

Efektif Kalınlıklar Yöntemi ile Takviye Tabakası Tasarımının Yorulma ve Tekerlek İzinde Oturma Parametreleri Yönünden Mekanik Analizi

Ayşenur BALLI¹, Murat BOSTANCIOĞLU^{2*}

¹ İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

¹ aysenurballi58@gmail.com, ² bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 08/12/2025;

Kabul/Accepted: 23/02/2026)

Öz: Karayolu üst yapıları hizmet ömürleri boyunca trafik ve çevresel koşulların etkisinde deformasyon, ayrışma ve çatlama şeklinde temelde üçe ayrılan bozulmalara maruz kalırlar. Stabilité ve performans yönünden zayıflayan üst yapılarda, takviye tabakası imalatı ile hizmet koşullarının iyileştirilmesi ve yolun ilk hizmete başladığı dönemdeki koşullara geri dönmesi amaçlanır. Bu çalışmada, bozulmaya başlayan bir karayolunda takviye tabakası kalınlığının tahmini için kullanılan efektif kalınlıklar yöntemine son yıllarda literatürde sıklıkla kullanılan mekanistik-ampirik yaklaşım ile bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla yeni hizmete açılmış referans bir yol kesiti, efektif kalınlık belirleme katsayıları kullanılarak takviye tabakası ihtiyacı olacak şekilde deforme edilmiştir. Referans ve deforme kesitlerin yük altındaki mekanik tepkileri hesaplanarak oluşan birim deformasyonlar arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, referans kesitin taban zemini üzerinde meydana gelen düşey birim şekil değiştirme değerlerinin bozulmuş kesit değerlerine oranı, çok bozulmuş kesitlerde %34-37, orta seviyeli bozulmuş kesitlerde %67-70 olarak elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen bu değerlerin farklı taban zemini rijitlikleri için de sabit kaldığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, mekanik olarak elde edilen bu oranların takviye tabakası ihtiyacının belirlenmesinde etkin olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Esnek üst yapılar, üst yapı bozulması, takviye tabakası tasarımı, mekanistik analiz.

Mechanical Analysis of Overlay Design Using the Effective Thickness Method in Terms of Fatigue and Rutting Performance Parameters

Abstract: Highway pavements are subjected to three primary modes of deterioration, namely deformation, ravelling, and cracking, due to traffic loading and environmental effects throughout their service lives. When structural capacity and functional performance are compromised, rehabilitation aims to restore serviceability through overlay construction. This study evaluates the effective thickness method for estimating overlay thickness in deteriorated pavements within a mechanistic-empirical framework. For this purpose, a reference pavement section was subjected to low, medium, and high distortion levels defined by the distortion coefficients of the effective thickness method. Mechanical responses of both the reference and distorted sections were computed, and statistical analyses were conducted to quantify the relationship between the resulting strain responses. The ratio of vertical compressive strain at the top of the subgrade in the reference section to that in the distorted section ranged between 34–37% for severely distorted pavements and 67–70% for moderately distorted pavements. These ratios remained largely insensitive to variations in subgrade stiffness. The results suggest that the identified strain ratios may provide a rational basis for determining overlay requirements in pavement rehabilitation design.

Keywords: Flexible pavements, pavement deterioration, overlay design, mechanistic analysis.

* Sorumlu yazar: bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0009-0008-2769-925X, ² 0000-0001-6820-2213

1. Giriş

Ülkemizde yük ve yolcu taşımacılığında diğer ulaşım modları arasında ilk sırada yer alan karayolu taşımacılığı aynı zamanda yatırım ve bakım maliyetleri açısından da ilk sırayı almaktadır [1]. Karayolu yapısı, görevleri, yapım sırası ve kullanılan malzeme özelliklerine bağlı olarak altyapı ve üstyapı olarak iki kısımda incelenir. Altyapının görevleri; istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak ve üstyapı tarafından iletilen yükleri daha geniş bir alana yaymaktır [2,3]. Taşıtların konfor ve güvenliğinden sorumlu olan üstyapı ise yolun trafik yüklerini taşıyarak bu yükü taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde alt tabakalara aktaran ve alt temel, temel ve kaplamadan oluşan çok tabakalı bir yapıdır [1,4,5].

Karayolları, hizmet ömrü boyunca maruz kaldıkları trafik yükleri ve iklim koşulları nedeniyle zamanla bozulurlar. Başlangıçta yavaş seyreden bu bozulmalar zamanında onarılmalıdır. Aksi halde üstyapıdaki bozulma artar ve bakım ve onarım çalışmaları zorlaşır [6]. Üst yapı bozulmalarında öncelikle bozulma nedenleri araştırılmalıdır. Bozulmaya neden olan etkenler tespit edildikten sonra onarım çalışmaları yapılır. Böylelikle ileride tekrarlanabilecek bozulmalar da önenebilir [7].

Esnek kaplamalarda oluşan bozulmalar; deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlamalar olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir [8,9]. Tekerlek izinde oturma, ondülasyon, çökme ve kabarma şekillerinde gözlemlenen deformasyonlar yolun belirli bir bölümü boyunca görülen yapısal kusurlardır. Bu kusurların sürüş konforu ve güvenliği üzerinde önemli zararlı etkileri vardır. Ayrışmalar, karışımdaki agregaların aşınma tabakasından ayrılması ile oluşur. Homojen olmayan karışım, rutubetli veya kirli agrega kullanımı ve agrega ile bitüm arasındaki bağın (adezyon) yetersiz olması gibi sebeplerden meydana gelir [8]. Çatlamalar, trafik veya iklimsel yüklerin kaplama tabakasında meydana getirdiği gerilmenin fazla olması ile oluşur. Nem ve sıcaklık değişimleri, boşluk oranı yüksek agrega kullanımı, araçların ani hızlanma ya da yavaşlamasından oluşan yatay kuvvetler, yük tekrarı gibi faktörler çatlak oluşumunda etkili faktörlerdir [10,11].

