜİK 2019 yılı haziran ayı verilerine göre Türkiye’de trafiğe kayıtlı 23 milyon üzerinde araç bulunmaktadır (Şekil 1). Bu araçların %18’ine karşılık gelen 4 milyon üzeri araç İstanbul ilinde bulunmaktadır. 2005 yılına oranla araç sayısı Türkiye genelinde % 207 oranında artmıştır (TÜİK, 2019). Bu verilere göre araç sayısının artışı ile birlikte kazaların olma olasılığı da artmaktadır. Bu araç sayısının artış hızı ile ilerleyen yıllarda kaza olasılığını azaltmak için beton bariyerlerin trafik güvenliğini sağlamadaki fonksiyonu çok önemlidir.



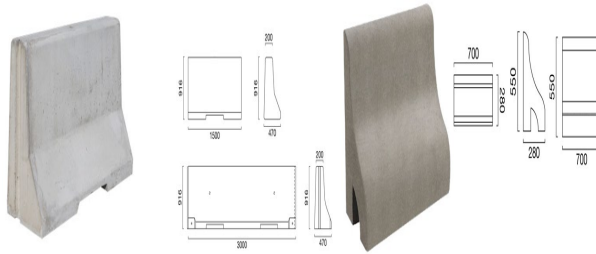
Şekil 1. 2019 yılı haziran ayı TUİK verilerine göre motorlu taşıt dağılımı ve yıllara göre trafiğe kayıtlı motorlu kara taşıtları (TÜİK, 2019)

Trafik güvenliği için beton bariyer kullanılması önemli ve yaygın bir uygulamadır. Türkiye’de ilk beton bariyer uygulamaları 1988 yılında İstanbul’da D100 karayolu üzerinde Maviyler rampası-Bostancı arasında 3 km yol boyunca, İzmir’de Alsancak ile Karşıyaka arasında 2,5 km ve İzmir- Selçuk yolunun 6,5 km’lik bölümünde, İskenderun-Belen geçidinde 700 m’lik kısımda yapılmıştır (TPB, 2019). Dünyada ilk olarak Amerika’da, New Jersey tipi olarak bilinen beton güvenlik bariyerleri General Motors tarafından 1955’te tasarlanmış ve ilk olarak New Jersey’de kullanılmıştır. Avrupa’daki ilk uygulamalar 1970’lerden itibaren Belçika ve Fransa’da gerçekleştirilmiştir (TÇMB, 2018). Çeşitli bariyer sistemlerinin inşaat maliyetlerini karşılaştıran birçok çalışma, beton bariyerlerin son derece rekabetçi bir ürün olduğunu doğrulamaktadır. En az 50 yıl bakım gerektirmeyen servis ömrü ile beton bariyerler, minimum bakım faaliyeti ve buna bağlı minimum trafik yönetimi gerektirmektedir. Çelik bariyerler, yaklaşık 20 yıllık bir tasarım ömrüne sahiptir ve taşıt darbelerinden sonra her defasında bakım gerektirmektedir; bu durum sıklıkla trafik yönetimini gerektiren ve şerit tıkanıklığına neden olan bir faaliyettir. Bu nedenle, beton bariyerlerin 50 yıllık ömrü boyunca, çelik bariyerlere göre montaj ve bakım için gerekli olan işçilik, araç ve enerji miktarı çok daha düşük olacaktır (TÇMB, 2018). Görsel olarak, beton bariyerler, doku ve renk açısından aynı görünümde, düzgün ve sürekli bir yapı sağlamaktadır. Ayrıca sürüş konforu açısından, beton bariyerler gece karşıdan gelen parlamalardan kaynaklanan göz kamaşmasını azaltmaya yardımcı olmaktadır (TÇMB, 2018).

Bariyerlerin üretiminde kullanılan betonun tasarım kriterleri önemli bir konudur. Betonarme yapıda, betonun su/bağlayıcı oranının 0.40 değerinin üzerinde olması halinde karbonatlaşma ve korozyon riski artmaktadır. Betonarme bir yapıda çelik donatının korozyonunun önlenmesi ve betonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığının artırılması için betonda hidrasyon sonucu ortaya çıkan kirecin bağlanması önemlidir. Bundan dolayı söz konusu uzun süreli performans için, betondaki kireci bağlayacak uygun kalite ve miktarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya silis dumanı gibi mineral katkıları kullanmak gereklidir (Taşdemir ve Akkaya, 2007). Ayrıca, beton gibi çimento esaslı kompozitlerin yarı gevrek davranışı çeşitli özelliklerde lifler kullanılarak sünek davranışa doğru geliştirilebilir (Yardımcı, 2007). Betonda yeterli miktarda çelik liflerin varlığı hem dayanım hem de enerji yutma kapasitesini geliştirir. Lif miktarı ve lif narinliğinin çelik lifli betonun eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve tokluğu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Lif miktarı ve narinliğindeki artışla eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve tokluk belirgin artış gösterir. Çelik lif ilavesi ile betonun sünekliği yalın betonun sünekliğine göre yaklaşık 50 kat artabilmektedir (Yardımcı, 2007). Betonda çelik lif kullanımı, betonun enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini arttırmaktadır. Çelik tellerin betondaki esas etkisi çatlak sonrası davranışta görülmektedir. Eğer uygun bir karışım tasarlanırsa; ilk çatlak oluşuktan sonra matristeki rastgele dağılmış olan kısa çelik teller köprüleme etkisi ile çatlağın ilerlemesini önler. Tellerin betondan sıyrılması sırasında, çatlak genişlemesi geciktirilmiş ve çatlağın ilerlemesi önlenmiş olur. Tellerin matristen sıyrılarak çıkması fazla enerji gerektirdiğinden toklukta belirgin bir artış elde edilir (Yalçın v.d., 2007).

2 Beton Bariyerlerin Gelişimi

Beton otoyol bariyeri ürünler ülkemizde ilk üretildiği yıllarda Şekil 2’de verildiği gibi sadece erkek ve dişi kısımların birbirine geçme prensibine dayalı olarak üretilmekteydi. Bu sistemde, beton korkuluklar birbirine kentlenmeyen, bariyerleri sadece beton çıkıntı ile birbirine bağlayan, stabilitesini ve kaza anında enerji sönmülemeyi kendi ağırlığı ile sağlamak üzere tasarlanmış, birbirinden bağımsız bir yapıdadır. Otoyol bariyerleri dışında yine Şekil 2’de verilen tercihli yol bordürleri ise kaza etkilerinin daha düşük olduğu şehir içi yollarda orta refüj uygulamalarında, iki küçük tercihli yol bordürü arasında toprak dolgu yapılarak kullanılmaktadır. Ancak, her iki tip bariyerin de zaman içerisinde yaşanan kazalar sonrası performansının oldukça yetersiz olduğu anlaşılmıştır.

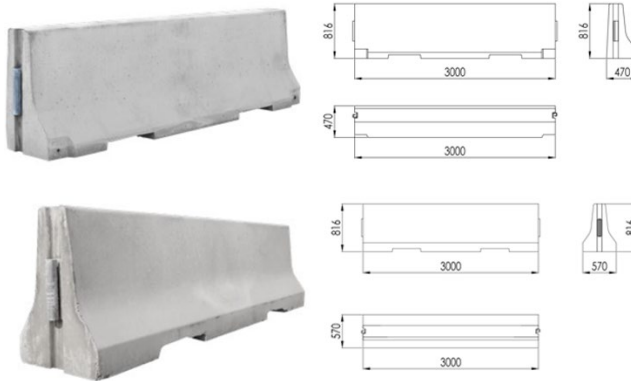


Şekil 2. Otoyol bordürü ve tercihli yol bordürü

Ülkemizde 2011 yılı yürürlük tarihli TS EN 1317-2 standardına göre bariyerlerin çarpışma anında sağlaması gereken performans kriterleri bulunmaktadır. Bu kriterler, araç çarpmasında yolcunun korunması, aracın maksimum bir yanal öteleme ile çarpışma sonrası yol içinde tutulması ve sistemin çarpışma sonrası bir bütün olarak hizmet vermeye devam etmesidir. Hedeflenen bu şartların sağlanabilmesi için bariyerlerin, bloklar arası geçmeli bağlantı, taban bağlantısı, arka bağlantı, yere ankraj aparatı gibi elemanlar kullanılarak bir sistem halinde çalışması ve özel geometrik şekli ile çarpma enerjisini sönmüleyecek şekilde geliştirilmesi gerekmektedir.

