

Open Access Journal  
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)

Cilt 7 - Sayı 6: 1155-1162 / Kasım 2024

(Volume 7 - Issue 6: 1155-1162 / November 2024)

## MEKANİSTİK-AMPİRİK TASARIM YAKLAŞIMIYLA SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON YOL PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ: ANKARA TEMELLİ YOLU ÖRNEĞİ

Emin ŞENGÜN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, 06010, Ankara, Türkiye

**Özet:** Sağladığı uzun dönemli ekonomik kazançlar ve hızlı trafiğe açılması gibi avantajları sayesinde Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) yol teknolojisi, ülkemizde belediye uygulamaları da dahil edildiğinde 5.000 km'yi aştığı tahmin edilmektedir. Ancak halen çoğunlukla geleneksel katalog sistemi ile tasarımlar yapılmakta ve çevresel koşullar, iklim, zemin, malzeme ve trafik koşulları yeterince dikkate alınmamaktadır. Bunun sonucunda da bazı uygulamalarda uzun dönemli öngörülemeyen performans düşüşleri yaşanabilmektedir. Bu çalışma ile Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'nın öncülüğünde, kullanımı her geçen gün artan yeni nesil mekanistik-ampirik (M-E) üstyapı yaklaşımı ile Ankara ili Polatlı ilçesine bağlı Temelli mevki Çokören- Babayakup köyleri arasında SSB Yolu tekrardan tasarlanmış ve gerçek saha SSB yol performansı ile program modellemesi tahminleri karşılaştırılmıştır. Sonuç, M-E yaklaşımının geleneksel tasarım yöntemlerine göre daha gerçekçi tahmin yapabildiği yönündedir. Bu tasarım yöntemi, bu uygulama özelinde derz bırakılmaması ve ince kalınlık tasarımı yapılması gibi tasarımsal kararların uzun dönemli üstyapı performansını nasıl etkilediğini göstermiş ve servis süresi boyunca daha etkin ve daha ekonomik (uzun dönemli) tasarımlar optimize etmiştir. Bu çalışmanın nihai amacı ise SSB yol uygulamaları için ülkemiz özelinde yerel malzeme ve iklim koşulların dahil edildiği ve mevcut SSB yol uygulamaları ile kalibre edilecek bir M-E esaslı üstyapı tasarım programının hayata geçirilmesine öncülük etmesidir.

**Anahtar kelimeler:** Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) kaplama, Üstyapı tasarımı, Mekanistik-ampirik üstyapı tasarımı

### Performance Assessment of the Roller Compacted Concrete Pavement with Mechanistic-Empirical Design Approach: A Case Study of Ankara Temelli Road

**Abstract:** Due to its long-term economic benefits and rapid opening to traffic, Roller Compacted Concrete (RCC) pavement technology has been widely implemented across Türkiye, with applications exceeding 5,000 km, including municipal projects. However, designs are predominantly based on traditional catalog systems, often neglecting critical factors such as environmental conditions, climate, soil, materials, and traffic loadings. Consequently, some applications experience unforeseen long-term performance issues. In this study, the RCC road design between Çokören and Babayakup villages in the Temelli district of Polatlı, Ankara, was evaluated using the mechanistic-empirical (M-E) pavement approach, which has been pioneered and increasingly adopted by the USA and Canada. The actual field performance of the RCC road was compared with predictions from the M-E modeling. The findings indicate that the M-E approach provides significantly more realistic predictions compared to traditional design methods. This approach demonstrated how specific design decisions, such as omitting joints and opting for thinner pavement thicknesses, impact long-term pavement performance, thereby optimizing more efficient and economical (long-term) designs throughout the service life. The ultimate goal of this study is to pave the way for the development of an M-E-based pavement design program tailored to Türkiye's local materials and climate conditions, calibrated with existing RCC road applications.

**Keywords:** Roller Compacted Concrete (RCC) pavement, Pavement design, Mechanistic-empirical design approach

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, 06010, Ankara, Türkiye

E mail: esengun@aybu.edu.tr (E. ŞENGÜN)

Emin ŞENGÜN



<https://orcid.org/0000-0001-7082-0061>

Gönderi: 26 Ağustos 2024

Kabul: 30 Eylül 2024

Yayınlanma: 15 Kasım 2024

Received: August 26, 2024

Accepted: September 30, 2024

Published: November 15, 2024

**Cite as:** Şengün E. 2024. Performance assessment of the roller compacted concrete pavement with mechanistic-empirical design approach: a case study of Ankara Temelli road. BSJ Eng Sci, 7(6): 1155-1162.

### 1. Giriş

Özel bir rijit kaplama türü olan Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) yol teknolojisi, isminden de anlaşılacağı üzere kuru katı kıvamı ile taze halde iken ağır vibrasyonlu çelik tambur ve lastik tekerlekli silindirleri taşıyarak betonun sıkıştırılmasına ve son şeklinin verilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özel beton yol teknolojisi sıkıştırma ve serim yöntemi ile geleneksel

esnek (asfalt) yollara benzerlik gösterirken, sahip olduğu aynı malzeme içeriğinden (çimento, su ve ince ve kaba agregalar) dolayı bir beton yol türü olarak sayılmaktadır (Harrington ve ark., 2010). Bu hibrid beton yol teknolojisi geleneksel asfalt ve beton yolların avantajlarını bir arada tutmasından dolayı her geçen gün kullanımı artmaktadır. Asfalt yollara benzer biçimde sahip olduğu kuru katı kıvamıyla herhangi bir kalıp vb.