Zamanla bozulan esnek kaplamaların hem stabilitesini hem de performansını yeniden sağlamak amacıyla takviye tabakası tasarımı yapılır. Üstyapının servis ömrünü uzatmak, yapısal direncini artırmak ve üstyapıya kaybettiği sürüş performansını geri kazandırmak amacıyla inşa edilen takviye tabakasının tasarımı için kaplamanın kayma direnci, kaplamanın sürüş konforu, yapısal kapasitesi, yüzey kusurları gibi hususların belirlenmesi gerekmektedir [12,13].

Takviye tabakalarının tasarımında, izafi tabaka katsayısına dönüştürme, efektif kalınlık belirleme, Shell yöntemi, AASHTO yöntemi ve mekanistik-ampirik (M-A) yöntem olmak üzere beş ayrı yaklaşım kullanılmaktadır [14,15]. İzafi tabaka katsayısına dönüştürme yönteminde mevcut kaplamada açılan gözlem kuyularından numuneler alınarak tabakaların CBR değerleri belirlenir ve bu değerler için atanan izafi tabaka katsayıları ile kaplamanın üstyapı sayısı (SN) elde edilir. Yöntem daha çok sathi kaplama ve makadam yollar için kullanılmaktadır [14]. Efektif kalınlık belirleme yönteminde kaplamada yapılan gözlemler sonucunda elde edilen bozulma katsayıları ile kaplamanın tüm tabakalarının asfalt betonu cinsinden efektif kalınlıkları hesaplanır. Efektif kalınlık belirleme yöntemi, üst yapıdaki mevcut tabakaların malzeme kalitesi ve mevcut hasar durumu göz önüne alınarak, takviye tabakası tasarımında kullanılacak “yapısal katkı” değerini belirlemek için geliştirilmiştir. Tabaka katsayıları, gözlenen çatlak, tekerlek izinde oturma ve diğer hasar türleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Katsayıların belirlenmesi için yapılan gözlem ve analizlerde, tabakanın türü, granüler tabakalarda CBR ve plastisite indisi değerleri, yüzey tabakası ve temel tabakasında kullanılan bağlayıcı çeşidi, çatlakların derinliği, aralıkları, agrega degradasyonu ve tekerlek izindeki deformasyonlar değerlendirilmektedir. Yöntemin avantajları; hızlı ve pratik kullanılabilirliği, mevcut tabaka katkısını dikkate alması ve AASHTO yöntemi ile uyumlu olması olarak sıralanabilir. Tek bir tabaka katsayısı ile tüm hasar türlerinin (kalıcı deformasyon, yorulma, termal çatlak, yansıma çatlağı vd.) temsil edilememesi, yöntemin eşdeğerlik katsayısına hassas olması ve bu sebeple mevcut tabaka durumunun belirlenmesinde iyi bir muhakeme ve iyi tanımlanmış yönerge gereksinimi ise yöntemin dezavantajları olarak belirtilebilir [16,17]. Tutumluer ve Sarker [18] tarafından yapılan çalışmada takviye tabakası tasarımında kullanılan parametrelerin duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bu parametrelerden bir tanesi olan tabaka katsayısı ile ilgili yapılan analizlerde yüzey tabakası katsayısının 0.15-0.3 aralığında, temel tabakası katsayısının 0.08-0.25 aralığında, alt temel tabaka katsayısının ise 0.09-0.11 aralığında değerler aldığı belirlenmiştir. Özellikle yüzey ve temel tabakasında elde edilen değerler arasındaki farklılıklar takviye tabakası kalınlığını önemli ölçüde etkilemekte ve tabaka katsayısının belirlenmesi aşamasındaki tecrübe ve muhakeme gereksiniminin önemini ortaya koymaktadır. Takviye tabakası tasarım sürecinde mevcut üst yapı durumunun değerlendirilmesi süreç için kritik öneme sahiptir. Gerçek tabaka modüllerinin ve mekanik davranışlarının belirlenmesi için; düşen ağırlık deflektometresi (FWD) veya benzeri tahribatsız test yöntemlerine, gerilme analizlerine ve back-calculation yöntemlerine (yapay sinir ağları, genetik algoritma vd.) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı göz ardı eden eşdeğer kalınlık yöntemi, hatalı veya yetersiz