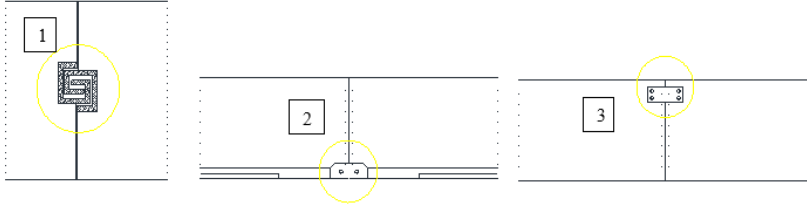
3 H1 Hizmet Sınıfı Beton Bariyerleri

Özel olarak tasarlanan geometrik şekli ve bloklar arası geçmeli bağlantı, taban bağlantısı, arka bağlantı elemanları ile H1 hizmet sınıfı için geliştirilen beton bariyer İtalya'nın Milano kentinde TS EN 1317-2'e uygun olarak çarpışma testine tabi tutulmuştur. Çarpışma testi sonuçları beton bariyerin H1 sınıfı olarak karayollarında kullanım için yeterli performansa olduğunu göstermiştir. H1 Hizmet sınıfı beton bariyer modüler tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki farklı ürün olarak 3000 mm uzunluğunda, sırasıyla 470 mm ve 570 mm genişliğinde ve 816 mm yüksekliğinde olup Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. H1 sınıfı beton bariyer tek yön ve çift yön

Şekil 3'de ürünler üzerinde ve Şekil 4'de kesit resimlerinde gözüktüğü gibi beton bariyerlerin birleşerek sistem içinde süreklilik sağlanması için bariyerin farklı kısımlarında üç farklı bağlantı detayı oluşturulmuştur. Bağlantı elemanları çarpışma anında bariyer sisteminin daha fazla enerji sönmülmesini ve birbirinden ayrılmamasını sağlamaktadır.



Şekil 4. Beton bariyer bağlantıları (1) bloklar arası geçmeli bağlantı (üstten görünüm) (2) taban bağlantısı (önden görünüm) (3) arka bağlantı (arkadan görünüm)

Şekil 4’de gösterilen ilk bağlantı bloklar arasında birbirine geçmeli parçadır, ikinci ve üçüncü parça sırasıyla blokları tabanında ve arkadan bağlayan çelik bağlantı parçalarıdır.

Tablo 1’de ise TS EN 1317 çarpışma test standardında hizmet sınıfına göre yapılacak testlerin kodu ile birlikte araç ağırlığı, araç tipi, araç çarpma açısı ve araç çarpma hızı verilmiştir.

Tablo 1. EN1317-2 standardı çarpışma testi kriterleri

Test Kodu	Araç Ağırlığı ve Tipi	Çarpma Açısı ve Hızı
TB11	900 kg Otomobil	20 Derece 100 km/saat
TB21	1300 kg Otomobil	8 Derece 80 km/saat
TB22	1300 kg Otomobil	15 Derece 80 km/saat
TB31	1500 kg Otomobil	20 Derece 80 km/saat
TB32	1500 kg Otomobil	20 Derece 110 km/saat
TB41	10000 kg Kamyon	8 Derece 70 km/saat
TB42	10000 kg Kamyon	15 Derece 70 km/saat
TB51	13000 kg Otobüs	20 Derece 70 km/saat
TB61	16000 kg Kamyon	20 Derece 80 km/saat
TB71	30000 kg Kamyon	20 Derece 65 km/saat
TB81	38000 kg Tır	20 Derece 65 km/saat

Tablo 2 ise hizmet seviyesine göre çarpışma test kriterlerinin uygulanmasını göstermektedir. Örnek olarak bir beton bariyer, H2 hizmet seviyesi için TB11 ve TB51 çarpışma testlerinde başarılı olması gerekmektedir.

Tablo 2. EN 1317-2 standardı hizmet seviyesi için gerekli kabul testleri

	Hizmet Seviyesi	Kabul Testi
En Hafif Hizmet	T1	TB21
	T2	TB22
	T3	TB41 ve TB21
Normal Hizmet	N1	TB31
	N2	TB11 ve TB31
Ağır Hizmet	H1	TB11 ve TB42
	H2	TB11 ve TB51
	H3	TB11 ve TB61
Çok Ağır Hizmet	H4a	TB11 ve TB71
	H4b	TB11 ve TB81

4 H4b Sınıfı Bariyerler için Beton Tasarımı

4.1. Çarpışma Testleri

Bir bariyerin H4b hizmet seviyesi olması için beton bariyer kabul testi olarak TB11 ve TB81 çarpışma testlerinde başarılı olması gerekmektedir. TB11 testinde 900 kg ağırlığındaki araç, 100 km/saat hızla ve 20 derecelik bir açıyla, TB81 testinde ise 38 tonluk tır, 65 km/saat hızla ve 20 derecelik açıyla otokorkuluğa çarpıtılmalıdır.

Çarpışma testleri sırasında beton bariyerin deformasyonu, dinamik yer değiştirme ve çalışma genişliği ile karakterize edilir. EN 1317 standardında çalışma genişliği (W) araç çarpması öncesi bariyer sisteminin trafiğe bakan kısmı ile bariyer sisteminin herhangi bir parçasının arasında kalan yanal mesafedir. TB42 testi yüksek enerji içeren bir test olduğu için bariyerlerin esnemesi söz konusudur. Çalışma genişliği sistemdeki elemanların ve bağlantıların rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Aracın herhangi bir kısmı sistemden daha fazla yanal olarak hareket edebilir. Bu durumda çalışma genişliği olarak bu mesafe alınmaktadır. Çalışma genişliği sınıfları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Çalışma genişliği sınıfları (TS EN 1317)

Çalışma Genişliği Sınıfı Kodu	Çalışma Genişliği Mesafesi (metre)
W1	$W \leq 0,6$
W2	$W \leq 0,8$
W3	$W \leq 1,0$
W4	$W \leq 1,3$

W5	$W \leq 1,7$
W6	$W \leq 2,1$
W7	$W \leq 2,5$
W8	$W \leq 3,5$

H4b hizmet sınıfı performansındaki beton bariyerin TB11 ve TB81 test kriterlerini sağlayabilmesi için araçlar devrilmemeli, bulunduğu şeritten karşı şeride geçmemeli, bariyeri oluşturan uzunlamasına doğrultudaki elemanlarda kopma olmamalı, bariyerler sistemsel olarak birbirinden ayrılmamalıdır. H4b hizmet sınıfı beton bariyerlerde TB11 testinin yapılmasının amacı aracın çarpışma esnasında maruz kaldığı x, y ve z yönlerindeki ivmelenmeleri kullanılarak araç yolcularına gelecek çarpışma şiddeti endeksi (ASI), diğer bir deyişle yaralanma risklerini hesaplamaktır. ASI değerine göre darbe şiddeti düzeyi Tablo 4’de verilmiştir. Bir kaza esnasında ciddi yaralanmaların önlenmesi ASI=1,9 seviyesinden sonra oluşacağı kabul edilir ve ASI değerinin olabildiğince küçük değer alması istenen bir durumdur.

Tablo 4. Darbe şiddeti düzeyleri (TS EN 1317)

Darbe Şiddeti Düzeyi	Endeks Değeri
A	$ASI \leq 1$
B	$1 < ASI \leq 1,4$
C	$1,4 < ASI \leq 1,9$

4.2. Beton Tasarımı;

Bariyerlerin EN 1317-2 standardına göre yapılan çarpışma testleri dışında, kullanıldığı ortamda sürekli olarak maruz kalacağı çevresel etkilerde dikkate alınarak geliştirilmesi gereklidir. **Şekil 5’ de** resimlerde İstanbul’da beton bariyer uygulamalarından bir örnek olarak İstanbul Kartal Samandıra Tem Bağlantı Yolunun resimleri verilmiştir. İstanbulda kış şartları ile mücadele çalışmaları kapsamında tuzlama ve buzlanmayı önleyici solüsyon uygulamaları bu bağlantı yolunda yoğun olarak uygulanmaktadır. Beton bariyerlerin yol eksenine yakın kısmındaki beton kesitindeki deformasyonların tuzlama ve buzlanmayı önleyici solüsyon etkilerinden, **üst kısımlarında oluşan** dökülmelerin ise donma çözülme çevriminde suyun hacim değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5. İstanbul Kartal Samandıra Tem Bağlantı Yolu beton bariyer uygulaması ve çevresel faktörlerin beton bariyerlere etkileri

Yine, çevresel etkiler ile birlikte kaza anında bariyer sistemi kendi bütünlüğünü korusa dahi, bariyerin araç çarpan kısımlarında kısmi parçalanma, kopma vb. etkiler oluşabilmektedir (Şekil 6). Ayrıca, bağlantı elemanları çevresinde çarpma anında oluşan yükten dolayı betonda kesit kaybı olduğu durumlarla karşılaşabilmektedir.