ekipmana ihtiyaç duyulmadan serilip sıkıştırılarak hızlı bir şekilde trafiğe açılabilmesinin yanı sıra geleneksel beton yol gibi uzun ömürlü ve ağır tonajlı tekrarlı trafik yüklerine karşı dayanıklı olması en önemli avantajları arasında sayılmaktadır. Asfalt kaplama malzemesine kıyasıyla çimento, su ve agregalardan oluşan malzeme içeriğiyle, ham madde arzında konjektürel gelişmelerden az etkilenmesi ve ayrıca geleneksel beton yollardan da daha az çimento ve suya ihtiyaç duyması da sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan bir avantaj teşkil etmektedir (Akbelen ve ark., 2023). Bununla birlikte daha iyi sıkıştırılması ve sıkı bir matrisin elde edilmesi için daha fazla ince agrega kombinasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bu zamana kadar SSB tasarım karışımı ve oranlamalarının, SSB mekanik performansına etkileri üzerine oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Diğer taraftan SSB yol teknolojisinde daha fazla üzerinde durulması ve araştırılması gereken bazı başlıklar bulunmaktadır. Bunların başında uzun dönemli yapısal ve durabilite performanslarının tahmini gelmektedir. Ayrıca gerek malzeme karışım tasarımlarında gerekse kalınlık yapısal tasarımlarında halihazırda kullanılan yaklaşımların çoğunlukla geleneksel yöntem ve metotlara bağlı olarak korumacı kalması, bu alanların da araştırmacılar tarafından tekrar irdelenmesini gerektirmektedir (Abdo, 2023).

İlk olarak, 1970'li yıllarının başında yapılan başarılı uygulamalar ile Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri'nde SSB yol teknolojisinin tanınırlığı başlamış olsa da sağlamış olduğu avantajların yanı sıra gelişen yüksek sıkıştırma teknolojisine sahip sericilerin de piyasada yer almaya başlaması ile son yıllarda popülerliği daha da artmıştır.

Ülkemizde ise ilk SSB yol uygulamaları Antalya (2009), Denizli (2011), Samsun (2014) ve Tekirdağ (2016) Büyükşehir Belediyeleri ile il özel idarilerinin girişimleri ile başlamış ve 2023 yılı sonu itibarıyla ülkemizde SSB yol uygulaması 55 farklı ilde 5.000 km<sup>2</sup>'yi geçmiştir. Bu sayılarla dünya genelinde geniş ölçekli SSB yol uygulamalarının gerçekleştirildiği birkaç ülkeden biri konumuna gelmemize rağmen, mevcut uygulamalarda SSB yapısal tasarımlarının halen geleneksel yöntemlerle (katalog tasarımı) yapıldığı ve çoğu zaman yerel zemin, iklim ve uzun dönemli trafik koşullarının yeterince dikkate alınmadan benzer kalınlıkların kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada lokasyon bilgilerinin Şekil 1'de görüldüğü, Ankara Büyükşehir Belediyesi yol ağında bulunan Ankara ili Polatlı ilçesine bağlı Temelli mevki Çokören-Babayakup köyleri arasında yaklaşık 8,6 km'lik SSB Yol uygulaması ele alınmıştır. 2018 yılında inşa edilen SSB Yol iki şeritli olarak 8 m genişlikle inşa edilmiş ve yapısal kalınlık tasarımı geleneksel yöntemlerle yapılmıştır.



Şekil 1 Ankara Temelli SSB Yol uygulamasına ait lokasyon.

Bu çalışmanın amacı, geleneksel yöntemlerle yapısal kalınlık tasarımı yapılan bu SSB Yol uygulamasının son yıllarda ABD ve Kanada'da popülerliği artan yeni nesil mekanistik-ampirik (M-E) üstyapı tasarım yaklaşımı ile yeniden tasarlanıp uzun dönemli performans tahminlerinin yapılmasıdır. Bu amaçla, ilk olarak mevcut yola ait tasarım bilgileri derlenerek, ABD'de geliştirilen M-E üstyapı rehberinin (AASHTO, 2015) esas alındığı AASHTOWare Pavement M-E Design Software (PMED) Ver. 2.6 sonlu elemanlar programı ile tekrar analizi yapılmış ve otuz yıllık servis süresi boyunca çatlak, faylanma ve yüzey düzgünlüğü açısından performans tahminleri hesaplanmıştır. Bu tahminlerin saha ölçümleri ile ne derecede eşleştiğinin gözlemlenebilmesi adına, gerçek saha performanslarıyla karşılaştırılmalar yapılmıştır. Ayrıca Temelli SSB yolunun servis süresi boyunca yeterli performansı göstermesi için tasarım parametrelerinin optimizasyonu da bu çalışma kapsamında yapılmış ve böylece, optimum üstyapı yapısal tasarımı ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın bir diğer önemli amacı ise SSB Yol uygulamalarında öncü ülkelerinden biri konumundaki ülkemize ait bir tasarım metodolojisinin geliştirilmesine ve bunu takip edecek yerel kalibrasyon çalışmalarına öncülük etmesidir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında ilk olarak Ankara Polatlı ilçesine bağlı Temelli mevki Çokören- Babayakup köyleri arasında 8,6 km'lik SSB yol uygulamasına ait tasarım parametreleri Türkçimento ve yüklenici firma yetkililerinden alınarak Tablo 1'de derlenmiştir. 120m<sup>3</sup>/saat kapasite ile üretilen beton, tandem çalışan 2 finişer (serici) ile eş zamanlı olarak yola serilmiştir. Sıkıştırma işlemi için çelik tamburlu ve lastik tekerlekli silindirler kullanılmıştır. SSB yol inşaa aşamasına ait görseller Şekil 2'de görülmektedir. Kür uygulaması sırasında TS 10966 standardına göre 0,35 lt/m<sup>2</sup>'lik kimyasal kür uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu SSB yol uygulaması sırasında derz bırakılmamıştır.

