



ESNEK ÜSTYAPILARDA KALICI DEFORMASYON VE YORULMAYA BAĞLI MEKANİSTİK BİR MODELLEME VE DUYARLILIK ANALİZİ

¹Fatma ÇARKANAT , ²Sinem BOZATLI , ³Yavuz ABUT 

Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE
fatmacarkanat@gmail.com, sinem.bozatli@yalova.edu.tr, yavuz.abut@yalova.edu.tr

(Geliş/Received: 17.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 21.05.2022)

ÖZ: Esnek üstyapı tasarım metodlarından olan ampirik yöntemler büyük ölçüde yol testlerine dayanmaktadır. Fakat mekanistik-ampirik tasarım yönteminde belirli faktörler göz önünde bulundurularak ortamın çevresel ve fiziki şartları hesaba katılarak bölgeden geçen araç trafiğinin sebep olduğu gerilme, deformasyon ve deplasmanlar ve bunun sonucunda da kaplamada oluşan yorulma düzensizlikleri, tekerlek izleri, termal çatlaklar göz önüne alınır, üstyapı kalınlıkları belirlenir ve o yol için gerekli servis ömrünün bulunması hedeflenir. Bu çalışmada, esnek üstyapı tasarımında mekanistik-ampirik bir metodu kullanan KENPAVE yazılımına, Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde bulunan tasarım kombinasyonlarından birkaç senaryo girilerek yolun servis ömrünün tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, elastik ve tabakalı bir kaplama sistemi tanımlandıktan sonra, asfalt tabaka alt noktasındaki yatay çekme gerilmesinin neden olduğu yorulma ve taban zemini üst noktasında düşey basınç gerilmesinin neden olduğu tekerlek izi deformasyonuna ait hasar modelleri programa girilmiştir. İkinci aşamada AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım parametreleri olan trafik kategorisi, toplam mevcut SN değeri, taban zemini- M_R (Esneklik Modülü) değerlerinin servis ömrüne etkileri, duyarlılık analizi yapılarak irdelenmiştir. Karar değişkenlerinin servis ömrü üzerindeki duyarlılıkları göz önüne alındığında dingil yükü sayısı ve taban zemini- M_R etkisinin %95 güven aralığında anlamlı olduğu ve dingil yükü sayısının, servis ömrünü taban zemini- M_R 'a göre daha çok etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Esneklik modülü, Mekanistik-ampirik Tasarım, Asfalt yollar, Servis ömrü, Kalıcı deformasyon, Yorulma

A Mechanistic Modeling and Sensitivity Analysis Based on Permanent Deformation and Fatigue for Flexible Pavements

ABSTRACT: Empirical approaches, one of the flexible pavement design methods, are largely based on road tests. However, in the mechanistic-empirical design method, certain factors such as environmental and physical conditions of the road are estimated and the stress, deformation or deflections caused by the vehicles, as a result of which fatigue distress, rutting or thermal cracks in the pavement are taken into account. It is aimed to find the required service life for the road by determining the pavement thickness. In this study, the main purpose is to estimate the service life of the road by entering a few scenarios from the design combinations taken from the General Directorate of Highways, Project Guide of Flexible Pavements to KENPAVE software, which uses a mechanistic-empirical method for design of flexible pavements. Afterwards, the effects of AASHTO 93 flexible pavement design parameters such as traffic category, total SN value, subgrade- M_R (Modulus of Elasticity) values on service life were analyzed by performing sensitivity analysis. Considering the sensitivity of the decision variables on the service life, it was determined that the effect of the number of axle loads and the subgrade- M_R were significant in the

95% confidence interval, and the number of axle loads affected the service life more than the subgrade- M_R .

Keywords: *Modulus of elasticity, Mechanistic-empirical design, Asphalt roads, Service life, Permanent deformation, Fatigue*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizde artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte ağır taşıt trafiği artış göstermekte ve bu faktörler yol yapısında bozulmaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, ülkemizin dağlık ve engebeli coğrafi yapısının olması ve farklı iklim özelliklerinin bulunması sebebiyle, artan dingil yükleri pek çok yol kusurlarını ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla günümüzde faal olarak hizmet veren karayolu ağının bakım ve onarımlarının zamanında ve en efektif bir şekilde yapılması mecburiyet haline gelmektedir (Hanlı, 2009). Bir ülkenin ekonomisinin olumsuz etkilenmesinin önüne geçmek için mevcut karayolu ağını sık tekrarlar yenilemek yerine, faaliyette olan yol güzergahlarının bozulma nedenlerini öngörerek tasarlamak önemlidir. Yol üstyapısının projelendirilmesindeki amaç, proje süresi boyunca üstyapının üzerinden geçen trafiği, büyük deformasyonlara ve çatlamalara uğramadan, güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapı kalınlıklarının belirlenmesi ve kullanılacak malzemelerin özelliklerinin tespit edilmesidir.

Karayolu üstyapı tasarımındaki çalışmalar, ampirik ya da mekanistik yöntemlere dayanmaktadır (Singh and Sahoo, 2021). Ampirik tasarım, deneylerin veya geçmiş tecrübelerin sonuçlarına dayanan bir yaklaşımdır. Kaplamayı oluşturan yapı malzemelerinin mühendislik özellikleri ve elastisite teorileri kullanılarak modellenebilen üstyapının herhangi bir noktasındaki trafik veya çevresel etkilere bağlı oluşan gerilme, şekil değiştirme ve deformasyonlar ampirik metotlarla her zaman tahmin edilemeyebilir. Bu sebeple ampirik deney sonuçlarının, performans gözlemleri ve analitik bağıntularla kalibrasyonu gereklidir. Bu zorunluluk analitik-ampirik yöntemlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Tasarım parametreleri ile üstyapı hasar modeli arasındaki ilişki, kullanılan deney yöntemi veya her ikisinin bir kombinasyonu yoluyla planlanan yaklaşım, tasarımda seçilecek yöntemi belirlemektedir. Mekanistik yaklaşım, analiz için malzeme parametrelerinin yol yapısına yakın ve olabildiğince benzer ortam koşullarında belirlenmesini sağlar. Dolayısıyla bu yaklaşım, üstyapı modelinin elastik veya visko-elastik temsiline dayanmaktadır (NCHRP, 2004). Mekanistik tasarımda gerilme, şekil değiştirme veya plastik deformasyon analizine dayalı olarak malzeme kalitesinin yanı sıra yeterli kaplama tabakası kalınlığının kontrolü sağlanır. Analiz ayrıca üstyapı tasarımcısının kaplama ömrünü bir miktar kesinlik ile tahmin etmesine olanak tanımaktadır. Gelişmekte olan ülkelerin çoğunda üstyapı tasarımı birtakım hasar modelleri, jeolojik veya geoteknik tasarım, inşaat ve bakım problemlerinin herhangi birine veya bunların kombinasyonuna dayanmaktadır (Ekwulo, 2009).