Şekil 6. Beton bariyerlerin çarpma sonrası deformasyonları

Bu kapsamda, söz konusu çevresel etkiler ve kaza anındaki darbe yükleri de dikkate alınarak H4b hizmet sınıfı beton bariyerlerin geliştirilmesinde kullanılacak beton karışımı için çalışmalar yapılmıştır.

H4b beton karışımında bariyerin darbe etkilerine dayanımını geliştirmek için çelik teller, beton içyapısının iyileştirilmesi için mineral katkı ve donma çözülme performansının artırılması için hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çelik tel, narinliği 60, uzunluğu 65 cm olan ve çekme dayanımı 1100 MPa olan kancalı uçlu çelik tel olup, 25 kg/m³ oranında beton karışımında kullanılmıştır. Yine, H4b bariyerinde kullanılacak beton karışımlarda 370 kg/m³ CEM I 42,5 R çimento ile birlikte 100 kg/m³ ÖYFC ve 0,138 kg/m³ hava sürükleyici katkı kullanılmıştır.

H1 hizmet sınıfı beton bariyerin beton özellikleri ise performansa dayalı karşılaştırma yapılabilmesi için "H1 karışımı" olarak verilmiştir. H4b hizmet sınıfı beton bariyer için geliştirilen beton karışımı **çalışmada** "H4b karışımı" olarak belirtilmektedir.

H1 bariyer betonun karışım oranları; çimento: su: doğal kum (0-4mm): kırma kum (0-5 mm): kırmataş I (4-11,2 mm): süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı = 1: 0,38: 1,33: 1,12: 1,65: 0,011 şeklindedir. H4b karışım oranları; çimento: ÖYFC: su: doğal kum (0-4mm): kırma kum (0-5 mm): kırmataş I (4-11,2 mm): süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı: hava sürükleyici kimyasal katkı: çelik tel katkı = 1: 0,27: 0,47: 1,61: 1,37: 2,01: 0,013: 0,0004: 0,068 şeklindedir. H1 ve H4b sınıfı karışımındaki portland çimentosunun (CEM I 42,5 R) miktarları sırası ile 450 kg/m³ ve 370 kg/m³ tür. Beton basınç dayanımı 100x100x100 mm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Kırılma enerjisi için 100x100x500 mm prizma numuneler üzerine üç noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. TS 2814 EN 1338' e göre her iki beton karışım sınıfı için aşınma direnci tayini deneyleri yapılmıştır. Kılcal su emme, hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve donma çözülme deneyi için 100x200 mm boyutundaki silindir numunelerden kesilen 50x100 boyutundaki disk numuneler kullanılmıştır. Deney sonuçları Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Betonların mekanik özellikleri (Özalp v.d., 2018)

	28.Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Aşınma değeri (mm)	Kırılma Enerjisi (N/m)
H1 Karışımı	66,1	23	72
H4b Karışımı	40,5	22	1016

Tablo 6. Hızlı klor geçirimsizliği, kılcal su emme ve donma çözülme deney sonuçları (Özalp v.d., 2018)

	Hızlı klor iyonu geçirimsizliği (Coulomb)	Kılcal su emme (mm)	Donma-Çözülme miktarı (kg/m ²)
H1 Karışımı	4548	1,15	0,1
H4b Karışımı	1370	0,97	0,0

5 Sonuçlar ve Değerlendirme

H4b sınıfı bariyer beton basınç dayanımı H1 karışımına göre % 40 oranında düşük çıkmıştır. Yapılan H4b beton karışımında sürüklenen hava yaklaşık % 10'dur. ASTM C 825-6 Beton bariyer standardında, beton içinde % 4,5-6,5 aralığında hava içeriğinin donma çözülme performansı bakımından yeterli olduğu belirtilmektedir. Beton içindeki hava içeriği oranının %10 yerine % 5 civarı olması durumunda, hem donma çözülme etkileri açısından istenen performans elde edilebilir hem de betonun mekanik özelliklerinin hava boşluğunun artmasından olumsuz etkilenmesi önlenir.

Beton bariyerin çarpma anında enerji sönmemesi ve kendi bütünlüğünü koruyarak sürekliliğini sağlaması, bağlantı elemanlarının tasarımı ve sahip olduğu özel geometrisi dışında beton özellikleri ile de ilgilidir. H4b beton karışım numunesinde çelik lif kullanılması ile çelik tel kullanılmayan H1 karışımına göre kırılma enerjisi 14 kat artmıştır. Beton bariyerlerde çelik tel kullanılmamasının aynı zamanda darbe etkisini azaltarak ürün üzerindeki beton malzemenin parçalanma, kopma ve dağılmasını önleyerek servis ömrünü arttıracığı beklenmektedir. TB 81 test kodu kriterindeki 38 tonluk tırın beton bariyere çarpması durumunda çelik tel kullanılmamasının bariyerin enerji sönmemesini arttıracığı, çarpmanın ürün üzerindeki etkilerini azaltarak H4b hizmet sınıfı beton bariyerin performansını önemli ölçüde geliştireceği öngörülmektedir.

Beton karışımından alınan numunelere bazı geçirimsizlik testleri ve %3 NaCl çözeltisi kullanılarak 28 gün süreyle donma çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçları incelendiğinde, H4b karışımının cüruf kullanılması ile hem kılcal su emme hem de klor iyonu geçirimsizliğinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma hızlı klor iyonu geçirimsizliği testinde yaklaşık 3,3 kat oranda çok daha belirgin olarak gerçekleşmiştir. Karışımların donma çözülme performansları ise EN 1338, EN 1339 ve EN 1340 standartlarına göre değerlendirilmiş olup, bu standartlara göre beton yüzeyinden maksimum 1,5 kg/m² parça kopmasına izin verilmektedir. Yapılan çalışmada her iki beton karışımından alınan beton numunelerinde 1,5 kg/m² değerinden daha az miktarda kütle beton yüzeyden ayrıldığı görülmektedir. Her iki karışım donma çözülme etkileri açısından söz konusu standarda göre yeterli performans göstermektedir.

Sonuç olarak, çelik telin, mineral katkı olarak ÖYFC'nin ve belirli miktarda kullanılacak hava sürükleyici kimyasalın H4b hizmet seviyesi bariyerlerde kullanılacak betonun, mekanik davranışını geliştireceği, iç yapısının iyileştireceği ve donma çözülme etkilerine karşı performansını arttıracak beklenmektedir. Böylece, bu geliştirmelerin bariyerin servis ömrünün uzatılmasına ve çarpma anında oluşacak can ve mal kayıplarının azaltılmasına katkıda bulunacağı öngörülmektedir.

Kaynaklar

- Özalp, F., Pilis, F., Yılmaz, H.D., Yaşar, Ş., Atahan, A.O 2018, "CE Standartlarına Uygun H1 Sınıfı Yerli Beton Bariyer Tasarımının H2-H4 Sınıfları İçin Performansının Geliştirilmesi", TRANSİST 2018 İstanbul Ulaşım Kongresi, pp. 116-127.
- Taşdemir M. A. and Akkaya, Y., "Turkey - Concrete Construction Industry - Cement Based Materials and Civil Infrastructure - (CBM-CI)", CBM-CI International Workshop, Ed. S. Ahmad, Karachi, 2007, pp. 185-200.
- TÇMB, 2018, EUPAVE Beton Güvenlik Bariyerleri; Güvenli ve Sürdürülebilir Seçim. ss. 4-5
- TS EN 1317-2 Yol Güvenlik Sistemleri - Bölüm 2: Taşıt Parapetleri Dâhil Güvenlik Bariyerleri İçin Performans Sınıfları, Çarpma Deneyi Kabul Kriterleri ve Deney Yöntemleri, 2011
- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu, Karayolu Araç Dağılım Yüzdeleri, 2019
- Türkiye Prefabrik Birliği, 2019, Prefabrik Beton Yol Uygulamaları Ankara
- Yardımcı, M. Y., 2007, "Çelik Lifi Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- Yalçın, M., Taşdemir, C., Gökalp İ., Ekim, H., Yerlikaya, M., 2007, "Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanılabilirlik ve Taşıma Gücü Sınır Durumlarına Göre Tasarımı", 7. Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Gelişmeler ve Uygulamalar, 28-29- 30 Kasım, Bildiri 31, İstanbul, Sayfa 353-362