**Tablo 1.** Mevcut Temelli SSB yol uygulamasına ait tasarım parametreleri

SSB Yol Uygulaması Geometrik Tasarım Parametreleri
Yol lokasyonu: Çokören- Babayakup köyleri arası kırsal yol
Yol uzunluğu: 8600 m
Yol genişliği: 8 m
SSB Yol Uygulaması Trafik Tasarım Parametreleri
Trafik: Tek yönde 325 adet 42 ton yüklü kamyon trafiği
SSB Yol Kesiti
SSB kaplama: 17 cm
Plentmiks Temel (PTM): 20 cm
Derz uygulaması: Yok
SSB malzeme karışım oranlaması
Çimento: 350 kg/m <sup>3</sup>
Su: 109 kg/m <sup>3</sup>
Toplam Agregası: 2025 kg/m <sup>3</sup>
Yoğunluk: 2484 kg/m <sup>3</sup>

Kalite kontrol testleri kapsamında, sahada TS 1900-1 standardına göre kum konisi testi-uygulanmasının yanı sıra ASTM D6938 standardı da takip edilerek nükleer metot yöntemi ile sıkıştırma kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sahadan alınan beton örnekleri ASTM C1435 standardına göre titreşimli tokmak ile küp numuneler halinde sıkıştırılmıştır. TS EN 12390-3'e göre laboratuvarında 28 günlük hedef dayanım sınıfı olan C30/37 üzeri dayanımlar elde edilerek kalite kontrol testleri gerçekleştirilmiştir. SSB yol 24 saat içinde master ile düzgünlük kontrollü sonrası trafiğe açılmıştır.



**Şekil 2.** Temelli SSB yol inşasına ait fotoğraflar.

SSB yol uygulamasına ait tasarım parametrelerinin derlenmesinin ardından geleneksel yaklaşımlarla belirlenen kalınlıkların halihazırındaki iklim ve zemin koşulları altında ne derecede performans gösterebileceğinin belirlenmesi için AASHTOWare PMED sonlu eleman programı ile tekrar analizi yapılmıştır. Otuz yıllık servis süresi boyunca çatlak, faylanma ve yüzey

düzensizliği açısından performans tahminleri hesaplanması Bölüm 3'te ele alınarak performans tahminlerinin saha ölçümleri ile ne derece eşleştiğinin gözlemlenebilmesi adına gerçek saha performanslarıyla karşılaştırılmalar yapılmıştır.