Esnek üstyapılarda kaplama hasarı, asfalt tabaka altındaki yatay çekme gerilmesinin veya taban zemini üzerindeki düşey basınç gerilmesinin neden olduğu yorulma çatlakları veya tekerlek izi deformasyonundan kaynaklandığı genel olarak bilinmektedir. Asfalt kaplama tasarımında bu kritik gerilme ve deformasyonların araştırılması ve bu parametreler göz önüne alınarak tasarım yapılması gerekmektedir. Birçok gelişmiş ülkede üstyapı tasarımında mekanistik yaklaşımın kullanımına yönelik çalışmalar olmasına rağmen, ülkemizde bu tarz tasarım yöntemlerinin kullanımı sınırlıdır.

Ülkemizde asfalt kaplamalı yollar büyük ölçüde AASHTO 93 deneysel yol denklemini baz alan Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'ne göre tasarlanmaktadır (KGM, 2008). Ampirik yöntemlere göre tasarlanıp inşa edilen bu yollarda, AASHTO 93 tasarım yönteminin öngördüğü 20 yıllık servis ömrünü doldurmadan deformasyon, çatlak veya çukur oluşumu gözlemlenebilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün verileri ile asfalt kaplamalarda bakım onarım maliyetlerinin baz alındığı bir çalışmada, esnek üstyapı hasarlarının tamamına yakınının oluşumunda, tasarım parametrelerinden malzeme faktörünün baskın bir şekilde etkili olduğu bildirilmiştir (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017). Ayrıca havaalanı kaplamaları için de yeniden kaplama veya rehabilitasyon, bakım maliyetlerinin hesaplanmasında

mekanistik-ampirik tasarım yöntemlerin daha efektif ve gerçekçi sonuçlar ortaya çıkardığı bildirilmiştir (Kaya, 2020). Bu nedenle deformasyonların sebeplerini öğrenmek, tatbik edilen tasarımın güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlamak, tasarım parametrelerinin duyarlılıklarını belirlemek ve servis ömrü açısından daha gerçekçi tahminler elde edebilmek için analitik-ampirik ve mekanistik-ampirik yöntemlerin mukayeseli olarak değerlendirilmesi daha rasyonel sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, esnek üstyapı tasarımında mekanistik-ampirik bir metodu kullanan KENPAVE yazılımına, Karayolları Genel Müdürlüğü, Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi'nde bulunan tasarım kombinasyonlarından birkaç senaryo girilerek, yolun gerçek servis ömrünün tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, KENPAVE yazılımına elastik ve tabakalı bir kaplama sistemi tanımlandıktan sonra, asfalt tabaka alt noktasındaki yatay çekme gerilmesinin neden olduğu yorulma çatlakları ve taban zemininde meydana gelen kalıcı deformasyona ait hasar modelleri programa girilmiştir. Bunun yanında AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım parametreleri olan trafik kategorisi, toplam mevcut SN değeri, taban zemini- M_R (Esneklik Modülü) değerlerinin proje ömrüne etkileri duyarlılık analizi yapılarak irdelenmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde ampirik bir tasarım olan AASHTO 93 tasarımı ile mekanistik-ampirik tasarımların proje ömürleri mukayeseli olarak karşılaştırılmıştır.

ESNEK ÜSTYAPI TASARIM YÖNTEMLERİ (METHODS OF FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN)

Esnek üstyapı, ham petrolün damıtılması ile elde edilen bitümlü bağlayıcı, ince ve iri granüler malzemelerden oluşturulan kaplama tabakasıdır. Kaplama yüzeyi, üzerine etki eden trafik yükü nedeniyle ortaya çıkan toplam sehim zemine yansıtılabildiği için Esnek üstyapı olarak adlandırılır. Dolayısıyla esnek üstyapı tasarımı, katmanlı bir sistemin yük dağıtma özelliklerine dayanmaktadır. Bitümlü bağlayıcı, daha çok viskoz yapısı nedeniyle önemli ölçüde plastik deformasyona izin verebilen bir yapıdadır. Esnek üstyapılar, uygulandığı sıcaklığa bağlı olarak sıcak, ılık veya soğuk karışım asfalt olarak inşa edilirler. Yolun toprak işlerinin bitmesinden sonra oluşan tesviye yüzeyi ile temas halinde olan ve trafiğin yüklemiş olduğu ağırlığı, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yoluyla taban zeminine farklı gerilmelerle ulaştıran üstyapı çeşididir (İlcalı *ve diğ.*, 2001). Esnek üstyapı tasarım yöntemleri; ampirik, analitik-ampirik ve mekanistik-ampirik yöntemlerden oluşmaktadır.

Ampirik Yöntemler (Empirical Methods)

Ampirik bir tasarım yaklaşımı, yalnızca deneylerin veya deneyimin sonuçlarına dayalı olan yaklaşımdır (Carvalho, 2006). 1960'lı yıllara dayanan AASHTO Yol Testleri, bir diğer adıyla ampirik AASHTO yöntemleri günümüzde de en yaygın kullanılan kaplama tasarım yöntemleridir. AASHTO tasarım denklemi, eşdeğer dingil yükü tekrür sayısı, trafik yükü ve çevresel faktörler ile ilişkilendirilmektedir (Carvalho, 2006, Huang, 2004).