Yol Üstyapı Tipinin Seçimi

Zeliha Temren

Türkiye Asfalt Mühendisleri Derneği, Ankara, Türkiye

Özet

Bir yolda üstyapı tipi seçimi idarelerin karşılaştığı zorlu mühendislik kararlarından biridir. Genellikle üstyapının performansı, ilk yapım ve ömür boyu maliyeti ile yol kullanıcılarına sağladığı sürüş konforu, ve güvenlik üstyapı tipinin seçiminde dikkate alınan faktörlerdir. Karayolu idareleri esnek ve rijit üstyapı tipinin seçiminde asfalt ve beton sektörü arasındaki rekabeti dikkate alarak her bir proje için en uygun üstyapı alternatiflerini objektif olarak değerlendirmek ve seçmek için sistematik belirli bir yöntemi şeffaf olarak uygulamak durumundadır. Proje şartlarına uygun en iyi üstyapı tipinin seçilmesi ile yol kullanıcıları hizmet seviyesi yüksek bir üstyapıyı kullanarak zamandan ve araç işletme giderlerinden tasarruf ederken, idarelerin bakım, onarım ve işletme giderleri azalacak ve üstyapıya malzeme üretenler ile yükleniciler ise asfalt ve beton endüstrisinin market payını daha iyi saptayarak rekabet politikalarını buna göre geliştireceklerdir.

Ülkemizde tamamı asfalt yollar ile teşkil edilen karayollarına hizmet veren yükleniciler yolu alt yapısı, üstyapısı ve sanat yapıları ile bir bütün halinde üstlendiklerinden, mevcut stratejilere bağlı olarak asfalt işlerini yürütmek üzere gerekli deneyim ve donanıma sahip olmakla beraber, sistematik bir seçim sistemi ile beton üstyapının seçilmesi halinde beton işlerini başarı ile yürütmek için gerekli kapasiteye sahiptirler. Karayoluna hizmet sunan tüm sektör temsilcilerinin amacı sınırlı kamu vergileri ile yollara yapılan yatırımların tam karşılığının halka hizmet olarak sunulmasının sağlanmasıdır.

Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletlerinde yapılan birçok çalışmada beton ve asfalt üstyapı tipinin seçim yöntemleri ile ilgili hazırlanan rehber dokümanlar ve eyaletlerin uygulamaları incelenerek, genel olarak üstyapı tipi seçiminde dikkate alınan faktörler ve uygulanan yöntemler belirtilmiştir. Ayrıca Amerika ve bazı Avrupa ülkelerinin yol ağlarında kullandıkları üstyapı tipi ve bu tiplerin seçiminde kullandıkları yöntemler ile ilgili bilgi verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Üstyapı tipinin seçimi, asfalt üstyapı, beton üstyapı, ömür döngü maliyet analizi.

1 Giriş

Bir yolda üstyapı tipi seçimi idarelerin karşılaştığı zorlu mühendislik kararlardan biridir. Genellikle, üstyapının kısa ve uzun vadeli performansı, ilk yapım ve ömür boyu maliyeti ile yol kullanıcılarına sağladığı güvenlik ve sürüş konforu üstyapı tipinin seçiminde dikkate alınan faktörlerdir. Karayolu idareleri esnek ve rijit üstyapı tipinin seçiminde asfalt ve beton sektörü arasındaki rekabeti dikkate alarak her bir proje için en uygun üstyapı alternatiflerini objektif olarak değerlendirmek ve seçmek üzere sistematik belirli bir yöntemi şeffaf olarak uygulamak durumundadır. Proje şartlarına uygun en iyi üstyapı tipinin seçilmesi ile yol kullanıcıları hizmet seviyesi yüksek bir üstyapı kullanarak zamandan ve araç işletme giderlerinden tasarruf ederken, idarelerin bakım, onarım ve işletme maliyetleri azalacak ve üstyapıya malzeme üreticileri ile yükleniciler ise asfalt ve beton endüstrisinin market payımı daha iyi saptayarak rekabet politikalarını buna göre geliştireceklerdir.

Üstyapı tipi seçim yöntemini belirlemek üzere politikalar geliştiren idareler, genel olarak proje maliyeti, yol uzunluğu, trafik, üstyapı kalitesi, şeritlerin modifikasyonu ve genişletilmesi, yolun eğimi, hızlandırılmış/ yavaşlatılmış şeritler gibi faktörlerin yanı sıra yolun işletme politikası ve kamu hedeflerini de dikkate almaktadır.

Bu kapsamda ekonomik, mühendislik, çevresel faktörler dikkatlice değerlendirilerek, bu faktörlerin ağırlıklarına göre üstyapı tipleri derecelendirilir ve karşılaştırılır.

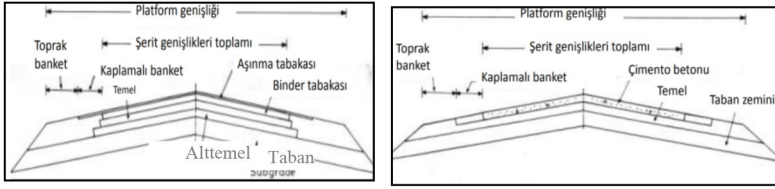
Ülkemizde tamamı asfalt yollar ile teşkil edilen karayollarına hizmet veren yükleniciler yolu alt yapısı, üstyapısı ve sanat yapıları ile bir bütün halinde üstlendiklerinden, mevcut stratejilere bağlı olarak asfalt işlerini yürütmek üzere gerekli deneyim ve donanıma sahip olmakla beraber, sistematik bir seçim sistemi ile beton üstyapının seçilmesi halinde, beton işlerini başarı ile yürütmek için gerekli kapasiteye sahiptirler. Karayoluna hizmet sunan tüm sektör temsilcilerinin amacı sınırlı kamu vergileri ile yollara yapılan yatırımların tam karşılığının halka hizmet olarak sunulmasının sağlanmasıdır.

Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletlerinde yapılan çalışmalarda beton ve asfalt üstyapı tipinin seçim yöntemleri ile ilgili hazırlanan rehber dokümanlar ve eyaletlerin uygulamaları incelenerek, genel olarak dikkate alınan faktörler ve uygulanan yöntemler belirtilmiştir. Ayrıca Amerika ve bazı Avrupa ülkelerinin beton ve asfalt üstyapı yol ağı ile ilgili bilgi verilerek üstyapı tipi seçiminde kullanılan yöntemler belirtilmiştir.

2. Üstyapı Tipleri

Trafik yükünü taşımak üzere kaplama, temel, alttemel tabakalarını içine alan yol yapısı olan üstyapı, esnek ve rijit olmak üzere iki temel tipte yapılmaktadır (KGM,2008). Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve yükleri taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olup, alttemel veya temel malzemeleri üzerinde trafiğe bağlı olarak bitümlü karışımla teşkil

edilmiş tabakalardan teşkil edilmektedir. Rijit Üstyapı, yüksek eğilme mukavemetine sahip ve portland çimentosundan yapılmış tek tabakalı bir plak vasıtasıyla yükleri dağıtan bir üstyapı tipidir. Beton plak bağlayıcısız veya çimento bağlayıcılı bir alttemel veya zayıf beton üzerine yerleştirilebildiği gibi direkt taban zemini üzerine de inşa edilebilmektedir. Şekil 1’de esnek ve rijit üstyapıların tipik enkesitleri verilmiştir.



Şekil 1. Rijit (a), esnek (b) rijit üstyapı tipik enkesiti (Prof. Dr. Karaşahin)

3. Üstyapı Tipi Seçimi

Genellikle karayolu idarelerinin üstyapı tipinin seçiminde kullandıkları belirli bir yöntemleri olmamakla beraber ilk yapım maliyeti seçimde önemli bir rol oynamaktadır. Üstyapı tipinin seçimi tamamen bilimsel olmamakla beraber idare, müşavir ve yükleniciler ile birlikte trafik, zemin, iklim, malzeme, yapım, bakım ve çevre gibi değişen şartların dikate alarak değerlendirmesi gerekmektedir. Seçim işlemi ampirik metodlarla tasarlanan eşdeğer alternatif üstyapı tiplerinin karşılaştırılmasıyla yapılabilmektedir.

3.1 AASHTO üstyapı tipi seçim faktörleri

AASHTO Üstyapı dizayn rehberinde (AASHTO,1993 Ek- B) üstyapı tipi seçimi için dikkate alınan temel ve ikincil faktörler aşağıda belirtilmiştir.