## 3. Bulgular

### 3.1. M-E Yaklaşımla Performans Analizleri ve Gerçek Saha Performansı

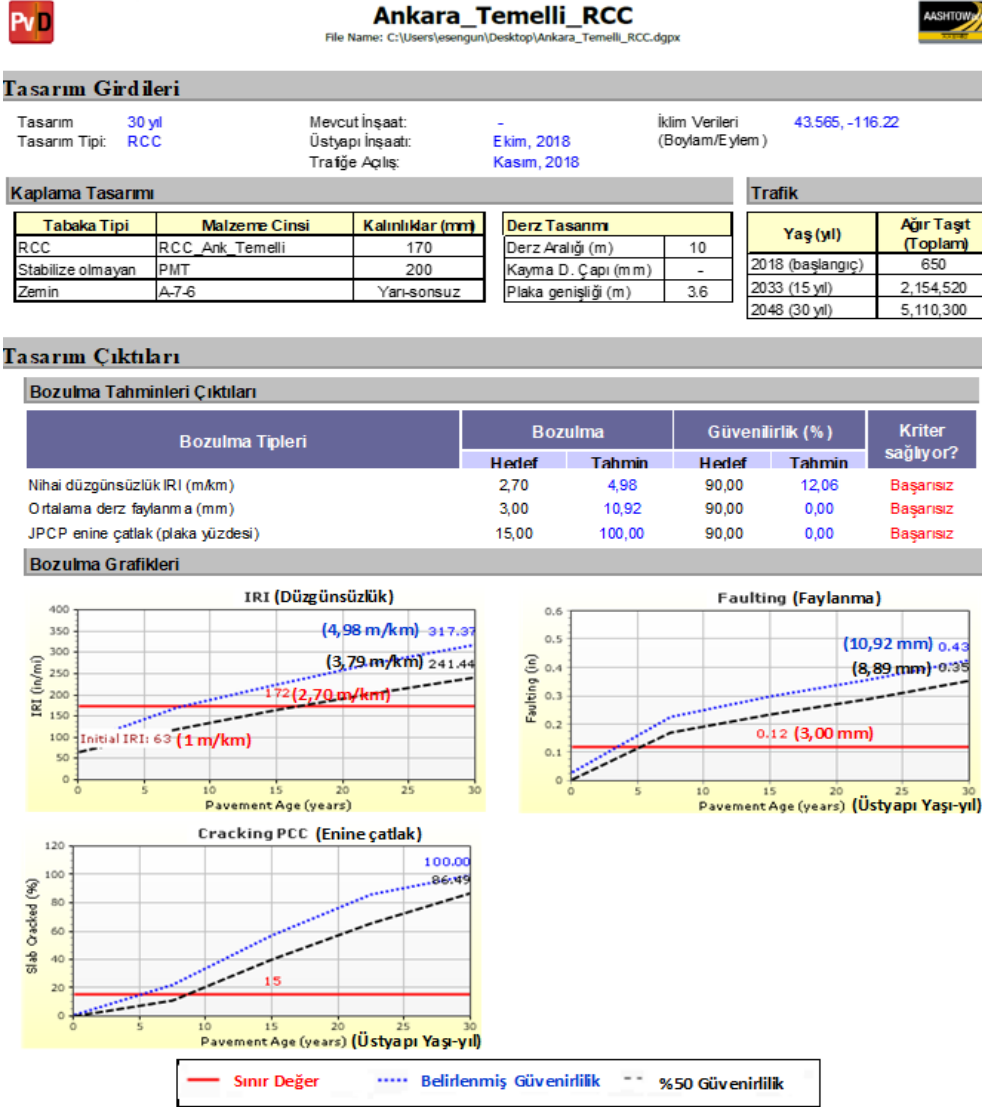
Yeni nesil M-E üstyapı tasarım rehberi, geleneksel yöntemlerinin malzeme, trafik yükü ve iklim gibi parametrelerin doğrudan kullanılmaması gibi kısıtlamaları içermesinden dolayı, yol üstyapılarının daha gerçekçi olarak tasarlanabilmesi adına ilk olarak ABD ve Kanada'da geliştirilmiş ve zamanla diğer ülkeler tarafından kullanılmaya başlamıştır (Islam ve ark., 2023; Öztürk ve ark., 2019). Bu yeni nesil üstyapı M-E tasarım yaklaşımının mekanik kısmını (M) trafik yüklerine ve çevresel koşullara bağlı olarak üstyapıda meydana gelecek gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyon hesaplamaları oluştururken, bu mekanik büyüklüklerin güvenilirlik katsayıları da göz önüne alınarak ampirik bozulma transfer fonksiyonlarına bağlı olarak çatlak, faylanma ve düzensizlik gibi üstyapı performansını etkileyen parametrelere dönüştürülmesi ve zamana göre tahmin edilebilmesi de tasarımın ampirik kısmını (E) oluşturmaktadır. Bundan dolayı tasarımın ampirik kısmını oluşturan üstyapıda meydana gelecek bozulmaların tahmin edilebilmesi için mevcut daha önceki üstyapı tecrübe ve gözlemlerine de dayanarak programın yerel kalibrasyonun yapılması, tasarımın daha gerçekçi sonuç vermesi ve bozulma tahminlerinin daha doğru yapabilmesi adına oldukça önemlidir (Sengun ve ark., 2020). Her ne kadar M-E üstyapı rehberinin (AASHTO, 2015) esas alındığı AASHTOWare PMED sonlu eleman programı bu özel beton yol türü olan SSB'ler için özelleştirilmediğinden dolayı dersiz, donatısız geleneksel beton yol gibi tasarlanırsa da yine de SSB tasarımında bu programın kullanımı Federal Amerikan Karayolları Birliği (FHWA) tarafından önerilmektedir (FHWA-HIF-16-003, 2016). Sengun (2024) tarafından yapılan çalışmada ise mevcut ABD'deki SSB yolların AASHTOWare PMED sonlu elemanlar programıyla yeniden analizi yapıldığında, hesaplanan performans tahminlerinin bir dereceye kadar gerçek saha tahminleri ile örtüştüğü görülmüştür (Sengun, 2024).

Çalışmanın ilk aşamasında, Temelli mevki Çokören-Babayakup köyleri arasındaki geleneksel yöntemlerle (katalog) tasarımı yapılan mevcut SSB yolu, M-E esaslı AASHTOWare PMED programı ile yeniden tasarlanarak servis süresi boyunca çatlak, faylanma ve yüzey düzensizliği açısından performans tahminleri hesaplanmıştır. Bunun için ilk olarak güzergâha ait iklim verilerinin programa tanıtılması gerekmektedir. Ancak programda sadece ABD ve Kanada hava istasyonlarına ait iklim verileri girdilerine izin vermesinden dolayı, güzergâh iklimi; yıllık ortalama hava sıcaklığı, yıllık ortalama yağış miktarı, don indeksi ve yıllık ortalama

donma/çözülme döngüsü sayısı esas alınarak ABD'deki en yakın hava istasyonu ile eşleştirilmiştir. Buna göre güzergâh iklimi verileri ile ABD Idaho City'e ait Boise Airport Hava İstasyonu iklim verileri önemli benzerlikler gösterdiği için modellemede bu iklim verileri kullanılarak devam edilmiştir.

Şekil 3'ten de görüldüğü üzere modelleme sonucu mevcut SSB yolunun servis ömründen daha önce çatlak, faylanma ve yüzey düzgünsüzlüğü açısından sınır değerleri aşacağı tahmin edilmektedir. Özellikle çatlak performansı açısından modelleme, SSB inşaatının beş ile on yıl arasında sınır değerleri aşacağını göstermektedir.

Bunun en önemli sebebi ise inşa edildiği yıllarda yaygın bir uygulama olan SSB yol inşaatı sırasında derz uygulamasının yapılmamasıdır. Ancak son yıllarda gerek ABD'de gerekse ülkemizde derz bırakılmasının çatlak kontrolü ve yol üstyapı performansı açısından daha olumlu sonuçlar doğurduğu görülerek, bu uygulamalardan çoğunlukla vazgeçilmiştir. Burada belirtilmesi gereken önemli bir nokta AASHTOWare PMED sonlu elemanlar programında derz bırakılmaması opsiyonuna izin vermemesi nedeniyle bu modellemede maksimum derz aralığı olan 10 m (30 ft) seçilmesidir.