Analitik-Ampirik Yöntemler (Analytical-Empirical Methods)

Analitik-ampirik yöntemlerde, ampirik denklemler ve gözlemler sonucunda daha gerçekçi yaklaşımlar elde edilmesi amaçlanmıştır. AASHTO 86 esnek üstyapı tasarım yöntemi, AASHTO 93 esnek üstyapı tasarım yöntemi ve Asfalt Enstitüsü yöntemi analitik-ampirik yöntemler arasında girmektedir (Göktolga, 1998). AASHTO 93 üstyapı tasarım rehberinde bulunan yol formülü Denklem 1'de verilmiştir.

$$\log T_{8,2} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{0,40 + \left[\frac{1094}{(SN+1)^{5,19}} \right]} + 2,32 \cdot \log M_R - 8,07 \quad (1)$$

Burada;

$T_{8,2}$: Eşdeğer tek dingil (8,2 ton) tekrür sayısı

Z_R : Standart normal sapma

S_0 : Toplam standart sapma

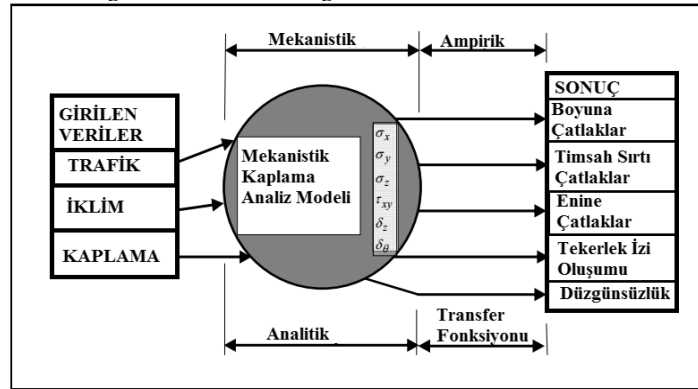
SN: Üstyapı sayısı (inç)

ΔPSI : Servis kabiliyetindeki azalma miktarı ($P_0 - P_T$)

M_r: Taban zemini esneklik modülü (psi)

Mekanistik-Ampirik Tasarım Yöntemleri (Mechanistic-Empirical Design Methods)

Mekanistik-ampirik yöntemler ampirik yöntemlerden bir adım ileriye temsil eder. Trafik yüklemesi ve çevresel koşullar nedeniyle bir esnek üstyapıda gerilmelerin neden olduğu durum, “mekanistik teori” kullanılarak öngörülmektedir (NCHRP, 2004). Mekanistik-ampirik üstyapı tasarım rehberi, ABD’ de NCHRP (Ulusal Karayolları Birliği Araştırma Programı) tarafından 2002 yılında geliştirilen Mekanistik-ampirik Üstyapı Tasarım Kılavuzunun (MEPDG) amacı, kaplama yapılarındaki gerilmelerin fiziksel nedenlerini belirlemek ve bunları gözlemlenen kaplama performansı ile ölçmektir. Şekil 1’de mekanistik-ampirik üstyapı tasarım metodu girdi ve sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 1. Mekanistik-Ampirik üstyapı tasarım metodu (Coree vd. 2005)

Figure 1. Method of Mechanistic-Empirical pavement design (Coree et al. 2005)

NCHRP 2004 rehberi, karayolu üstyapılarının tasarlanması ve değerlendirilmesi için hazırlanan mekanistik-ampirik bir yöntemi içerir. Yapısal tepkiler (gerilmeler, şekil değiştirmeler ve deformasyonlar) malzeme özelliklerine, çevresel koşullara ve yükleme özelliklerine göre mekanistik olarak hesaplanır. Bu yöntemde projelendirme; tasarım aşamaları, girdi, analiz ve çıktılardan oluşmaktadır. Veri girişinde üç seviye bulunmaktadır. Birinci seviyede deneysel veriler ve ölçümler kullanılır (esneklik modülü, trafik verileri vb.). İkinci seviye girdiler, deney ve ölçümlere dayanmakla birlikte diğer parametrelerle ampirik korelasyonlar yoluyla elde edilir (örneğin, CBR değerlerinden tahmin edilen esneklik modülü). Üçüncü seviye girdiler, malzeme türüne veya yol sınıfına göre ulusal veya bölgesel varsayılan değerlerden oluşan bir veri tabanından seçilir (örneğin, esneklik modülü aralığını belirlemek için zemin sınıflandırması, araç sınıfı dağılımını belirlemek için yol sınıfı seçimi vb.). Üst yapı modellenmesi için bilgisayar programları kullanılarak gerilme, deformasyon ve deplasmanlar hesaplanır. Üstyapı modelinin kurulmasında genellikle Çok Katmanlı Elastik Teori (MLET) veya Sonlu Elemanlar Yöntemleri (FEM) gibi döngü içeren yöntemler kullanılmaktadır. Analiz sonucunda başlangıçta kabul edilen kriterler sağlanmıyorsa ilk girilen değerler değiştirilerek işlem tekrar edilir. Kriterler sağlanıyorsa bir sonraki aşamaya geçilir ve üstyapı tipi ve kalınlıkları için yaşam döngüsü maliyet analizi yapılarak tasarım sonlandırılır (NCHRP, 2004).

ELASTİK KATMANLI SİSTEM (ELASTIC LAYERED SYSTEM)

Üstyapı tabakaları ile tekerlek yükü ilişkisinin tahmin yöntemlerinden biri de Wetergaard'ın rijit üstyapıları tepkisini modellemek için geliştirdiği elastik katmanlı teoridir (Westergaard, 1926). Üstyapıların iyi derecelendirilmiş doğal zemin üzerine oturan çeşitli tabakalardan (beton, asfalt, granüler temel, alt temel vb.) oluşan katmanlı bir sistem olarak modellenmesinin en gerçekçi sonuçları verdiği kabul edilmektedir. Böyle bir sistemin davranışı, klasik elastisite teorisi kullanılarak da analiz edilebilir (Burmister, 1945).

Elastik katmanlı analiz, kaplama tepkilerini (gerilme ve şekil değiştirme) belirleme yeteneğine sahip mekanistik bir prosedürdür ve başlıca varsayımlar;

- i) Kaplama yapısı, malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışı ile elde edilen Esneklik (Young) Modülü (E) ve Poisson oranı (μ) ile karakterize edildiği lineer elastik çok katmanlı bir sistem olarak kabul edilir.
- ii) Alt katman hariç, her katmanın sonlu bir kalınlığı vardır ve tümü yatay yönde sonsuzdur.
- iii) Tekerlek yüklemesi (P), dairesel bir alan üzerinde üniform olarak dağılmış bir dikey gerilme ile düşey olarak temsil edilebilir.