değerlendirmelere yol açabilir [18-20]. Trafik yükleri ve çevre koşulları nedeni ile bozulan yolların değerlendirilmesinde defleksiyon metodunun kullanıldığı Shell yönteminde ölçülen defleksiyon değerlerinden geri çözümleme ile tabaka modülleri elde edilerek gerekli takviye tabakası kalınlıkları ve kalan ömür değerleri hesaplanmaktadır [14,21]. Defleksiyon ölçüm cihazlarının teminiyle ilgili ilk maliyetler, ölçüm ve veri değerlendirmeye ilişkin standardize edilmiş net bir yaklaşımın olmayışı ve uygulama mühendisleri için önemli zaman, bilgi birikimi ve tecrübe gerektiren karmaşık analiz prosedürleri defleksiyon temelli yöntemlerin en önemli dezavantajları olarak görülmektedir [18,22]. AASHTO yöntemi ile takviye tabakası tasarımında trafik ve iklim koşulları gibi ana faktörler değerlendirilmelidir. Üstyapıda yüzey sürtünmesinin ve yüzey pürüzlülüğünün azalması durumunda takviye tabakası uygulanır. Takviye tabakasının ömrü; var olan üstyapının kötüleşmesi, üstyapının malzeme ve zemin şartları, üstyapıdaki drenaj durumu ve iklim koşulları gibi faktörlere bağlıdır [12]. M-A tasarım yöntemlerinde, yeni hizmete açılan yollarda olduğu gibi bozulmuş bir üst yapının da yük altındaki mekanik tepki değerleri elde edilir ve ampirik göçme kriterleri kullanılarak ortaya çıkan hasarın tahmin edilmesi sağlanır. Kaplamanın mevcut durumu ve kalan ömrüne bağlı olarak kaplamada oluşacak hasarların izin verilen sınırlar içinde kalması için takviye tabakası kalınlığı belirlenir. M-A yöntemler, tekerlek izinde oturma, yorulma çatlağı, yansıma çatlağı ve pürüzlülük gibi farklı bozulma türlerini ve bunların birbirleri ile olan etkileşimlerini dikkate alarak daha doğru ve gerçekçi tahminler yapılmasına imkân sunmaktadır [15,23]. Wasanta vd. [23] tarafından yapılan çalışmada Endonezya West Java bölgesindeki esnek kaplamalı bir yolda FWD ile defleksiyon değerleri elde edilmiştir. Mevcut kaplamanın yapısal davranışı belirlenmiş ve Asfalt Enstitüsü (AI) ve Mekanistik-Ampirik Kaplama Tasarım Kılavuzu (MEPDG) yöntemleri ile M-A takviye tabakası tasarımı yapılmıştır. Çalışmada, AI yönteminde yalnızca yorulma çatlağı ve tekerlek izinde oturmaya bağlı göçme kriterlerinin kullanıldığı, MEPDG yönteminde ise ilave olarak yansıma çatlağı, boyuna çatlaklar ve pürüzlülük değerlerinin tasarıma ilave edildiği görülmektedir. MEPDG yöntemi daha fazla kriter kullanarak daha optimize edilmiş bir tasarım yaptığından AI yöntemine kıyasla daha ince bir takviye tabakası önermiştir. Sahis vd. [24] tarafından yapılan çalışmada, mevcut bir kaplama üzerine uygulanacak takviye tabakası tasarımında takviye tabakası ve mevcut kaplamadan oluşan iki tabakalı elastik bir sistem üzerinde çalışılmıştır. Tasarım parametresi olarak takviye tabakası-mevcut kaplama ara yüzeyindeki düşey deplasman değerleri kullanılmıştır. İki tabakalı elastik sistem Odemark'ın eşdeğer tabaka yöntemi ile homojen bir elastik tabaka olarak modellenerek mekanik tepkiler Boussinesq teorisi ile hesaplanmıştır. Elde edilen takviye tabakası kalınlık değerleri AI yöntemi ile elde edilen değerler ile kıyaslanarak sonuçların birbirine yakın olduğu ve düşey ara yüzey deformasyonunun güvenilir bir tasarım parametresi olabileceği sonucuna varılmıştır. Yapay sinir ağı (YSA) modellerinin M-A tasarım sonuçlarını öğrenerek takviye tabakası kalınlığını tahmin etme kapasitesinin değerlendirildiği makalede, YSA modeline mevcut kaplama özellikleri, trafik ve yükleme koşulları ve malzeme modülleri tasarım girdileri olarak tanıtılmış ve takviye tabakası kalınlığı çıktı değişkeni olarak hedeflenmiştir. Çok katmanlı algılayıcı yapısının kullanıldığı ağda geriye yayılım algoritması ile eğitim gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları YSA modelinin tasarım verilerini başarıyla öğrenebildiğini, M-A tasarım sonuçları ile uyumlu tahminler verdiğini, daha hızlı sonuç üretme kapasitesi sunduğunu ve mekanistik sonuçlardan öğrenebildiği için karmaşık ilişkileri doğru yakalayarak mekanik ilişkilerin doğrusal olmadığı durumlarda önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir [25]. Deshpande vd. [26] tarafından yapılan ve takviye tabakasının yol performans güvenilirliği üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmada kaplamanın dayanım ve ömrünü etkileyen parametrelerin etkileri ve duyarlılıkları incelenmiştir. Doğrusal elastik olarak modellenen yol yapısında M-A tasarım yaklaşımının iki önemli parametresi olan yorulma çatlağı ve tekerlek izinde oturma parametreleri göçme kriteri olarak ele alınmıştır. Çalışma sonuçları takviye tabakasının yol performansını artırdığını ancak güvenilirlik üzerindeki etkilerinin yorulma ve tekerlek izinde oturma parametrelerine bağlı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Duyarlılık analiz sonuçları ise taban zemini rijitliği ve mevcut asfalt tabaka kalınlığının güvenilirlik modelini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Zhou vd. [27] tarafından, takviye tabakası kalınlığının tasarımı ve analizi üzerine M-A bir sistem geliştirmek amacıyla yapılan çalışmada tekerlek izinde oturma ve yansıma çatlağı parametreleri temel bozulma kriterleri olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada trafik yükleri, mevcut kaplama koşulları iklim etkileri ve takviye tabakası malzeme özellikleri gibi kritik tasarım parametrelerini birleştiren bütünsel bir analiz aracı oluşturulması hedeflenmiştir. Yansıma çatlağının tahmin edilmesi için gerilme yoğunluk faktörleri ve tabaka malzemelerinin kırılma özellikleri kullanılmış, tekerlek izi tahmini için ise VESYS modeli (üst yapıdaki toplam plastik deformasyonun alt tabakalardaki plastik deformasyon toplamı olarak hesaplandığı mekanik model) kullanılmıştır. Çalışma bulguları ortaya koyulan yansıma çatlağı modelinin saha deneyleri ve test verileri ile uyumlu sonuçlar verdiğini, VESYS tabanlı tekerlek izinde oturma modelinin farklı saha verileri ile tutarlı tahminler sağladığını göstermektedir. Modeller entegre edildiğinde ise her iki bozulma türünün etkilerinin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayan bir araç elde edildiği vurgulanmıştır. Bu çalışmanın dikkat çekici sonuçlarından diğer bir tanesi ise, takviye tabakası

kalınlığının artması durumunda özellikle yansıma çatlağı açısından doğrusal bir kaplama ömrü artışı sağlanamamasıdır. Yansıma çatlağı ve tekerlek izinde oturma bozulmalarının tasarım parametresi olarak kullanıldığı bir diğer çalışmada, M-A model kalibrasyonları ağır taşıt simülatör deneyleri ile yapılmıştır. Malzeme, trafik ve imalat girdilerindeki belirsizlikler Monte Carlo simülasyonu ile modele dahil edilmiştir. Çalışmada CaIME ismi ile geliştirilen modelin takviye tabakası kalınlığını belirlemenin yanı sıra rehabilitasyon zamanlaması, farklı bakım stratejileri, belirsizlik etkileri ve risk analizleri gibi karar destek unsurlarını da içerdiği belirtilmiştir [28].