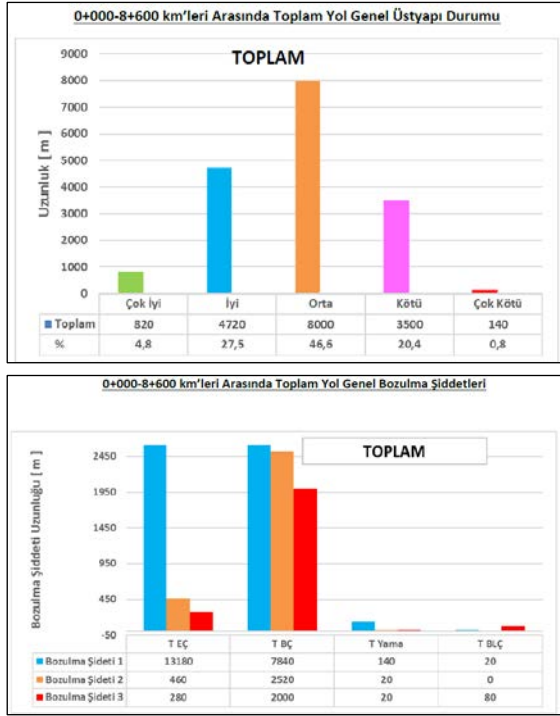
Şekil 3. Mevcut SSB yolu için AASHTOWare PMED modelleme çıktıları (Türkçeye ve metrik sisteme çevrilmiş hali).

Nitekim mevcut Temelli mevki Çokören- Babayakup köyleri arası SSB yolu inşa edilmesinin ardından iki yıl sonra 14.08.2020- 20.08.2020 tarihleri arasında 8,6 km boyunca yol ve çevresi 20 m aralıklara bölünerek yol üstyapısında meydana gelen bozulmalar, bozulma tipleri, şiddeti ve yoğunluğu AASHTO 93 tasarım rehberine göre belirlenerek, yolun iniş ve çıkış eğimleri, yarma/dolgu durumu, zemin sınıfı ve mevcut drenaj sistemleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir (Geopave-tcmb\_2020/08-02,

2020). Değerlendirmeler, 2 şerit için de ayrı ayrı yapılarak sağ ve sol şerit olmak üzere bozulma şiddet ve yoğunlukları belirlenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda gözlemlenen toplam yol genel üstyapı durumu Şekil 4-a' da, bozulma tipleri ve bozulma şiddetleri Şekil 4-b' de verilmiştir. Burada; EÇ: enine çatlak- yolun merkez aksına dik ve dike yakın açılarla kesişen çatlaklar, BÇ: boyuna çatlak- yolun merkez aksına paralel uzanan çatlaklar, Yama:



mevcut kaplamanın farklı malzemelerle değiştirilmesi, BLÇ: blok çatlak-beton yüzeyinin yaklaşık olarak dikdörtgen parçalara bölünmesini ifade etmektedir. Bozulma şiddeti 1 çatlakların 1 mm'den ince, bozulma şiddeti 2 çatlakların 1 ile 3 mm arasında olmasını ve bozulma şiddeti 3 çatlakların genişliklerinin 3 mm'yi aşması ile bazı kopmaların oluşmaya başlaması olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 4.** Mevcut SSB yoluna ait inşasından iki yıl sonraki üstyapı durumunun değerlendirilmesi (a) SSB yol genel üstyapı durumu(b) SSB yol bozulma şiddeti (Rapor No: GEOPAVE-TCMB\_2020/08-02' den uyarlanmıştır).

Şekil 4-a' dan görüldüğü üzere yapılan saha tetkikleri sonrasında mevcut SSB yolun yaklaşık %21'lik kısmının kötü seviyede olduğu görülmekte ve bu kısmın önemli bir kısmı ise Şekil 4-b'den anlaşıldığı üzere boyuna çatlaklar oluşturmaktadır. Enine çatlaklar ise daha çok bozulma şiddeti 1 seviyesinde gözlemlenmiştir. Şekil 5'te saha gözlemleri sırasında çekilen çatlaklara ait bazı görseller sunulmaktadır. Saha gözlemlerinin AASHTOWare PMED performans çıktıları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Performans çıktılarında da Şekil 3'ten görüldüğü üzere inşaatın ilk on yılı içerisinde çatlak yüzdesi bakımından mevcut SSB yolun limit değerleri (%15'lik çatlak yüzdesi) aşacağı tahmini yapılmaktadır.



**Şekil 5.** Sahada gözlemlenen mevcut SSB yola ait çatlak

görselleri (Rapor No: GEOPAVE-TCMB\_2020/08-02' den uyarlanmıştır).

Saha inceleme ekibi tarafından vurgulanan diğer bir ayrıntı ise Babayakup'dan Çokören yönünde sağ şeritte bulunan bozulmaların şiddet ve yoğunluklarının sol şeritte göre daha yüksek olduğudur ki bu durum sağ yolda ağır yüklü araçların yoğun olarak kullanılması ile yarmada bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Babayakup'dan fabrika çıkışına kadar taş ocağından yüklü kamyonlar sağ şeridi kullanmakta, yüksüz kamyon yönü ise yol boyunca Babayakup'dan Çokören yönünde sol şerit boyunca akmaktadır.

Mevcut SSB yola ait üstyapı performansını olumsuz olarak etkilenen bir diğer etmenin ise zemin formasyonu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yapılan zemin tahkiklerinde kayaç zemin ve Ankara killi zemin olarak iki formasyonun etkin olduğu ve çatlak yüzdelere zemin tiplerine göre değişiklik gösterdiği raporlanmış ve ayrıca drenaj sisteminin yetersiz olmasının da üstyapı performansını önemli ölçüde etkilediği vurgulanmıştır.