HASAR MODELLERİ İLE BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM (COMPUTER AIDED DESIGN WITH DAMAGE MODELS)

Yang H. Huang tarafından geliştirilen bir yazılım olan KENPAVE kullanılarak esnek ve rijit kaplamalar, elastik katmanlı teoriye göre lineer veya nonlineer olarak analiz edilebilmektedir. Ayrıca yazılım, Burmister'in çoklu tabaka modeline dayanan ve elastik teori konseptini baz alan sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır (Huang, 2004). Genel olarak bu yöntemin kullanılma amacı, tüm yük grupları için her periyotta yorulma çatlağı ve tekerlek izi deformasyonunun neden olduğu hasarlara karşı, servis ömrünün her aşamada değerlendirilmesidir. KENPAVE yazılımı son yıllarda, dayanıklı üstyapı tasarımı, zemin deformasyonlarının tespiti, geogrid sistemlerin değerlendirilmesi, yaşam döngüsü maliyet analizi gibi farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; rijit kaplamalarda tekerlek özellikleri ve dingil yükü konfigürasyonlarını araştırmak için parametrik bir çalışma (Patel ve diğ., 2022), geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (RAP) içeren çimento ile güçlendirilmiş temel kaplamalarının yaşam döngüsü maliyeti analizi (Bressi ve diğ., 2022), yaşam döngüsü maliyeti ve sera gazı emisyonları açısından kaplamaların karşılaştırılması (Kulkarni ve Ranadive, 2022), sıcak ve ılık karışım asfalt kaplamalarının arazi ve laboratuvarındaki tekerlek izi davranışı (Alimohammadi ve diğ., 2020), iklim değişikliğinin neden olduğu sel etkisi dikkate alınarak dayanıklı üstyapı tasarımı (Chan ve Wang, 2020), gömülü boruları korumak için genleşmiş polistiren (EPS) blok geogrid sisteminin deneysel değerlendirmesi (Azizian ve diğ., 2020) örnek olarak verilebilir.

Asfalt kaplamaların servis ömrünü etkileyen iki tür gerilmenin görece daha kritik olduğu düşünülmektedir. Bunlardan biri, asfalt tabakanın altında yorulma çatlamasına neden olan eksenel çekme gerilmesi, diğeri ise taban zeminindeki kalıcı deformasyona ait basınç gerilmesidir (Huang, 2004). Yorulma ve tekerlek izi modelleri için kullanılan eşitlikler Denklem 2 ve Denklem 3'te verilmektedir (Asphalt Institute, 1982).

Yorulma çatlağı için bozulma kriteri şu şekilde ifade edilmektedir;

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3} \quad (2)$$

N_f ; yorulma çatlağını önlemek için izin verilen dingil yükü tekrarı sayısı, ϵ_t ; asfalt tabakasının altındaki çekme birim şekil değiştirmesi, E_1 ; asfalt tabakasının esneklik modülü, f_1 , f_2 ve f_3 yorulma deneylerinden belirlenen sabitlerdir. Asfalt Enstitüsü, analitik tabanlı tasarım prosedürlerinde denklemde ifade edildiği üzere f_1 , f_2 ve f_3 için sırasıyla 0,0796, 3,291 ve 0,854 kullanılmasını önermektedir (Huang, 2004).

Kalıcı deformasyon için bozulma kriteri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$N_d = f_4(\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3)$$

N_d ; tekerlek izi deformasyonunu sınırlandırmak için izin verilen dingil yükü tekrarı sayısı, ϵ_c ; taban zemini üstündeki eksenel birim şekil değiştirme miktarı, f_4 ve f_5 yol testlerinden veya saha performansından kaynaklanan sabitler olup sırasıyla Asfalt Enstitüsü tarafından $1,365 \times 10^{-9}$ ve 4,477 olarak verilmektedir (Huang, 2004).

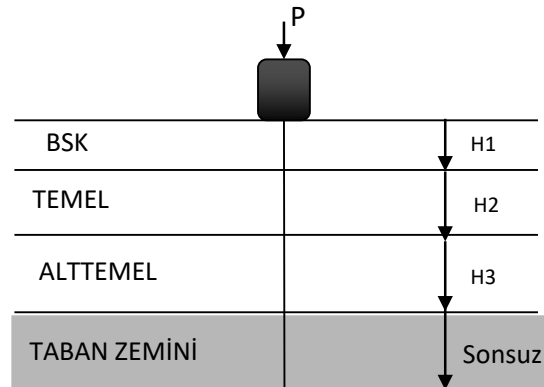
MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, KGM (2008) tasarım yöntemi baz alınarak %95 güvenilirlik düzeyinde, üç farklı trafik kategorisi (düşük, orta, yüksek) ve üç farklı taban zemini taşıma gücü (düşük, orta, yüksek) olmak üzere toplamda dokuz farklı durum seçilerek muhtemel senaryolar belirlenmiştir. Belirlenen kategorilerden alınan 20 yıllık trafik verilerinin ortalaması alınarak, yoldan geçecek olan yıllık dingil yükü tekrarı

sayıları elde edilmiştir. Elastik katmanlı sistem modeli Şekil 2’de, bağımsız değişkenlerin verildiği senaryo tipleri Çizelge 1’de verilmektedir.

Tabakalarda kullanılan malzemelere ait Poisson oranı, Esneklik Modülü, tekerlek yarıçapı, tekerleğin kaplamaya yaptığı basınç, dingil yükü ve zemin Esneklik Modülü değerleri KENPAVE’e bağımsız değişken olarak tanımlanmış ve Denklem 2 ile Denklem 3’te verilen hasar modelleri kullanılarak servis ömrü analizleri yapılmıştır.

Analizler sonucunda, kaplama tabakasının altında gerçekleşen çekme birim şekil değiştirmesi ve taban zemini üzerinde oluşan aksenal birim şekil değiştirmeler elde edilmiştir. Her gerilme için izin verilen yük tekrarı sayıları Denklem 2 ve 3’ten hesaplanarak, kritik olanlar servis ömrü olarak alınmıştır.