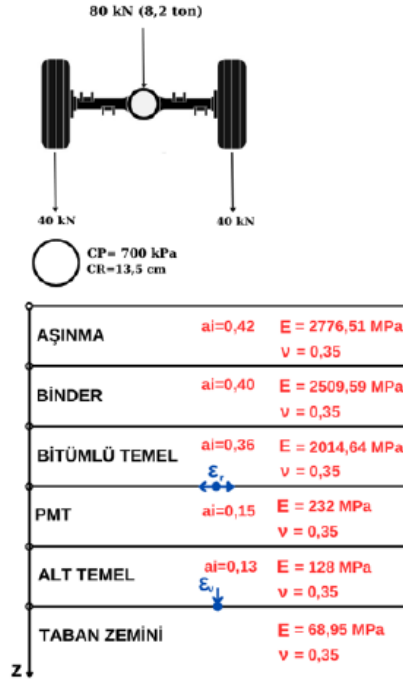
Çalışma konusu ile ilgili literatür bilgileri efektif kalınlık belirleme yönteminin mevcut tabaka katkısını dikkate alan ve pratik uygulama olanağı sunan bir yöntem olduğunu, ancak tek bir katsayı ile esnek üst yapılarda meydana gelen farklı bozulma türlerinin etkili bir şekilde ortaya koyulamayacağını belirtmektedir. Yöntemin bu zayıf yanı son yıllarda araştırmacıları M-A temelli takviye tabakası tasarımına yönlendirmiştir. M-A yaklaşımın yorulma çatlağı, yansıma çatlağı, tekerlek izinde oturma, yüzey pürüzlülüğü gibi çok sayıda bozulma türünü dikkate alıyor olması ve tabaka mekanik özellikleri ile saha koşullarını birlikte yansıtan hibrit bir yöntem oluşu bu yönelmeyi anlamlandırmaktadır. Mevcut çalışma Türkiye’de ve dünyada uygulama alanı olan ancak ampirik yapısı sebebiyle bazı belirsizlikler içeren efektif kalınlıklar yöntemini bir referans noktası olarak, yöntemin M-A yaklaşım ile değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, AASHTO tarafından önerilen efektif kalınlık katsayılarının alt ve üst sınır değerleri kullanılarak rehabilitasyon ihtiyacı olan hasarlı kesitler oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan kesitlerin mekanik tepki değerleri orjinal kesitin (yeni hizmete açılmış yol kesiti) mekanik tepki değerleri ile karşılaştırılarak orjinal ve hasarlı kesitler arasında sabit bir bozulma oranı değerinin varlığı araştırılmıştır. Farklı güvenilirlik seviyeleri ve trafik yükleri için tasarlanan üst yapı kalınlıklarının ve kesitlerin trafik yükleri altındaki mekanik tepkilerinin birbirlerinden önemli ölçüde farklı olmaları, çalışmanın bu aşamasında sabit bir mekanik eşik değer yerine bozulma oranına odaklanmasının sebebini açıklamakta ve çalışmanın özgün yönünü ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım ile yol, başlangıç durumuna göre belirli bir oranda deforme olduğunda rehabilitasyon ihtiyacının varlığından söz edilebilecektir. Tekerlek izinde oturma ve yorulma çatlağı parametrelerinin temel iki bozulma kriteri olarak dikkate alındığı çalışmada ayrıca efektif kalınlıklar yönteminin bu iki bozulma türünden hangisi ile daha tutarlı sonuçlar verdiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma bu yönü ile de literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Takviye tabakası ihtiyacı oluşan kesitlerde bozulma oranı için sabit bir değer elde edilmesi durumunda, sahada yapılacak rutin malzeme muayenelerinden elde edilen veriler ile kesit mekanik olarak modellenerek takviye tabakası ihtiyacının seviyesi ortaya koyulabilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada alt temel, plentmiks temel (PMT), bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarından oluşan geleneksel bir esnek üst yapı kesiti (Şekil 1) seçilmiştir. Üst yapı tabakalarına ait izafi mukavemet katsayıları, izafi mukavemet katsayılarına bağlı olarak hesaplanan esneklik modülü değerleri, Poisson oranı değerleri, mekanik tepki okuma noktaları, tekerlek yükü, temas gerilmesi ve temas yarıçapı değerleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Tabaka kalınlıkları AASHTO-93 tasarım denklemi (Eşitlik 1 ve 2) ile üç farklı güvenilirlik seviyesinde (R) ve her bir R değeri için beş farklı trafik kategorisinde hesaplanmıştır (Tablo 1). Eşitlik 1’de $T_{8.2}$ yolun hizmet ömrü boyunca geçirebileceği en büyük standart dingil yükünü, M_R taban zemini esneklik modülünü (psi), S_0 toplam standart sapmayı (0.45 olarak alınmıştır), Z_R standart normal sapmayı, ΔPSI servis kabiliyeti indeksindeki azalmayı (%95 ve %85 güvenilirlik seviyeleri için 2.5, %70 güvenilirlik seviyesi için 2.0 alınmıştır) ve SN üst yapı sayısını (inç) göstermektedir. Eşitlik 2’de k, bitümlü sıcak karışım tabaka sayısını, n, granüler tabaka sayısını, D_i ve D_j tabaka kalınlıklarını, a_i ve a_j tabakaların izafi mukavemet katsayılarını ve m_j granüler tabakaların drenaj katsayılarını belirtmektedir [6].

$$\log(T_{8.2}) = Z_R * S_0 + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 * \log(M_R) - 8,07 \quad (1)$$

$$SN = \sum_{i=1}^k a_i D_i + \sum_{j=1}^n a_j D_j m_j \quad (2)$$



Şekil 1. Üst yapı kesiti [29].