Aynı ekip tarafından 27.04.2022 yılında yapılan saha tetkikleri sırasında da boyuna ve enine çatlak oluşumu ile blok çatlaklar olmak üzere üç farklı bozulma türünün hâkim olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca SSB kaplamasında kireçtaşı agrega kullanılmasından ötürü, cıalanmalar görülmüş ve yüksek ağır trafik koşullarında özellikle yağışlı mevsimlerde yolun kayma dayanımını artırmak için yüzeyin pürüzlendirilmesi tavsiye edilmiştir.

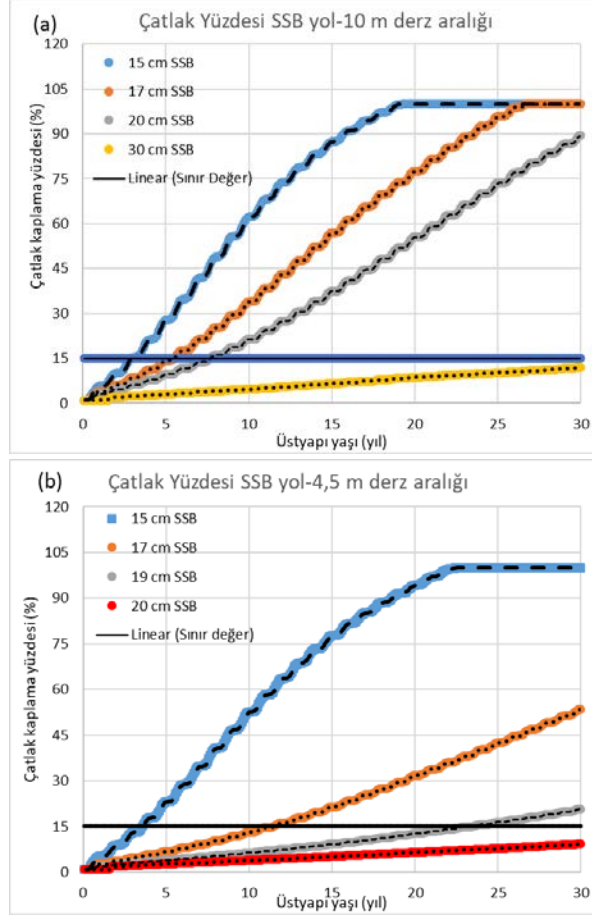
### 3.2. M-E Yaklaşımla Mevcut SSB Yol Optimizasyonu ve Duyarlılık Analizi

Çalışmanın ikinci aşamasında, Temelli mevki SSB yolunun servis süresi boyunca yeterli performansı göstermesi adına AASHTOWare PMED sonlu elemanlar programı ile tasarım parametrelerin optimizasyonu yapılarak, optimum üstyapı yapısal tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada program performans parametresi olarak sadece çatlak yüzdesi alınmıştır. Bunun sebebi yüzey düzgünlüğünün diğer parametrelere göre saha uygulamasından daha fazla etkilenmesi ve bu nedenle gerçekçi olarak tahmin edilmesinde zorluk yaşanmasıdır. Faylanma parametresinin ise mevcut yolun derz bırakılmadan inşa edilmesi nedeniyle göz ardı edilebilmesidir.

AASHTOWare PMED sonlu elemanlar programı tarafından yapılan optimizasyon çalışmasında, mevcut SSB yolu farklı kalınlıklar için tekrar modellemeleri yapılarak, enine çatlak yüzdesinin servis süresi boyunca sınır değerinin altında kalacak yapısal tasarımın bulunması amaçlanmıştır (Şekil 6).

Yapılan yeni modellemeler ile SSB'nin kalınlığı artııkça çatlak yüzdesinde düştüğü görülmüş ve minimum 30 cm'lik bir kalınlıkta SSB yolun servis süresi boyunca çatlak performansı açısından sınır değerler altında kalacağı program tarafından tahmin edilmiştir (Şekil 6-a). İkinci bir alternatif olarak eğer bu mevcut SSB yol günümüzde hem ABD'de hem de bazı son uygulamalar ile Türkiye'de artık yaygınca uygulanan şekilde yaklaşık 4,5 m'lik derz aralıkları ile inşa edilmiş olsaydı Şekil 6-b'den

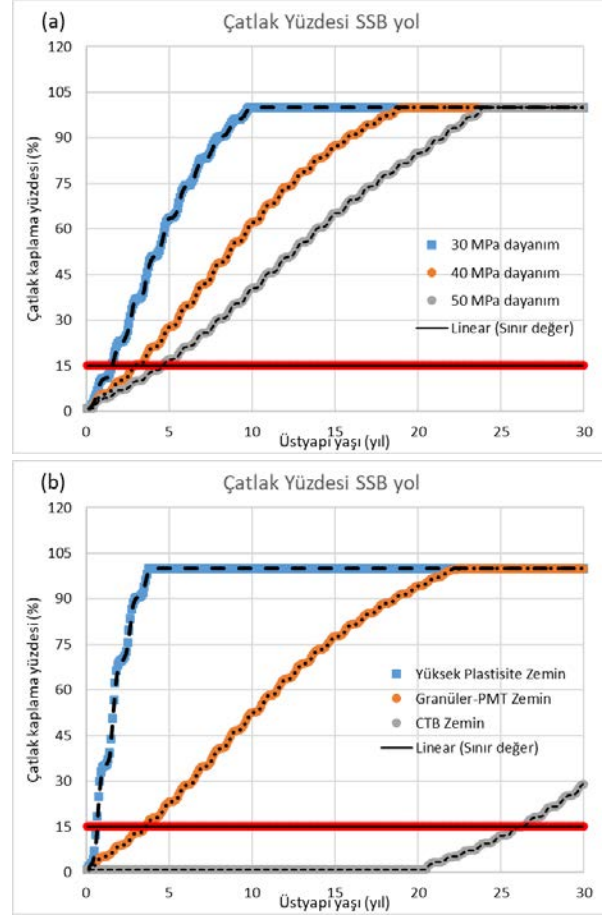
görülebileceği üzere 20 cm'lik bir kalınlığın yeterli olacağını göstermektedir ki bu da ilk opsiyona göre %50 da az kalınlık demektir. Buradan da SSB yol tasarımların derz aralıklarına karşı oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu örnekte olduğu gibi bu yöntemle farklı alternatifler geliştirilerek uzun dönemli daha ekonomik tasarımlar yapılabilmektedir.