Şekil 2. Elastik katmanlı sistem modeli

Figure 2. Model of elastic layered system

HASAR MODELİ ANALİZİNİN SONUÇLARI (RESULTS OF DAMAGE MODEL ANALYSIS)

Asfalt Tabakada Yorulma (Fatigue in the Asphalt Layer)

Asfalt tabakasının altında oluşan aksenal çekme şekil değiştirme (ϵ_t) miktarları Şekil 3(a)’da verilmiştir. ϵ_t değerleri çekme türünde olduğu için, “eksi” işaretli olarak gösterilmiştir. Durum 1’de düşük trafik yükü olmasına rağmen, düşük taban zemini- M_R değerine sahip olması sebebiyle, çekme şekil değiştirmesinin en yüksek olduğu görülmektedir. Taban zemini- M_R ’ın azalmasına bağlı olarak (Durum 1, 4, 7) şekil değiştirme miktarları da yükselmektedir. Aynı trafik kategorisinde olan Durum 4 ve 7’ye bakıldığında, taban zemini- M_R değerlerindeki artış, Durum 7’de alttemel tabakası kullanılmamasına rağmen olumlu etki yaptığı gözlemlenmektedir ve taban zemini- M_R artışına bağlı çekme şekil değiştirmede azalma gerçekleşmiştir. Sırasıyla Durum 2, 5, 8’e bakıldığında orta, yüksek ve düşük taban zemini- M_R tercihi, çekme şekil değiştirme miktarını aynı trafik yüküne bağlı olarak benzer oranda etkilemiştir. Diğer durumlarda da aynı sonuçlar gözlemlenmektedir. Taban zemini- M_R değerindeki artışa bağlı olarak, çekme şekil değiştirmenin yönü ters orantılı olarak artmaktadır ve taban zemini- M_R ’ın düşük olması, şekil değiştirme miktarlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

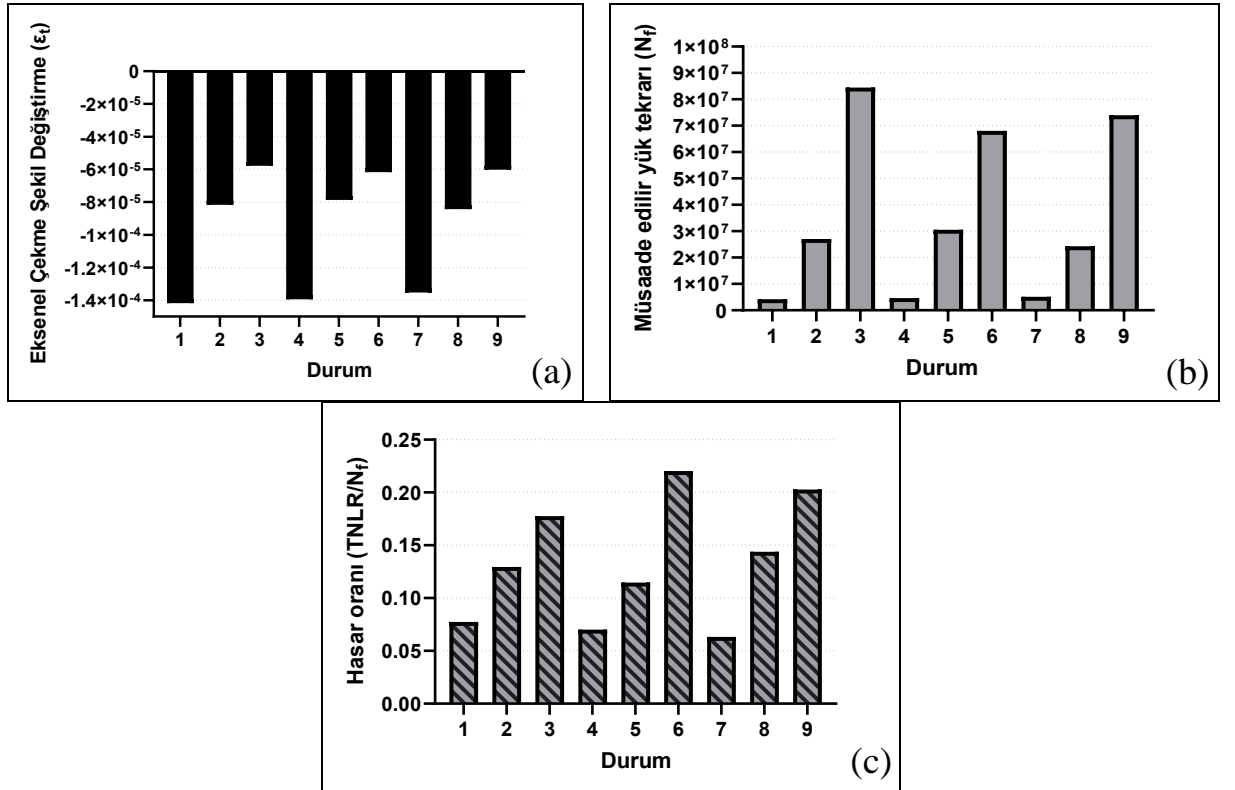
Şekil 3(b)’den görüleceği üzere, en düşük çekme şekil değiştirme miktarına sahip olan Durum 3’e bağlı olarak, izin verilen yük tekrarı sayısı en yüksek çıkmıştır. Deformasyon ne kadar az ise, doğal bir sonuç olarak o kadar çok araç geçişine izin verilir. Dolayısıyla, esnek üstyapının yorulma dayanımının artması, müsaade edilebilir dingil yükü tekrar sayısını artıracaktır.

Şekil 3(c)’de verilen hasar oranları, KENPAVE programında trafik kategorilerine girilen yıllık trafik yükü değerinin, izin verilen yük tekrarı sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir. Trafik miktarı ve izin verilen trafik yükünün artışına bağlı olarak hasar oranında artış veya azalış meydana gelmektedir. Hasar oranları kritik seviyelerde yol servis ömürleri hakkında bilgi vermektedir.