3.1.1 Temel Faktörler

- Trafik: Toplam trafik hacmi yol geometrisini etkilerken, ticari taşıt oranı, ağır yük tekrerrü sayısı üstyapının yapısal tasarımını etkileyen temel parametrelerdir. İdareler belirlenen servis ömrünce tahmin edilen trafiği taşıyan ve yeterli performansı sağlayan alternatif üstyapı tiplerini belirlemektedirler. Ağır trafik hacmi ve tıkanma riski yüksek olan yol kesimlerinde trafik akışının sağlanması için en az bakım ve onarım gerektiren uzun ömürlü üstyapı tipleri seçilmektedir.

- Zemin özellikleri: Üstyapının tabanını oluşturan zeminin yük taşıma kapasitesi üstyapı performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Üstyapı tabanı homojen olmayıp hava tesirleri ile değişkenlik göstermektedir. Zemin özellikleri sadece üstyapının yapısal tasarımını değil üstyapı tipinin seçiminde de önemli bir parametredir. Zamanla hacim değişimi gösteren zeminler aşamalı inşaat gerektirdiğinden seçilen üstyapı tipinin aşamalı inşaatına uygun olması gerekmektedir.

- Hava şartları: Hava şartları hem üstyapı tabanını hem de üstyapının yüzey tabakasını etkiler. Yağış miktarı, kar, buzlanma ve don derinliği tabanın taşıma gücünü mevsimsel olarak etkilemektedir. Rutubet, donma-çözülme ve kar - buz mücadelesi üstyapının yüzey tabakasını doğrudan etkilediğinden, yüzey tabakası kar ve don mücadelesine karşı dirençli olacak şekilde seçilmektedir.

- Yapım şartları: Üstyapının teşkilinde yapım hızı, yapım esnasında trafiğin geçişine izin verilebilmesi, üstyapının yapım, bakım ve yenilenmesinin kolaylığı, yolun gelecekteki genişletilme ihtimali ve yapım mevsimi üstyapı tipinin seçiminde dikkate alınan önemli faktörlerdir. Üstyapının ömrü süresince geometrik veya kapasite değişikliği nedeni ile aşamalı inşaat gereksinimi de üstyapı tipinin seçiminde önemli bir faktördür.

- Geri dönüşüm-Yeniden kullanım: Mevcut üstyapılardan veya diğer kaynaklardan elde edilen malzemelerin yeniden kullanılmasına imkan sağlayan üstyapı tipinin seçimi önemli olmakla birlikte, seçilen üstyapı malzemesinin değerini kaybetmeden geri kazanılabilmesi üstyapı tipi seçiminde sürdürülebilirlik açısından dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

- Maliyet: Bir projede eşdeğer performans sağlayan alternatif üstyapı tiplerinde maliyet karşılaştırması yapılarak üstyapı tipi seçilebilir. Genellikle ilk yapım maliyeti seçimde baskın rol oynamakla beraber seçilen üstyapının bakım-onarım maliyeti çok yüksek olabildiğinden ömür döngü maliyetinin dikkate alınması gerekmektedir. Bir üstyapının ömür döngü maliyeti tahmini hizmet ömrü, ilk yapım maliyeti, bakım ve onarım sıklığı, bakım-onarım maliyeti ve hizmet ömrü sonundaki üstyapının değeri ve kullanıcı maliyetleri dikkate alınarak belirlenmektedir.

3.1.2 İkincil faktörler

- Bölgedeki benzer üstyapıların performansı: Genellikle karayolu mühendislerinin deneyimleri bölgedeki üstyapıların performansı ile sınırlıdır. Tasarımı yapılan üstyapı ile referans üstyapı arasındaki şartlar ve hizmet gerekleri aynı olduğunda, referans üstyapının kısa ve uzun vadeli performansı dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Ancak performans analizlerinin periyodik olarak yapılıyor olması gerekmektedir.

- Yanındaki mevcut üstyapının tipi: Bir yol güzergahında radikal yapısal bir değişiklik olmaması için yeni yapılacak yol kesiminin öncesinde veya sonrasındaki mevcut üstyapı tipi güzergah boyunca kullanılacak üstyapı tipini etkileyen bir faktördür. Kullanılan bir üstyapı tipinin güzergah boyunca devam etmesi bakım işlemlerini kolaylaştırır.

- Malzemelerin ve enerjinin korunması: Ender malzemelerin az kullanılmasını sağlayan veya malzemelerin üretimi, nakliyesi ve yerleştirilmesinde daha az enerji gerektiren üstyapı tiplerinin seçilmesi çevresel ve ekonomik açıdan büyük bir önem taşımaktadır.

- Malzemelerin lokal olarak temin edilebilirliği ve müteahhit deneyim ve donanımı: Malzemelerin lokal olarak temin edilebilirliği üstyapı seçimini etkileyebilmektedir. Ayrıca müteahhitlerin sahip olduğu ekipman ve donanım da özellikle küçük projelerde üstyapı tipinin seçiminde etkin olabilmektedir.

- Trafik güvenliği: Üstyapının yüzey tabakasının enine ve boyuna düzgünlüğü, yüzey drenajı, kayma direnci, işaretlemelerin görünürlüğü ve ışığı yansıtması yol güvenliği açısından önemli faktörler olup üstyapı tipinin seçimini etkilemektedir.

- Denenmiş üstyapıların seçimi: Bir üstyapı malzemesinin performansının deneme kesimleri ile gerçek yapım, çevre veya trafik koşulları altında belirlenmiş olması gerekmektedir.

Alternatif üstyapılar denenmiş üstyapılardan seçilmelidir. Yeni tasarımlar ve malzemelerin arazi performansının deneme kesimleri ile belirlenir.

- Rekabetin teşviki: Sektörde rekabeti artırmak ve yenilikçi çözümlerin üretilmesini sağlamak için alternatif sektörler arasında rekabet teşvik edilerek maliyetler azaltılabilir. Ancak amaç, maliyeti düşürecek rekabet ortamı yaratmak değil iyi mühendislik uygulamalarını ve yenilikçi ürünleri teşvik etmek olmalıdır.

- Kamu idarelerinin tercihleri ve tercihlerin endüstri tarafından kabulü: Bu faktör karayolu mühendislik alanının dışında olmasına rağmen, üstyapı tipinin seçiminde dikkate alınan faktörler arasındadır. Üstyapı tiplerinin seçiminde karayolu idarelerinin tercihi ve bu tercihin sektör tarafından kabul görmesi de önemlidir.

AASTO seçim rehberinde verilen faktörlerin yanı sıra dikkate alınır bir diğer önemli faktör de gürültü sorunudur. Gürültü yolun kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle şehir içi yollar düşük gürültü seviyesine sahip yüzey tabakalarının seçimini gerektirmektedir. Ayrıca yapım sırasındaki şantiye ve yolda oluşan gürültü de diğer önemli bir parametredir.

Çağımızın stratejisi sürdürülebilirlik kapsamında seçilen üstyapının enerji verimliliği yüksek, emisyonu düşük ve kaynakların korunmasına katkı sağlaması gerekmektedir. Kullanılan malzemenin geri dönüştürülebilir olması, endüstri atığı malzemelerin ve yerel malzemelerin kullanılmasına olanak sağlaması gerekmektedir. Ömür döngü analizleri ile üstyapıda kullanılan malzeme, ekipman ve işlemlerin çevresel etkileri değerlendirilerek çevresel etkileri düşük olan üstyapı tiplerinin seçilmesi sürdürülebilirlik açısından önemlidir.

Sonuç olarak her bir proje için üstyapı tipinin seçiminde etkili olan faktörlerin saptanarak, alternatif üstyapı tipleri belirlenmesi değerlendirilmesi ve seçiminde sistematik bir yöntemin kullanılması gerekmektedir.

4 Üstyapı Tipi Seçim Sistemi

Üstyapı tipinin seçim sisteminin idare, üstyapı tasarımı yapan mühendisler, malzeme üreticileri ve yapım- bakım işlerini üstlenen yüklenicilerin temsilcilerinden oluşan bir komite vasıtasıyla çok yönlü değerlendirilerek belirlenmesi gerekmektedir.

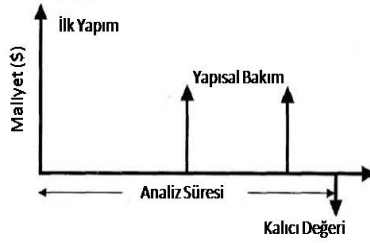
Projede uygulanacak ihale tipine göre üstyapı seçimi idare ve müteahhit tarafından yapılabilmektedir. Yap-İşlet-Devret, Tasarla-Yap tipi ihale sistemlerinde müteahhide üstyapı tipi seçme hakkı verilebilmektedir (TRB, NCHRP Report703,2011).