Şekil 6. Mevcut SSB yolu farklı kalınlıklar ve (a)-10 m, (b)-4,5 m derz aralıkları için servis süresi boyunca çatlak performans tahmini.

AASHTOWare PMED sonlu elemanlar programına göre, SSB yapısal yol tasarımına etki eden diğer önemli bir parametrenin ise beton dayanımı olduğu Şekil 7-a'da görülmektedir. SSB dayanımı yol çatlak performansını oldukça etkilemektedir. Burada unutulmaması gereken husus mevcut SSB yol tasarım verileri ve kalınlıkları sabit bırakılmış ve sadece SSB beton dayanımı ve malzeme içeriği programda değiştirilmiştir.

Daha önceki analizlerde de vurgulandığı üzere kalınlığın yetersiz olması ve derz bırakılmaması dolayısıyla mevcut yol 30 MPa'lık dayanımda ilk on yılı içerisinde sınır değerleri aşacaktır. Nitekim gerçek saha tetkikleri de bu tahmini doğrulamıştır. Alternatif olarak her şeyin sabit bırakılarak sadece beton dayanımının artırılması çatlak yüzdelerini önemli bir ölçüde azaltmasına rağmen yine de mevcut SSB yolda derz bırakılmaması ve kalınlık yetersizliğinden dolayı inşaatın ilk on yılı içinde çatlak sınır değerlerini aşacağı görülmektedir.



Şekil 7. (a) Farklı beton dayanımları ve (b) temel tiplerinin mevcut SSB yol performansına etkisi

SSB yapısal yol tasarımına etki eden diğer bir parametre ise SSB altındaki temel türünün olduğu Şekil 7-b'den anlaşılmaktadır. Yüksek plastisiteli temel (A-7-6 sınıfı), granüler PMT temel (mevcut temel) ve çimento stabilizasyonlu temel (13500 MPa elastisite modülü) olmak üzere üç farklı temel tipine karşılık SSB yolun servis süresi boyunca çatlak performansı incelendiğinde, zemin tiplerinin üstyapı çatlak performansını ciddi derece etkilediği görülmektedir. Eğer mevcut SSB yolun tüm tasarım parametreleri sabit bırakılarak zemin tipinin granüler temel yerine çimento stabilizasyonlu temelin yapılmış olması özellikle kamyon trafiğinden kaynaklı çatlakları önemli bir miktarda azaltacağı öngörülmektedir. Diğer taraftan yapısal inşaat temelleri için uygun olmayan yüksek plastisiteli (A-7-6 sınıfı) bir zemin temel olarak seçildiğinde ise Şekil 7-b'den görüldüğü üzere yol ilk birkaç yıl içinde tamamen çatlama dolayısıyla işletim ömrünü tamamlayacaktır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Hızlı imal edilebilmesi, erken trafiğe açılması, az bakım onarım gerektirmesi ve ekonomik olması gibi sağlamış olduğu avantajlardan dolayı SSB yol teknoloji ülkemize hızlı bir şekilde adapte olmuş ve 2023 Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verilerine göre SSB yol kullanımı kırsal alanlarda 1.000 km'yi geçmiştir (T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Bu

sayıya belediyeler tarafından yapılan uygulamalar da eklenince 5.000 km'yi geçmektedir. Diğer taraftan halen büyük ölçekli olarak geleneksel katalog tasarımı kullanılmakta olup proje özelinde değişiklik gösterecek çevresel, iklim, zemin, malzeme ve trafik koşulları yeterince dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte, özellikle ABD'de ve Kanada'da yeni nesil mekanistik-ampirik (M-E) üstyapı tasarım yaklaşımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Bu yeni nesil üstyapı tasarımında çevresel iklim etkileri, zemin koşulları, malzeme parametreleri ve trafik verileri yerel şartlara göre kalibre edilebilir transfer fonksiyonlarına bağlı olarak çatlak, faylanma ve düzgünlük gibi üstyapı bozulmalarına dönüştürülebilmekte ve uzun dönemli performans tahminleri yapılabilmektedir. Bu çalışmanın amacı ise Türkiye özelinde Ankara Büyükşehir Belediyesi yol ağında bulunan Ankara ili Polatlı ilçesine bağlı Temelli mevki Çokören- Babayakup köyleri arasında yaklaşık 8,6 km'lik geleneksel yöntemlerle yapısal kalınlık tasarımı yapılan SSB Yol uygulamasının, M-E yaklaşımı ile yeniden tasarımın yapılarak uzun dönemli tahminlerinin yapılması ve gerçek saha performansları ile karşılaştırılmasıdır. Ayrıca bu çalışma kapsamında mevcut SSB yolun tasarımında kullanılan parametrelerin çatlak performansına ne derecede etkili oldukları duyarlılık analizleri yapılarak görülmüş ve tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir.