Çizelge 1. KENPAVE' de kullanılan bağımsız değişkenler

Figure 1. Independent variables used in KENPAVE

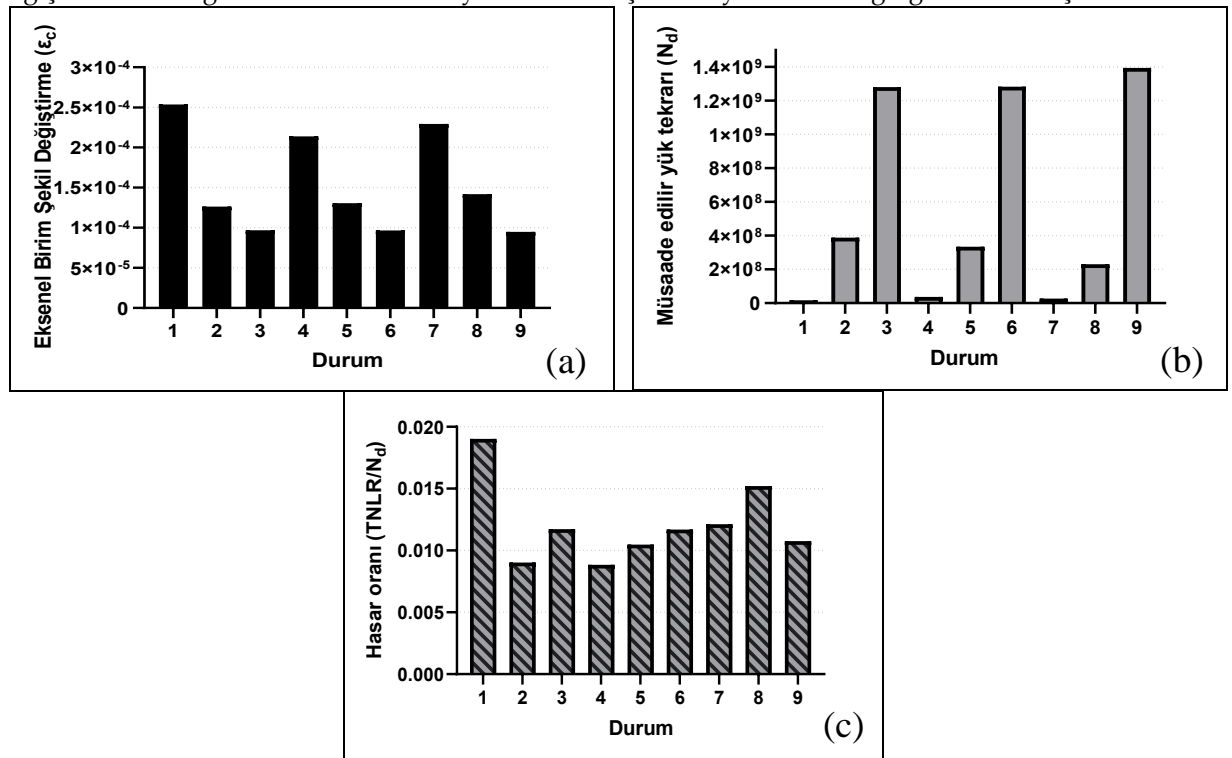
Durum	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Güvenilirlik (%)	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Dingil Yüğü Sayısı, 20 yıllık (milyon)	6,5	70	300	6,5	70	300	6,5	70	300
Dingil Yüğü Sayısı, 1 yıllık (milyon)	0,325	3,5	15	0,325	3,5	15	0,325	3,5	15
Dingil Yüğü, kN	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Tekerlek Yarıçapı, cm	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
Tekerleğin Uyguladığı Basınç, kPa	552	552	552	552	552	552	552	552	552
Taban Zemini MR, psi (bin)	7,5	12,6	19	12,6	19	7,5	19	7,5	12,6
Taban Zemini MR, kPa (bin)	52	87	131	87	131	52	131	52	87
Aşınma Tabakası, cm	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Binder Tabakası, cm	6	10	13	6	10	13	6	10	13
Bitümlü Temel Tabakası, cm	8	13	16	8	13	16	8	13	16
PMT Tabakası, cm	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Alttemel Tabakası, cm	20	15	0	15	0	35	0	25	15
Katman 1 (Asfalt Tabakası), cm	19	28	34	19	28	34	19	28	34
Katman 2 (Temel Tabakası), cm	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Katman 3 (Alttemel Tabakası), cm	20	15	0	15	0	35	0	25	15
Katman 1 (Asfalt MR), kPa (milyon)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Katman 2 (Temel MR), kPa (bin)	228	228	228	228	228	228	228	228	228
Katman 3 (Alttemel MR), kPa (bin)	128	128	128	128	128	128	128	128	128

Şekil 3. (a) Eksenel çekme şekil değiştirmeleri (ϵ_t), (b) Müsaade edilir yük tekrarları (N_f), (c) Hasar oranları (1 Yıllık Dingil Yüğü / N_f)Figure 3. (a) Tensile strain (ϵ_t), (b) Allowable number of load repetitions (N_f), (c) Damage ratio (1 Year Axle Load / N_f)

Taban Zemininde Kalıcı Deformasyon (Permanent Deformation on the Subgrade)

Şekil 4(a)'da tekerlek izi oluşumuna bağlı deformasyonlar görülmektedir. Taban zemini üzerinde gerçekleşen kalıcı deformasyon miktarı en fazla Durum 1'de görülmektedir. En düşük kalıcı deformasyona sahip olan Durum 9 için, izin verilen yük tekrarı sayısı da yüksek çıkmıştır (Şekil 4(b)). Buna bağlı olarak, basınç dayanımı yüksek olan, yani daha az deforme olan üstyapının, daha fazla trafik yüküne müsaade edebileceği sonucu çıkmaktadır.

Şekil 4(c)'de verilen hasar oranları, KENPAVE programına trafik kategorilerine göre girilen yıllık trafik yükü değerinin kabul edilen yük tekrarı sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. Zemin esneklik modülü ve izin verilen trafik yükü değişkenlerine bağlı olarak hasar oranında artış veya azalış oluşmaktadır. Denklem (3)'de ifade edilen taban zemininin üst kısmında basınç gerilmesi sonucu oluşan aksel birim şekil değiştirmelere (kalıcı deformasyon) bağlı hasar oranlarının, Denklem (2)'de ifade edilen asfalt kaplamadaki (Aşınma, Binder, Bitümlü Temel) yorulma çatlakları sonucu oluşan çekme şekil değiştirmesine bağlı hasar oranlarına kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.



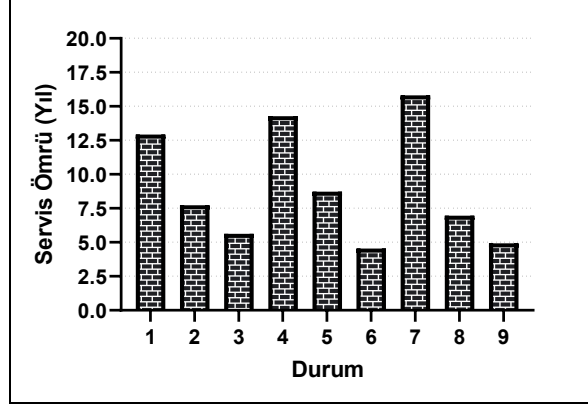
Şekil 4. (a) Aksel birim şekil değiştirmeleri (ϵ_c), (b) Müsaade edilir yük tekrar sayıları (N_d), (c) Hasar oranları (1 Yıllık Dingil Yüğü/ N_d)

Figure 4. (a) Compressive strain (ϵ_c), (b) Allowable number of load repetitions (N_d), (c) Damage ratio (1 Year Axle Load / N_d)