İdareler öncelikle üstyapı alternatiflerini belirlemek için projenin yapılacağı bölgede üstyapı yönetim sistemi ile performans verilerini toplamakta ve en iyi performansa sahip alternatif üstyapı tiplerini saptamaktadırlar. Belirlenen alternatif üstyapıların ömür döngü maliyet analizi yapılarak maliyetleri karşılaştırılmaktadır.

Ömür döngü maliyetleri belirlenen alternatif üstyapılar saptanan stratejiler kapsamında ekonomik ve ekonomik olmayan faktörlere ve bu faktörlerin ağırlıklarına göre değerlendirilerek en uygun üstyapı alternatifi seçilmektedir.

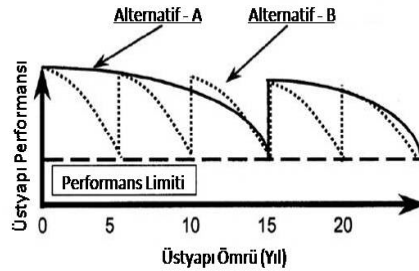
4.1 Üstyapı ömür döngü maliyet analizi

Ömür döngü maliyet analizi için alternatif üstyapıların maliyeti ve performansına yönelik verilerin toplanması gerekir. Bunun için her bir üstyapı alternatifine ilişkin iyi bir envanter kaydı ile analiz periyodu içinde ilk yapım, bakım ve işletme maliyetlerini içeren ömür döngü modeli geliştirilmektedir. Alternatif üstyapıların maliyet tespitinde hem idarenin hem de kullanıcının maliyetleri saptanır. Ömür döngü maliyet analizinde, analiz süresi, analiz süresince yapılacak olan bakım, onarım ve rehabilitasyon işlemlerinin sıklığı ile idare ve kullanıcı maliyetlerinin tahmin edilmesi ve analiz süresi sonundaki üstyapı değeri tespit edilmektedir (FHWA,SC-DOT,2008).Şekil 2’de üstyapının analiz süresince ilk yapım ve bakım maliyetleri ile analiz sonundaki değeri gösterilmiştir.



Şekil 2. Projenin tipik ömür boyu maliyet diyagramı

Federal Karayolu idaresi -FHWA tüm üstyapı projeleri için analiz süresini 35 yıl olarak alınmasını tavsiye etmektedir. Analiz süresi, üstyapının tamamen yeniden yapılmasını gerektirdiği veya en fazla 10 yıllık bir ömrünün kaldığı süre olarak belirlenmektedir. Analiz süresince her bir üstyapı alternatifini belirli bir performans seviyesinde tutmak için gerekli bakım onarım işlemlerinin sıklığı Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Alternatif üstyapı tiplerinin hizmet seviyesi bakım ve onarım sıklığı

Amerika’da eyaletler bazında yapılan araştırmada asfalt ve beton üstyapılar için ömür döngü maliyet analizinde kullanmak üzere saptanan en az, ortalama ve en yüksek hizmet süreleri Tablo 2’ de verilmiştir (FHWA,SCDOT,2008). Bu tabloda verilen minimum ve maksimum sınırların ortalamadan sapması %75 ila %125 arasındadır.

Tablo 2. Asfalt ve beton üstyapının bakım gereksinim sıklığı,yıl

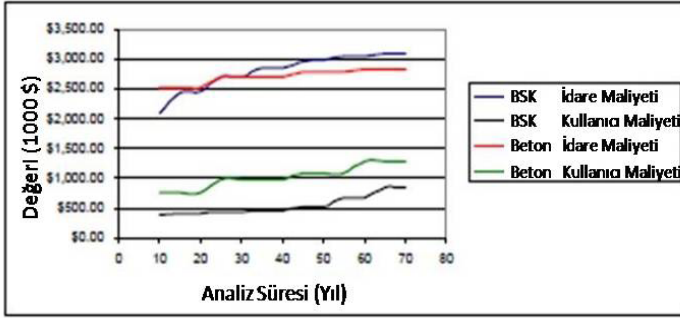
	Asfalt üstyapı			Beton üstyapı		
	En az	Ortalama	En fazla	En az	Ortalama	En fazla
İlk yapısal bakım, yıl	8* 12**	11* 15**	14* 18**	18	24	30
Periyodik yapısal bakım,yıl	8	11	14	8	11	14

* Klasik asfalt betonu ** Polimer modifiye bitümlü asfalt

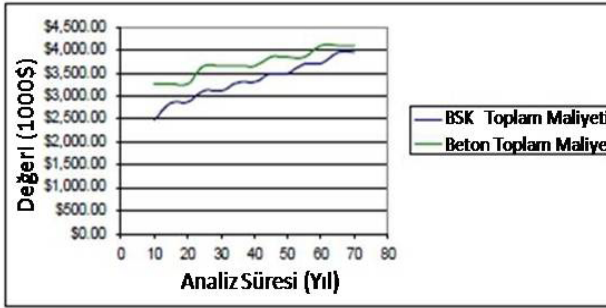
ABD Federal Karayolu İdaresi eyaletlerden toplanılan veriler doğrultusunda mevcut asfalt ve beton üstyapılarının yapımı ve bakımı ile kullanıcı maliyetlerini kapsayan bir ömür döngü maliyet analizi çalışması yapmıştır (FHWA SCDOT, 2008) .Bu çalışmada belirli bir hizmet kalitesi üzerindeki devlet yollarının 1 mili için ömür döngü maliyeti hesaplanmıştır.Hesaplamaya esas alınan bakım süreleri ile kullanıcı maliyetleri aşağıda verilmiştir:

- Ortalama ilk bakım süresi:
Asfalt üstyapı :10 yıl (standard sapma 3,1 yıl)
Beton üstyapı : 22 yıl (standard sapma 6,6 yıl)
- Ortalama bakım periyodları
Asfalt üstyapı:10 yıl (standard sapma 3,1 yıl)
Beton üstyapı : 18 yıl (standard sapma 4 yıl)
- Kullanıcı maliyetleri (Kullanıcının trafikte harcadığı zamanın bedeli)
Yolcu otobüsü: 17.00 \$/saat
Kamyon:35.00 \$/saat
Tır :36.50\$/saat

Analiz süresi 10 ila 70 yıl arasında yapılan hesaplamalarda %4 faiz oranı ile her iki alternatif üstyapının idareye ve kullanıcıya maliyeti saptanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4 ve Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 4. Üstyapıların farklı analiz sürelerinde idare ve kullanıcı maliyetleri



Şekil 5. Üstyapıların farklı analiz sürelerinde toplam maliyetleri

5 Amerika ve Bazı Avrupa Ülkelerinde Üstyapı Tipi

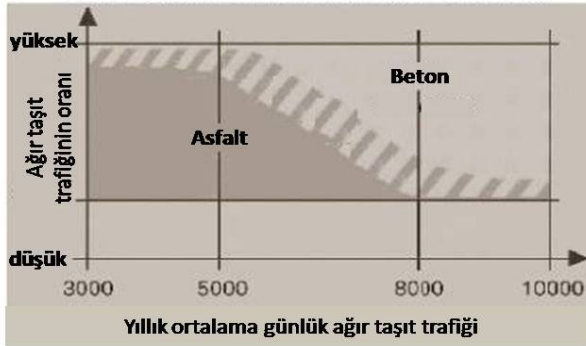
Amerika'da yayınlanan 2017 istatistiklerine göre (FHWA Highways Statistics,2017) şehir içi ve şehirlerarası kaplamalı yol ağı 2.780.090 km olup, bunun %83'ü asfalt % 6'sı beton, %11'i semi rijit (kompozit) üstyapı tipidir. Bu yol ağı kapsamında yer alan 17 849 km ottoyol ve ekspres yolun % 47'si asfalt, %30'u beton ve %23'ü kompozit üstyapı tipidir. Avrupa genelinde yolların %90'ı asfalt üstyapı (NAPA/EAPA,2011) ile yapılmış olup aşağıda bazı ülkelerin üstyapı tipi ve seçim yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir (FHWA, Office of International Program).