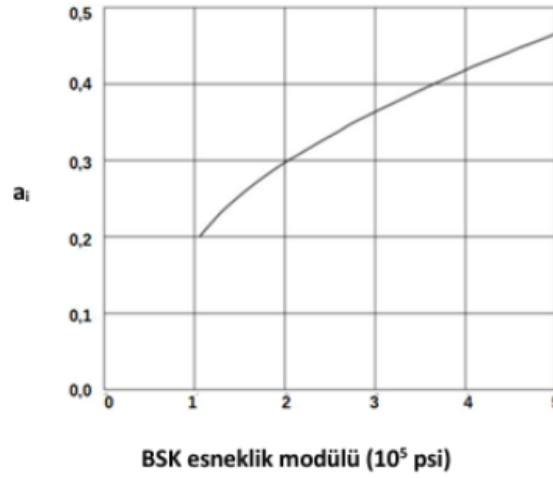
Tablo 1. AASHTO-93 yöntemine göre hesaplanan tabaka kalınlıkları.

Trafik Kategorileri (Milyon)**					
R %70 ($Z_R=-0.574$)	10-30	45-60	80-110	145-185	>250
Aşınma	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Binder	6 cm	7 cm	8 cm	8 cm	10 cm
Bitümlü Temel	8 cm	9 cm	10 cm	12 cm	12 cm
PMT	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Alt Temel	6,12 cm*	8,87 cm*	11,03 cm*	12,73 cm*	10,87 cm*
Gerekli SN (inç/cm)	4,40/11,18	4,84/12,29	5,25/13,33	5,62/14,27	5,84/14,83
Trafik Kategorileri (Milyon)**					
R %85 ($Z_R=-1.037$)	3-15	25-35	60-75	125-150	>250
Aşınma	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Binder	6 cm	7 cm	8 cm	10 cm	12 cm
Bitümlü Temel	8 cm	10 cm	12 cm	13 cm	14 cm
PMT	15 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Alt Temel	16 cm	12,943 cm*	16 cm	18 cm	17 cm
Gerekli SN (inç/cm)	4,61/11,71	5,19/13,18	5,79/14,70	6,35/16,12	6,75/17,15
Trafik Kategorileri (Milyon)**					
R %95 ($Z_R=-1.645$)	3-10	25-30	50-65	100-130	200-250
Aşınma	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Binder	6 cm	8 cm	10 cm	11 cm	13 cm
Bitümlü Temel	8 cm	11 cm	12 cm	14 cm	15 cm
PMT	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Alt Temel	12,96 cm*	14,13 cm*	17 cm	20 cm	22 cm
Gerekli SN (inç/cm)	4,75/12,06	5,55/14,10	6,15/15,63	6,75/17,14	7,31/18,56

* Dona hassas taban zeminleri için Karayolları Genel Müdürlüğü Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinde [6] kırma taş alttemel için önerilen asgari 15 cm kalınlık kabulü yapılmıştır.

** Trafik kategorileri Karayolları Genel Müdürlüğü Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinde [6] belirtilen asgari ve azami trafik kategorileri arasında, trafik kategorisi değişiminin etkisini yansıttak şekilde seçilmiş ve rehberde belirtilen kategori alt ve üst sınırlarına bağlı kalınmıştır.

Taban zemini esneklik modülü değeri literatür ile uyumlu şekilde 10000 psi (68,95 MPa) olarak hesaplamalarda dikkate alınmıştır [30-33]. Ayrıca yapılan çalışmanın taban zemini rijitliğine hassasiyetini değerlendirmek amacıyla çalışmanın ilerleyen adımlarında 50, 60, 80 ve 90 MPa taban zemini esneklik modülü değerleri ile de hesaplamalar tekrar edilmiştir. AASHTO-93 yöntemine göre oluşturulan kesitlerin mekanik analizlerinin yapılması aşamasında tabaka malzemeleri lineer elastik olarak tanımlanmış ve tabakalar elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) değerleri ile karakterize edilmiştir [31,34]. Her bir tabakanın E değeri AASHTO-93 yönteminde dikkate alınan izafi mukavemet katsayısına (a_i) bağlı olarak bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalar için Şekil 2, temel ve alt temel tabakaları için sırasıyla Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak hesaplanmıştır [6,15]. BSK tabakalar için verilen a_i değerleri Şekil 2’de verilen eğri ile kesiştirilerek BSK esneklik modülü ekseninden a_i değerine karşılık gelen değer okunmaktadır. ν değerleri tüm tabakalar için sabit ve 0.35 olarak hesaplamalarda yer almıştır [31,34]. Tabaka üzerindeki tekerlek yükü (F) AASHTO-93 yöntemi ile uyumlu olarak tekil aks ve tek teker üzerinde 40 kN (4.1 ton) olarak belirlenmiştir [6]. Tekerlek iç basıncı (CP) literatür ile uyumlu olarak 700 kPa seçilmiş ve bu iç basıncı kaplamaya aktaran temas yarıçapı (CR) 13.5 cm olarak hesaplanmıştır (Eşitlik 5) [35].