Kalan Servis Ömrü Değerlendirmesi (Assessment of Remaining Service Life)

Maksimum hasar oranı, her durum için Şekil 3(c) ve 4(c)'ye göre sırasıyla "asfalt kaplamadan kaynaklı yorulma ile taban zemini kaynaklı kalıcı deformasyon sonucu oluşan hasar oranlarından en yüksek olanı" olarak tarif edilmektedir (Asphalt Institute 1982). Çizelge 1'de verilen üstyapı kalınlıkları değerlendirildiğinde, Durum 1'de asfalt kaplamasının (Aşınma, Binder, Bitümlü Temel) tamamında oluşan çekme gerilmesine bağlı hasar oranı 0,077 iken (Şekil 3(c)), taban zemininde oluşan kalıcı deformasyona bağlı hasar oranı 0,019 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4(c)). Ortaya çıkan bu hasarın yaklaşık 4 kat daha büyük olması, esnek kaplamasının taban zeminine kıyasla servis yüklerine karşı daha hassas olduğunu göstermektedir. Maksimum hasar oranının, bütün durumlar için yorulma hasarı açısından daha kritik olduğu

görülmektedir. Hasar modeli analizleri sonucunda, 9 farklı durum için servis ömürleri, maksimum hasar oranının sahip olduğu yük tekrar sayısının (N_i), dingil yükü tekerrür sayısına (1 Yıllık Dingil Yüğü) bölünmesiyle elde edilmektedir. Bütün durumlarda servis ömrünün, AASHTO 93 tasarım yönteminin öngördüğü 20 yılın altında kaldığı görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Hasar modeli sonuçlarına göre servis ömrü (yıl)

Figure 5. Service life (years) based on the damage model results

BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER İÇİN DUYARLILIK ANALİZİ (SENSITIVITY ANALYSIS FOR INDEPENDENT VARIABLES)

Çizelge 1’de verilen karar değişkenleri (dingil yükü sayısı, taban zemini- M_R değeri, Alttemel, Bitümlü Temel, Binder ve Aşınma tabakası kalınlıkları) kullanılarak Minitab yazılımı ile ANOVA testi yapılmış ve sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

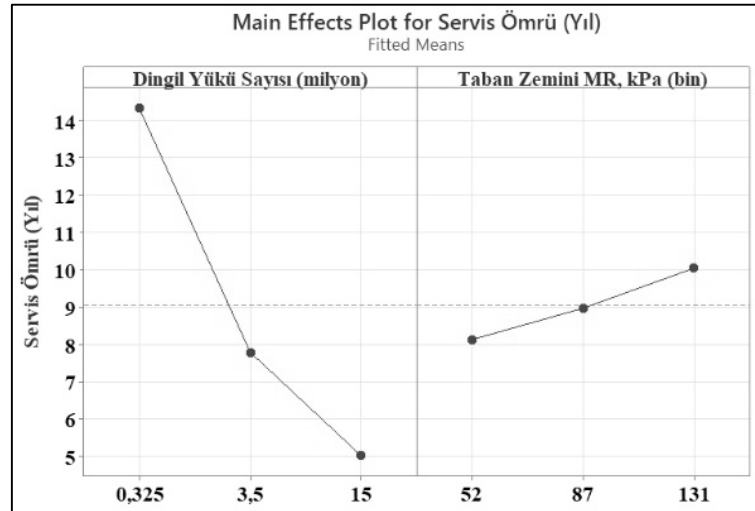
ANOVA testine göre, %95 güven aralığında asfalt tabakada yorulmadan kaynaklı hasar oranı, dingil yükü sayısı ve taban zemini- M_R açısından (sırasıyla p -value değerleri 0,000 ve 0,022 olmak üzere) anlamlıdır (Çizelge 2(a)). Ancak, aynı karar değişkenlerinin taban zemininde kalıcı deformasyon kaynaklı hasar oranı ile olan ilişkisi (sırasıyla p -value değerleri 0,600 ve 0,099 olmak üzere) anlamlı değildir (Çizelge 2(b)). Buradan hareketle, asfalt tabakadaki eksenel çekme şekil değiştirme miktarının, taban zemini üzerindeki kalıcı deformasyon miktarına kıyasla daha kritik olduğu bir kez daha anlaşılabilir.

Karar değişkenlerinin servis ömrü üzerindeki etkileri (duyarlılıkları) ise Çizelge 2(c) ve Şekil 6’da gösterilmektedir. Buradan hareketle, servis ömrü üzerinde dingil yükü sayısı ve taban zemini- M_R etkisinin %95 güven aralığında (sırasıyla p -value değerleri 0,000 ve 0,016 olmak üzere) anlamlı olduğu ve dingil yükü sayısının servis ömrünü taban zemini- M_R ’a göre daha çok etkilediği yorumu yapılabilir.

Çizelge 2. ANOVA testi sonuçları

Table 2. ANOVA test results

a) Asfalt Tabakada Yorulmadan Kaynaklı Hasar Oranı					
Karar Değişkeni	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dingil Yüğü Sayısı	2	0,025438	0,012719	238,26	0,000 <0,05
Taban Zemini-M _R	2	0,00124	0,00062	11,62	0,022 <0,05
Hata	4	0,000214	0,000053		
Toplam	8	0,026891			
b) Taban Zemininde Kalıcı Deformasyon Hasar Oranı					
Karar Değişkeni	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dingil Yüğü Sayısı	2	0,000007	0,000003	0,58	0,600
Taban Zemini-M _R	2	0,000052	0,000026	4,37	0,099
Hata	4	0,000024	0,000006		
Toplam	8	0,000082			
c) Servis Ömrü (Yıl)					
Karar Değişkeni	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dingil Yüğü Sayısı	2	136,909	68,4547	339,26	0,000 <0,05
Taban Zemini-M _R	2	5,518	2,7592	13,67	0,016 <0,05
Hata	4	0,807	0,2018		
Toplam	8	143,235			



Şekil 6. Karar değişkenlerinin servis ömrü üzerindeki ortalama etkileri (duyarlılıkları)

Figure 6. Average effects (sensitivity) of decision variables on the service life

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

- Mekanistik-ampirik üstyapı tasarım yöntemlerinde kullanılan bağımsız değişkenlerin (taban zemini-M_R, trafik yükü, kaplama kalınlığı gibi) tahmin edilen servis ömrü parametresi üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, esnek üstyapı tasarımında kritik olarak en fazla deforme olacak

olan katmanın ve deformasyon çeşidinin belirlenmesi önemli bir konu olarak incelenmeli ve dikkate alınmalıdır.