5.1 Almanya

12.500 km uzunluğundaki otoyol ağının %74'ü asfalt % 26'sı beton üstyapı ile teşkil edilen Almanya'da yeni bir otoyol yapımında veya yeniden yapım işleminde asfalt veya beton üstyapı tipleri için alternatif tekliflere izin verilmektedir. Genellikle ilk yapım maliyetine göre yapılan değerlendirmede beton üstyapının daha yüksek maliyetli olduğu saptanmıştır. Kamu özel işbirliği projelerinde yüklenici yolun yapımından ve 20-30 yıla kadar bakımından sorumlu olduğundan yolun ömür döngü maliyetini belirlenmesi ve üstyapı tipinin buna göre seçilmesi yüklenicinin yararına olmaktadır. Ayrıca DIN ISO 14040 standardı kapsamında alternatif üstyapıların çevresel etkilerini saptamak üzere ömür döngü analizleri yapılmaktadır.

5.2 Avusturya

14.000km uzunluğundaki otoyol ağının yüksek trafiğe maruz olan 6.500 km si beton üstyapı ile kaplıdır. 1980'li yıllarda geliştirilen asfalt teknolojilerine paralel olarak ömür döngü maliyet politikası geliştirilmiş yapılan incelemede beton üstyapıları daha pahalı ve tamirinin daha zor olduğu belirlenmiştir. 1990 yılı sonlarında farklı üstyapı tiplerinin ekonomik değerlendirilmesi için rehber doküman hazırlanmış ve uygulanması 2001 yılında mecburi olmuştur. Halen üstyapı tipi seçimi ömür döngü maliyet analizine göre yapılmakta ve genellikle Şekil 6'da verildiği gibi düşük hızlı ağır trafiğe maruz üstyapılarda beton üstyapı tercih edilmektedir.



Şekil 6. Düşük hızlı ağır trafiğin üstyapı tipi seçimine etkisi

5.3 Belçika

Belçika ve Fransa, Avrupa'da en çok beton üstyapı kullanan ülkelerdendir. Belçika'da otoyol ağı neredeyse tamamlanmış olduğundan, yeni otoyol inşaatı yerine mevcut beton üstyapıların bakım ve yenilenmesi yapılmaktadır. Çevre farkındalığının yüksek olduğu bu ülkede kaplamamın gürültü seviyesi ve malzemelerin geri dönüştürülebilirliği üstyapı tipi seçiminde

önemli faktörler arasındadır. Ömür döngü maliyet analizi büyük projelerde kullanılmaktadır. Otoyollarda asfalt ve beton üstyapıların ekonomik karşılaştırmasında asfaltın ilk yapım maliyeti daha düşük olmasına karşı 14 yıl üzerindeki analiz periyodu için otoyolda betonun maliyet etkinliğinin daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Belçika yol ağı 134.000 km olup, otoyol uzunluğu 1.700 km'dir. Otoyol ağının %40'ında ve toplam yol ağının ise %17'sinde beton üstyapı kullanılmıştır.

Üstyapı tipi seçiminde ekonomik faktörlerin yanı sıra tekerlek izi ve çatlağa karşı direnç, kayma direnci, gürültü, yüzey ve yer altı drenajı, trafik tıkanıklığı, yapım -bakım kolaylığı, dona karşı hassasiyeti ve kış bakımı gibi ekonomik olmayan faktörler de dikkate alınmaktadır.

5.4 Hollanda

113.000 km yol ağının % 4'ü, 2.300 km'si otoyolun ise %5' i beton üstyapı ile kaplıdır. Ayrıca 20.000 km'lik bisiklet yolunun %10 u beton ile yapılmıştır. Ülkede 1985'de yayımlanan gürültü düzenlemesi ile farklı tip üstyapıların gürültü seviyeleri değerlendirilmiş ve beton yolun gürültü düzeyi 3 Db daha yüksek bulunmuştur. 1980'lerde beton üstyapıların gürültü seviyesini düşürmek için beton üzerine poroz asfalt yapılmasına karar verilmiştir. Trafik hacmi yüksek olan, trafiğin kesilmesi veya yavaşlatılmasının sorun olduğu yol kesimlerinin uzun ömürlü üstyapılarla inşa edilmesine karar verilmiştir. Asfalt endüstrisi sınırlı finans kaynakları nedeniyle bakım masraflarını azaltmak üzere beton üstyapıya alternatif olarak uzun ömürlü asfalt üstyapı tipleri geliştirmiştir.

5.5 İngiltere

İngiltere'de 285.000 km yol ağının yaklaşık 1.500 km'si beton üstyapı ile yapılmıştır. İlk uygulamaları 1980'li yıllarda başlayan beton yolların üzeri 1990'lı yıllarının sonunda asfalt ile kaplanması için politika geliştirilmiştir. Bu politikanın en önemli nedenlerinden biri beton yolun gürültü seviyesinin yüksekliği olmuştur. Kamu özel sektör işbirliği projelerinde yüklenici üstyapı tipini seçebildiğinden riski olmak şartı ile 30 yıllık işletme süresinin sonunda 10 yıl daha hizmet verecek şekilde üstyapı tipini seçmesi istenmiştir. Müteahhit bu şartı sağlamak üzere 30 yıl sonunda yolu asfalt ile kaplayarak hizmet ömrünü 10 yıl daha uzatmayı taahhüt etmiştir.

6 Sonuç

Bu çalışmada karayolu idarelerinin esnek ve rijit üstyapı tipinin seçiminde asfalt ve beton sektörü arasındaki rekabet dikkate alınarak her bir proje için en uygun üstyapı alternatiflerini objektif olarak değerlendirmek ve seçmek üzere sistematik belirli bir yöntemin şeffaf olarak uygulanması gerektiği düşünüldükçe gelişmiş ülkelerde uygulanan üstyapı tipi seçim stratejileri ve sistemleri araştırılmıştır.

Bu amaçla Amerika Birleşik Devletlerinde yapılan çalışmalarda beton ve asfalt üstyapı tipinin seçimi ile ilgili kılavuz dokümanlar ve eyaletlerin uygulamaları incelenerek, genel olarak dikkate alınan faktörler ve uygulanan yöntemler belirlenmiştir. Ayrıca Amerika ve bazı Avrupa ülkelerinin beton ve asfalt üstyapı yol ağı ile ilgili bilgiler verilerek üstyapı tipi seçimine ilişkin politikaları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yolun kaplama, temel, alttemel tabakalarını içine alan, esnek/asfalt, rijit/beton ve semi rijit olmak üzere üç temel tipte inşa edilen yol üstyapısında, beton ve asfalt üstyapılar tasarımı, yapımı ve bakımı, çevresel etkileri ile önemli yapısal farklılıklara sahiptir.
- Üstyapı tipinin seçimi tamamen bilimsel olmamakla beraber idare, müşavir ve yükleniciler trafik, zemin, iklim, malzemeler, yapım, bakım ve çevre gibi değişen şartları dikkate alarak değerlendirme yapmaktadırlar. Seçim işlemi ampirik metodlarla tasarlanan alternatif üstyapı tiplerinin karşılaştırılmasıyla yapılmaktadır.
- Amerika Birleşik Devletlerinde AASHTO Üstyapı Dizayn Rehberi kapsamında verilen “Üstyapı Tipi Seçim Rehberi”ne göre üstyapı tipinin seçiminde dikkate alınan temel faktörler trafik, zemin özellikleri, hava şartları, yapım şartları, geri dönüşüm ve maliyet karşılaştırması olup, ikincil faktörler benzer üstyapıların performansı, yanındaki mevcut üstyapı tipi, malzemelerin ve enerjinin korunması, malzemelerin lokal olarak temin edilebilirliği ve müteahhit deneyim ve donanımı, trafik güvenliği, denenmiş üstyapılar, rekabetin teşviki, idarelerin tercihleri ve tercihlerin endüstri tarafından kabulüdür. Bu faktörlere paralel olarak çevresel duyarlılık kapsamında gürültü emisyonu ve sürdürülebilirlik ülkelerin üstyapı seçiminde dikkate aldığı en önemli faktörlerdir.
- Üstyapı tipinin seçim sistemi için politikalar idare, yüklenici, mühendis ve malzeme üreticilerinin ortak katkıları ile çok yönlü olarak geliştirilmektedir.
- Projede uygulanacak ihale tipine göre üstyapı seçimi tespit edilen yöntem ile idare veya yüklenici tarafından yapılabilmektedir. Yap-İşlet-Devret, Tasarla-Yap tipi ihale sistemlerinde yükleniciye üstyapı tipi seçme hakkı verilebilmektedir.
- İdareler öncelikle üstyapı alternatiflerini belirlemek için üstyapı yönetim sistemi ile performans verilerini toplamaktadırlar. Belirlenen alternatif üstyapıların ömür döngü maliyet analizlerini yaparak maliyetleri karşılaştırmaktadırlar. Belirli bir analiz periyodu için ilk yapım, bakım ve işletme maliyetlerinin yanı sıra üstyapıların nihai değeri ile ömür döngü maliyet modeli geliştirilmektedir. Alternatif üstyapıların maliyet tespitinde hem idarenin hem de kullanıcının maliyetleri dikkate alınmaktadır.
- Amerika’da eyaletlerin bakım işlemleri kapsamında yapılan araştırmada ortalama olarak asfalt üstyapıların ilk yapısal bakım gereksinimi 11 yıl (polimer modifiye bitümlü asfalt kullanıldığında 15 yıl) beton üstyapının ise 24 yıl olarak belirlenmiştir.
- Mevcut istatistiklere göre Amerika’da mevcut yolların % 83’ü asfalt % 6’sı beton %11’i semi rijit (kompozit) üstyapı tipidir. Avrupa’da ise yol ağının % 90’ı asfalt, %10 ‘u beton üstyapı ile kaplandığı tespit edilmiştir. Beton üstyapı genellikle ağır ve yüksek trafik hacmine sahip otoyollar da tercih edilmektedir.
- Karayolu idarelerinin esnek ve rijit üstyapı tipinin seçiminde asfalt ve beton sektörü arasındaki rekabeti dikkate alarak, her bir proje için en uygun üstyapı alternatiflerini objektif olarak değerlendirmek ve seçmek için sistematik belirli bir yöntemi şeffaf olarak uygulaması gerekmektedir.
- Ülkemizde tamamı asfalt yollar ile teşkil edilen karayollarına hizmet veren yükleniciler yolu alt yapısı, üstyapısı ve sanat yapıları ile bir bütün halinde üstlendiklerinden, mevcut stratejilere bağlı olarak asfalt işlerini yürütmek üzere gerekli deneyim ve donanıma sahip olmakla beraber, sistematik bir seçim sistemi ile beton üstyapının seçilmesi halinde, beton işlerini başarı ile yürütmek için gerekli kapasiteye sahiptirler. Karayoluna hizmet sunan tüm sektör temsilcilerinin amacı sınırlı kamu vergileri ile yollara yapılan yatırımların tam karşılığının halka hizmet olarak sunulmasının sağlanmasıdır.