Şekil 2. BSK tabakalar için a_i - M_R dönüşüm grafiği [22].

$$a_{temel} = 0,249 * \log(E_{temel}) - 0,977 \quad (3)$$

$$a_{alttemel} = 0,227 * \log(E_{alttemel}) - 0,839 \quad (4)$$

$$CP = \frac{F}{\pi(CR)^2} \quad (5)$$

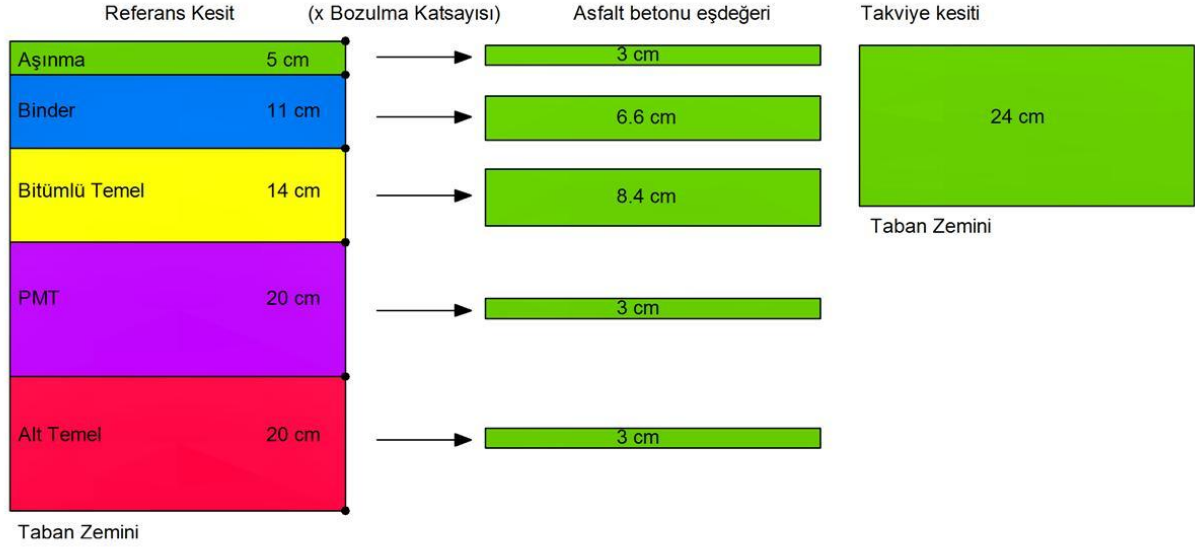
Üst yapı modelinin hazırlanması ve mekanik tepki değerlerinin elde edilmesi amacıyla KENLAYER programı kullanılmıştır [36-38]. KENLAYER, lineer elastik, non-lineer elastik ve viskoelastik tabakalardan oluşan esnek üstyapıların, farklı aks ve tekerlek yükleme koşulları altında verdiği mekanik tepkileri hesaplayan bir analiz programıdır. Bu program ile statik veya dinamik yüklemeler yapılarak üst yapı kesitleri analiz edilebilmektedir, ayrıca tabakalar arası sürtünme katsayıları tanımlanabilmekte veya tabakalar birbirine yapışık (bonded) olarak modellenmektedir [37-39]. Mevcut çalışmada tabaka temas durumu “bonded” olarak tanımlanmıştır.

Henüz hizmete açılmış yol kesitinin (orjinal kesit), takviye ihtiyacına sahip bir kesit durumuna getirilebilmesi amacıyla “efektif kalınlıklar metodu” kullanılmış ve her bir tabakanın asfalt betonu cinsinden kalınlık değerleri hesaplanmıştır. Üst yapının bozulma seviyesine bağlı olarak (az-orta ve çok) kullanılan ve tabaka bozulmasını temsil eden izafi tabaka katsayısı değerleri Tablo 2’de verilmiştir. İzlenen bu yöntem ile az bozulan kesitte asfalt betonu eşdeğer kalınlığı daha yüksek, çok bozulan kesitte daha düşük olarak elde edilmiştir. Referans kesitin, çok bozulma seviyesinde, takviye tabakası ihtiyacı olan kesite dönüşümüne ilişkin bir örnek gösterim Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’te referans kesite ait tabaka kalınlıkları aşınma, binder ve bitümlü temel tabakası için 0,6, PMT ve alt temel için 0,15 ile çarpılarak tüm tabakaların asfalt betonu

eşdeğerleri hesaplanmıştır. Elde edilen eşdeğer kalınlıklar toplanarak 6 tabakadan oluşan referans kesit, aşınma tabakası ve taban zemini olmak üzere iki tabakadan oluşan takviye tabakası kesitine dönüştürülmüştür.

Tablo 2. Tabaka bozulmasını temsil eden izafi tabaka katsayıları [40].

Tabakalar	Tabaka katsayıları		
	Az Bozulma	Orta Bozulma	Çok Bozulma
Aşınma, Binder ve Bitümlü Temel	0,95	0,85	0,6
PMT ve Alt temel	0,45	0,25	0,15



Şekil 3. R=%95, T_{8,2}=100-130 milyon kesitinin ‘çok bozulma’ seviyesinde görünümü.

Tabakalara ait mekanik tepki değerleri referans kesitte bitümlü temel tabakası altından (yatay birim şekil değiştirme, ϵ_r) ve taban zemini üzerinden (düşey birim şekil değiştirme, ϵ_v) okunurken, takviye tabakası ihtiyacı olan kesitlerde iki tabaka ile çalışılması sebebiyle (eşdeğer asfalt betonu tabakası ve taban zemini) eşdeğer asfalt betonu altından (yatay birim şekil değiştirme) ve taban zemini üzerinden (düşey birim şekil değiştirme) okunmuştur. Bu şekilde elde edilen mekanik tepki değerlerine bağlı olarak bozulma oranı (BO) değerleri Eşitlik 6 ile hesaplanmıştır.