•Çatlak performansı açısından M-E esaslı AASHTOWare PMED modellemesi, mevcut SSB yolun beş ile on yıl arasında sınır değerleri aşacağını göstermektedir. Bunun en önemli sebebi ise SSB yol uygulaması sırasında derz uygulamasının yapılmamasıdır. Nitekim saha gözlemleri ile bu tahmin doğrulanmıştır.

•Alternatif olarak eğer bu mevcut SSB yol günümüzde ABD'de yaygınca kullanılan 4,5 m'lik derz aralıkları ile inşa edilmiş olsaydı 20 cm'lik bir kalınlıkla (mevcut 17 cm) 30 yıllık servis süresi boyunca çatlak performansı açısından sınır değerler altında kalacağı tahmin edilmektedir.

•Duyarlılık analizlerinde derz aralıklarının yanı sıra, beton dayanımın ve temel tipinin de SSB yol tasarımında etkili olduğu görülmüştür.

•Her şeyden öte tüm İnşaat Mühendisliği uygulamalarında olduğu gibi yol uygulamalarında da işçilik ve saha uygulamaları üstyapı performansını etkileyen en kritik unsur olmuştur. Saha gözlemlerinden yetersiz drenaj uygulamalarının üstyapı performansını oldukça düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma M-E esaslı bir yaklaşımın SSB üstyapı tasarımını daha gerçekçi bir şekilde modelleyebileceğini ve uzun dönemli performans tahminlerini yapabileceğini göstermiştir. Bu şekilde tasarım sürecinde alınan birçok kararın uzun dönemli üstyapı performansına yansımaları görülebilecektir. Ancak kullanılan program ABD menşeli olduğu için kalibrasyon katsayıları (mevcut derzli donatısız beton yol performanslarına göre) o ülke koşullarına göre

belirlenmiştir ki bu da tahmin etme becerisini hem SSB özelinde hem de Türkiye özelinde düşürmektedir. Ayrıca ticari bir ürün olması nedeniyle dönemlik kullanım ücretleri oldukça yüksektir. Bu çalışmanın uzun dönemli amacı ise SSB yol uygulamaları için ülkemiz özelinde yerel malzeme ve iklim koşulların dahil edilerek, bozulma tahminlerinin daha iyi yapılabilmesi adına mevcut SSB yol uygulamaları ile kalibre edilecek bir M-E esaslı üstyapı tasarım programının hayata geçirilmesi ve kullanıma sunulmasıdır.

### Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	E.Ş.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

### Çalışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

### Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

### Destek ve Teşekkür Beyanı

Yazar, bu çalışmada kullanılan AASHTOWare PMED programı için kullanım izni sağlayan Iowa State Üniversitesine ve Prof. Dr. Halil Ceylan'a, teşekkür eder.

### Kaynaklar

- AASHTO. 2015. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide- A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials Publication, Washington, USA, 2nd ed., pp: 218.
- Abdo F. 2023. A comprehensive approach to maximize the benefits of RCC pavements. In: 14th International Symposium on Concrete Roads (Concrete Roads 2023), June 25-28, Krakow, Poland, pp: 142.
- Akbelen B, Yılmaz MC, Gungor AG, Yaman IO. 2023. Initial Construction Cost Comparison of Roller Compacted Concrete

- (RCC) and Hot-Mix Asphalt (HMA) Pavements Used in the Turkish Local Road Network. 14th International Symposium on Concrete Roads (Concrete Roads 2023), June 25-28, Krakow, Poland, pp: 54.
- FHWA-HIF-16-003. 2016. Tech Brief: Roller-Compacted Concrete Pavement. Federal Highway Administration. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16003.pdf> (accessed date: June 23, 2024).
- Geopave. 2020. Rapor: Çokören – Babayakup Köy Yolu Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Üstyapı İnceleme ve Değerlendirme İşi. Rapor No: GEOPAVE-TCMB\_2020/08-02, Ankara, Türkiye, pp: 35.
- Harrington D, Abdo, F, Adaska W, Hazaree CV, Ceylan H, Bektas F. 2010. Guide for roller-compacted concrete pavements. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa, USA, 1st ed., pp: 104.
- Islam S, Hossain M, Jones C, Gao Y, Wu X, Romanoschi S. 2023. Implementation of the AASHTO Mechanistic-Empirical Design Guide (AASHTOWare Pavement ME Design) for Pavement Rehabilitation. Report No: FHWA-KS-23-01. URL: <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/66641> (accessed date: June 10, 2024).
- Öztürk HI, Tan EB, Şengün E, Yaman İÖ. 2019. Farklı trafik, zemin, malzeme ve iklim koşulları için mekanistik-ampirik (M-E) yöntemle tasarlanan derzli donatısız rijit üstyapı sistemlerinin karşılaştırılması. Gazi Üniv Müh Mim Fak Derg, 34(2): 771-784.
- Sengun E. 2024. Evaluating the performance AASHTOWare's mechanistic-empirical approach for roller-compacted concrete roadways. Comput Concrete, 33:(4), 445-469.
- Sengun E, Ozturk HI, Yaman IO. 2020. Mekanistik-ampirik ve geleneksel beton yol tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması: Afyon-Emirdağ deneme kesimi. J Turk Chamb Civ Eng, 31(5): 10251-10274.
- T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2023. Resmi İstatistik.URL:<https://webdosya.csb.gov.tr/db/yerelyonetimler/icerikler/01-2023-koy-yollar-resm---statst-k--20240302101240.pdf> (accessed date: August 25, 2024).