Referanslar

- AASHTO,1993,Guide for The Design of Pavement Structures, Pavement Type Selection Guidelines published as Appendix B
- AASHTO,1993,Life Cycle Cost Analysis Survey
- AASHTO,2008, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice.
- FDOT, 2019, Pavement Type Selection Manual
- FHWA Office of International Program,Chapter 2: Pavement Selection Strategies
- FHWA, AASHTO, NCHRP, 2007, Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada
- FHWA, 2008, SCDOT Life Cycle Cost Analysis for pavement type selection
- FHWA, Highway Statistics 2017, Public road length - 2017 miles by type of surface and ownership/ functional system national summary
- KGM, 2008, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi
- NAPA & EAPA, 2011, The Asphalt Paving Industry A Global Perspective
- Prof.Dr.Mustafa Karaşahin, Karayolu Üstyapı Mühendisliğine Giriş
- TDOT, FHWA, 2009, Considerations for Rigid vs. Flexible pavement Designs when allowed as alternate bids: Technical report
- TRB, 2011, NCHRP Report 703, Guide for Pavement-Type Selection



1 BETON YOLLAR Kongresi ve Sergisi

13-14 Kasım 2019
KGM Halli Rifat Paşa Konferans Salonu, Ankara

I. GÜN - 13 KASIM 2019, Çarşamba

08.30-09.15	Kayıt	
09.30-10.45	Açılış Konuşmaları <i>Dr. Tamer Saka, TÇMB</i> <i>Nihat Özdemir, TÇMB</i> <i>Luc Rens, EUPAVE</i> <i>Abdulkadir Uraloğlu, KGM</i> <i>T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı</i>	
10.45-11.15	Sergi Açılışı ve Çay-Kahve Arası	
11.15-12.45	I. Oturum - Mücahit Arman, KGM Yol Pazarında Endüstriler Arası Rekabetin Yararları: İdareler Yol Proje Maliyetlerini Nasıl Azaltabilir, James Mack, ABD Beton Yol Yapımında Kalite Güvence ve Kalite Kontrol Süreçleri, Luc Rens, Belçika Ülkemiz Karayolları İçin Beton Yol Projelendirme Rehberi Çalışmaları ve Beton Sınıfına Bağlı Beton Plak Kalınlıkları, S. Kaşak, M. Komut, Ş. Altıok	
	12.45-14.00	Öğle Yemeği
	14.00-15.30	II. Oturum - Emine Açar, İTÜ Beton Yol Takviyesi: Başarılı Bir Yapım ve Kullanım İçin Önemli Hususlar, Mark Snyder, ABD Beton Yollarda Sürüş Konforu, Erwin Kohler, Şili Yansıma Çatlaklı Oluşumu Açısından Kompozit Bir Üstyapının Performansının Belirlenmesi, Y. Abut
15.30-15.50		Çay-Kahve Arası
15.50-17.05		III. Oturum - Mustafa Yurt, İnşaat Mühendisi ABD'de Silindire Sıkıştırılmış Beton Yol Yapımındaki Son Gelişmeler, Corey Zollinger, ABD Silindire Sıkıştırılmış Beton (SSB) ve Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Yolların Teknik ve Ekonomik Analizi, B. Akbelen, İ. Ö. Yaman T.C. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi Yol Yapım Bakım ve Onarım Dairesi Başkanlığı Beton Yol Uygulamaları, S. Özkan, S. E. Ünverdi, O. D. Tiryaki
	19.30-22.00	Gala Yemeği, Ankara HiltonSA



II. GÜN - 14 KASIM 2019, Perşembe

09.00-10.30	IV. Oturum - Mehmet Tutaş, KGM
	Polonya'nın Beton Yollardaki Deneyimleri, <i>Jan Deja, Polonya</i>
	Belçika'nın 50 Yıllık Beton Yol Tecrübesi, <i>Pierre Nigro, Belçika</i>
	Karayolları Genel Müdürlüğü Ağındaki Beton Deneme Yolların Performans Değerlendirmesi, <i>M. Komut, E. N. Ünal, Ş. Altok</i>
10.30-10.50	Çay-Kahve Arası
10.50-12.40	V. Oturum - Şenol Altok, KGM
	Tünelde Beton Kaplamalar: Belçika'daki Bazı Vaka Çalışmalarına Dayanan Faydalar, Tasarım ve Yapım Kuralları, <i>Anne Beeldens, Belçika</i>
	Alman Yönetmeliklerine Göre Beton Yolların Bakımı, <i>Tim Alte-Teigeler, Almanya</i>
	Kayarkalıplı Sericilerle Çift Tabakalı Beton Yol Yapımı, <i>Alessandro Bernacchia, İtalya</i>
Sürdürülebilir Karayolu Üstyapı Kaplamaları İçin Çatlaksız, Dayanıklı ve Sünek Beton Tasarımı, <i>M. Şahmaran</i>	
12.40-13.45	Öğle Yemeği
13.45-15.20	VI. Oturum - Gençağa Karakaş, KGM
	Beton Bariyerler, <i>Martin Page, Fransa</i>
	New Jersey Tipi Beton Bariyerlerin Tasarımında Çarpma Şiddetini (ASI) Etkileyen Şekil Faktörlerinin Tespit Edilmesi, <i>S. Özcanan, A. O. Atahan</i>
	Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Geçirimli Beton Uygulamaları: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Merkez Yerleşkesi Örneği, <i>B. Akbelen, M. Uslu, İ. Ö. Yaman</i>
Doğu Karadeniz Bölgesindeki Beton Yollarının Düşey Deplasmanlarının Hızlandırılmış Yol Testinde İncelenmesi, <i>M. Çelik, M.T. Seferoğlu, M. V. Akpınar</i>	
15.20-15.40	Çay-Kahve Arası
15.40-17.00	VII. Oturum - İ. Özgür Yaman, ODTÜ
	Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, <i>A. Cömert, E. Bayrak, A. Ünsal</i>
	Kalsiyum Alümina Çimentolu Beton Yol Uygulamaları, <i>M. Severoğlu, M. Sucu, T. Delibaş</i>
	Beton Yol İmalatında Kimyasal Katkıların Rolü ve Etkileri, <i>A. Çankayalı, E. Karataş, O. Tezel, S. Sarıkaya</i>
Uçucu Kül ve Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Beton Yol Karışımlarının Basınç Dayanımı ve Durabilitesine Olan Etkilerinin Araştırılması, <i>F. Acıkök, O. Canpolat, M. Uysal, Y. Aygörmez</i>	
17.00-17.15	Kapanış ve Değerlendirme