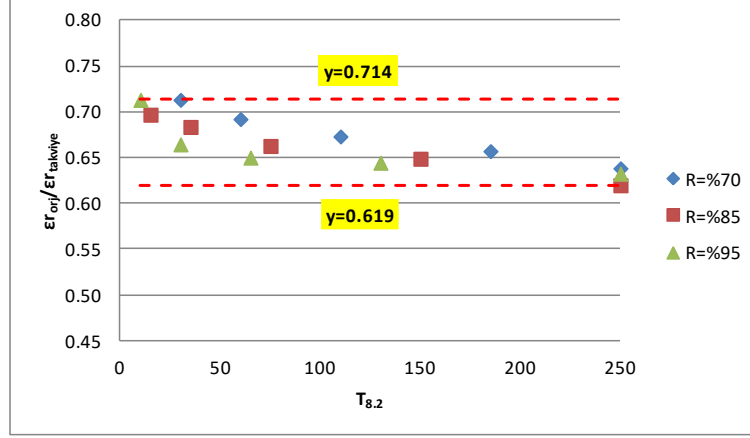
$$BO = \epsilon_{\text{orijinal}} / \epsilon_{\text{takviye}} \quad (6)$$

3. Bulgular ve Tartışma

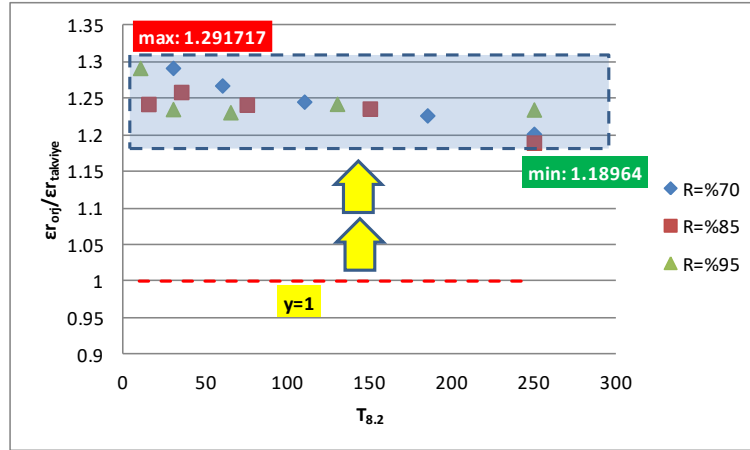
Taban zemini M_R değeri 10000 psi (68.95 MPa) alınarak, AASHTO-93 yönteminde R=%70, 85 ve 95 güvenilirlik seviyeleri için tasarımı yapılan referans kesitler için elde edilen ϵ_r orijinal ve ϵ_v orijinal değerleri ile az, orta ve çok bozulma seviyeleri için elde edilen kesitlerin ϵ_r takviye ve ϵ_v takviye değerlerinin oranlanması sonucunda elde edilen BO değerleri Şekil 4-9’da verilmiştir.

ϵ_r orijinal/ ϵ_r takviye oranlarını gösteren Şekil 4-6 incelendiğinde ‘çok’ bozulma seviyesi için BO değerlerinin 0,619-0,714 aralığında dağılım gösterdiği (0,619 ve 0,714 sınır değerleri Şekil 4’te kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir), analiz edilen 15 kesitten 9 tanesinde bu oranların 0,65-0,70 aralığında yer aldığı ancak sabit bir BO değerinde yığılma göstermediği gözlenmektedir. Çok bozulma seviyesi için takviye kesitlerinin referans kesite oranla bozulma gösterdiği ve bakım/onarım ihtiyacının ortaya çıktığı BO değerlerinin 1,0’in altına düşmesi ile belirgin bir şekilde anlaşılmaktadır. Bozulma seviyesi ‘orta’ ve ‘az’ olduğunda BO değerleri 1,0’in üzerinde yer almaktadır (Şekil 5’te BO=1 sınır değeri kırmızı kesikli çizgi ile ve hesaplanan BO değerlerinin minimum 1,19 maksimum 1,29 aralığında kümelendiği bölge mavi alan olarak gösterilmiştir), özellikle ‘az’ bozulma seviyesi için değerler 1,9-2,16 aralığında yer almaktadır. Bu durum yolda takviye ihtiyacından ziyade kesitin güçlenmesi ve yol ömrü değerinin artması anlamını taşımaktadır. Belirli bir süre kullanım sonrasında yol

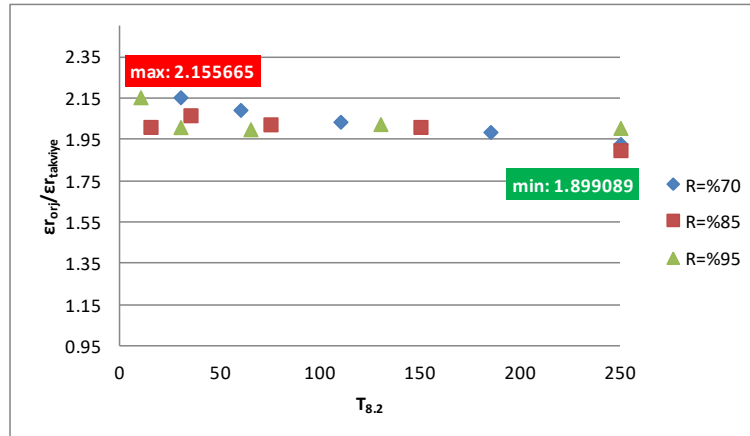
ömrü değerlerinin düşmesi beklenen kesitte iyileşme durumu analitik bir çıkarım değildir. Bu durum efektif kalınlıklar yönteminin orta ve az bozulma seviyelerinde etkin çalışmadığını veya BSK tabakalar altından okunan ϵ_r değerlerinin orta ve az bozulma seviyeleri için doğru bir takviye ihtiyacı göstergesi olmadığını ifade etmektedir.



Şekil 4. $M_R=68,95$ MPa, çok bozulma seviyesi.