- KENPAVE yazılımı ile elde edilen hasar modeli sonuçları, asfalt kaplamadaki yorulmaya bağlı servis ömrünün, tekerlek izine bağlı servis ömrüne nazaran daha kritik olduğunu göstermektedir. Yola uygulanan yükler ve çevresel etmenler sonucunda asfaltta gerçekleşen yorulma çatlağı oluşumu gözlemlenmeseydi, tekerlek izine bağlı yol ömrünün çok daha uzun yıllar deformasyona uğramayacağı yorumu çıkarılabilmektedir. Bu nedenle, tekerlek izi deformasyonu baz alınarak tasarlanan bir yolun, ağır trafik yüklemesi gerçekleştiğinde yorulmaya bağlı olarak daha kısa sürede deforme olabileceği sonucu çıkmaktadır.

- AASHTO 93 yöntemi, üstyapı tasarımında mevcut servis kabiliyeti indeksi (PSI) kriterini kullanırken, mekanistik yöntemler yorulma, tekerlek izinde oturma, pürüzlülük gibi birden fazla tasarım kriterini dikkate alması sebebiyle daha ayrıntılı analizlerin yapılmasını mümkün kılmaktadır. Birtakım hasar modelleri kullanan KENPAVE sonuçları incelendiğinde, aynı trafik yüküne sahip kategorilerde, artan taban zemini-MR değerine bağlı olarak, alttemel kalınlığının giderek azalmasına rağmen, servis ömrü değerinin nispeten yükseldiği görülmektedir. Bu nedenle, taban zemini taşıma gücünün yol ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu sonucu çıkarılabilmektedir.

- Çekme gerilmelerinin artışına bağlı olarak, yol yıpranmakta ve bu nedenle en yüksek çekme şekil değiştirmesi olan Durum 6'da görüldüğü gibi en düşük servis ömrü seviyeleri ortaya çıkabilmektedir (Şekil 5). Genel olarak çekme gerilmelerinin azaltılmasını sağlamaya yönelik üretilebilecek çözümlerden bazıları, asfalt kaplama kalınlığını veya Esneklik Modülünü artırmak veya her ikisini birden yapmak şeklinde olabilir. Hasar modeli sonuçlarında kritik olan kalıcı deformasyon (tekerlek izi deformasyonu) olsaydı, taban zemini üzerindeki basınç gerilmesini azaltmanın etkili yollarından biri; granüler temel, alttemel kalınlığını veya bu katmanların esneklik modülünü arttırmak şeklinde olabilirdi.

- Durum 7 senaryosunda görüleceği gibi, %95 güvenilirlik düzeyi gibi yüksek bir seviye, düşük trafik yükü ve yüksek taban zemini-M_R değeri seçilmesine rağmen, servis ömrünün 15,8 yıl çıkmış olması, AASHTO 93 rehberinin servis ömrü beklentilerinin karşılanması açısından yeterli olmadığını göstermektedir.

- Ülkemizde, KGM tarafından en son 2008 yılında revizyonu yapılan esnek üstyapı tasarım rehberi, AASHTO 93 tasarım rehberini baz almaktadır. Bu bağlamda, rehberin mekanistik bir bakış açısıyla revize edilmesi bu çalışmanın yazarları tarafından önerilmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Bu çalışma, üçüncü yazarın danışmanlığı altında birinci yazarın lisans bitirme tezinden üretilmiştir. Ayrıca bu bildirili ile ilgili yazarlar arasında veya herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alimohammadi, H., Zheng, J., Buss, A., Schaefer, V. R., Williams, C., & Zheng, G. (2020). Field and simulated rutting behavior of hot mix and warm mix asphalt overlays. *Construction and Building Materials*, 265, 120366.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO, Washington DC.
- Azizian, M., Tafreshi, S. M., & Darabi, N. J. (2020). Experimental evaluation of an expanded polystyrene (EPS) block-geogrid system to protect buried pipes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105965.
- Asphalt Institute, 1982. *Research and Development of Asphalt Institute's Thickness Design Manual*, ninth ed. Asphalt Institute, Lexington.
- Bağdatlı, M. E. C., & Yıldırım, M. Ş. (2017). Karayolu üstyapılarındaki bozulmaların bakım maliyetlerine etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 102-111. DOI: 10.17100/nevbiltek.304473

- Bressi, S., Primavera, M., & Santos, J. (2022). A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (RAP) materials. *Resources, conservation and recycling*, 180, 106160.
- Burmister DM (1945). The General Theory of Stresses and Displacement in Layered Systems. *J. Appl. Phys.* 15: 89-94, 126-127, 296-302.
- Carvalho, R.L., 2006, Mechanistic-Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study, Yüksek lisans tezi, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 166.
- Chan, K. M., & Wang, Y. (2020). Resilient pavement design with consideration of flooding effect caused by climate change. *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(3), 1136-1155.
- Coree B., Ceylan H., Harrington D., 2005, Implementing the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: Implementation Plan, IOWA State Üniversitesi, ABD.
- Ekwulo, E. O., & Eme, D. B. (2009). Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(12).
- Göktolga, D., 1998, Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 112.
- Hanlı, E., 2009, Esnek Yol Üst Yapısında Oluşan Bozulmalar ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 130.
- Huang, Y.H., 2004, Pavement Analysis and Design (2nd ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., ve Eren, K., 2001, Asfalt ve uygulamaları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, İsfalt.
- Kaya, O., Comparative Design and Economic Analysis of Asphalt and Concrete Overlays for Airfield Pavements. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 873-882. DOI: 10.35414/akufemubid.713979
- KGM, 2008, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
- Kulkarni, S., & Ranadive, M. S. (2022). The parametric comparison of perpetual pavements with respect to Life-cycle cost and greenhouse gas emissions. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1147-1152.
- NCHRP, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 1-37A, National Research Council, Washington, DC, 2004.
- Patel, A., Singh, V., & Shanker, R. (2022). FEM based parametric analysis for investigating wheel base characteristics and axle configurations on flexural stresses in rigid pavements. *Materials Today: Proceedings*.
- Singh, A. K., & Sahoo, J. P. (2021). Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 315-338.
- Westergaard HM (1926). Stresses in Concrete Pavement Computed by Theoretical Analysis. *Public Roads*, Vol, 7, No. 2, pp. 25-35.