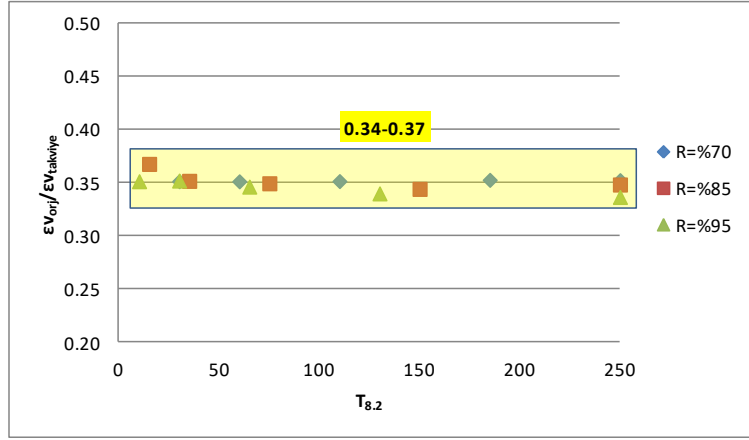


Şekil 5. $M_R=68,95$ MPa, orta bozulma seviyesi.

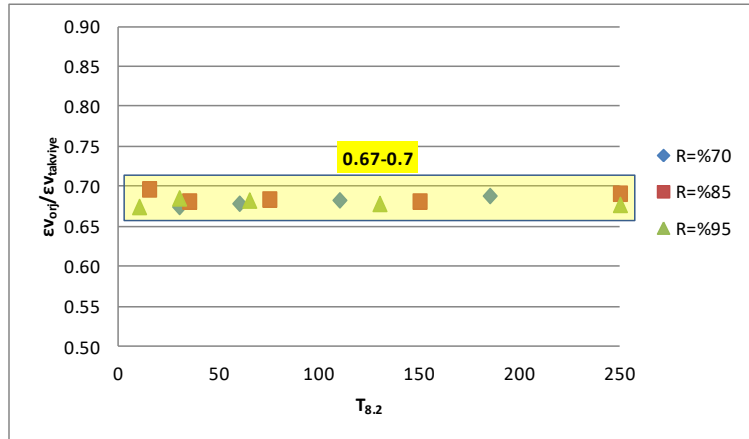


Şekil 6. $M_R=68,95$ MPa, az bozulma seviyesi.

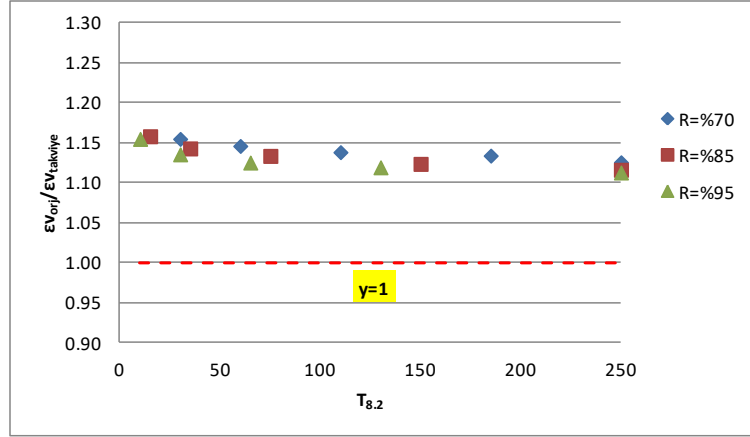
ε_v orijinal/ ε_v takviye oranlarını gösteren Şekil 7-9 incelendiğinde, “çok” ve “orta” bozulma seviyeleri için referans kesite oranla BO değerlerinin sabit bir aralıkta yığılma gösterdiği net bir şekilde görülmektedir. BO değerleri “çok” bozulma seviyesi için 0,34-0,37 aralığında sabitlenirken “orta” bozulma seviyesi için 0,67-0,7 aralığında sabitlenmiştir (İlgili yığılma bölgeleri Şekil 7 ve 8’de sarı alan ile gösterilmiştir). 1,0’in üzerinde değer almayan ve sabit bir değer üzerinde yığılma gösteren bu sonuçlar taban zemini üzerinden okunan ε_v değerlerinin, takviye tabakası ihtiyacının belirlenmesinde çok daha analitik ve güvenilir bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Bozulma seviyesi “az” olduğunda ise (Şekil 9) BO değerleri her ne kadar 1,10-1,15 aralığında yığılma gösterse de değerlerin 1,0’in üzerinde elde edilmesi “az” bozulma seviyesinde henüz bir takviye ihtiyacının oluşmadığını ve yöntemin bu seviye için tutarlılığını kaybettiğini göstermektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, takviye tabakası tasarımında düşey deformasyon değerlerinin güvenilir bir tasarım parametresi olduğu ve oluşturulan M-A modellerde tekerlek izinde oturma kriterinin önemli bir parametre olarak değerlendirildiği literatür bilgisi ile uyumludur [24,26-28]. Bu sebeple çalışmanın ilerleyen aşamasında tekerlek izinde oturma kriteri olarak bildirilen ε_v değerleri esas alınarak duyarlılık analizleri sürdürülmüştür.



Şekil 7. $M_R=68,95$ MPa, çok bozulma seviyesi.



Şekil 8. $M_R=68,95$ MPa, orta bozulma seviyesi.



Şekil 9. M_R=68,95 MPa, az bozulma seviyesi.

Üst yapı tasarımında sonuca etki eden en önemli parametrelerden bir tanesi olan taban zemini rijitliğindeki değişiminin etkisini incelemek amacıyla sabit bir yükleme değeri için (T_{8.2}=110 milyon) tüm güvenilirlik seviyelerinde M_R değerleri 50, 60, 68.95, 80 ve 90 MPa alınarak orijinal kesitler oluşturulmuş ve “orta” ve “çok” bozulma katsayıları ile bu kesitler takviye tabakası ihtiyacı olacak kesitler durumuna getirilmiştir. ϵ_v değerlerindeki değişim oranının takviye tabakası ihtiyacı için daha uygun bir parametre olduğu tespit edildiği için oluşan kesitlerde ϵ_v orijinal/ ϵ_v takviye oranları hesaplanarak Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde R=%70 güvenilirlik değeri ve çok bozulma seviyesinde ϵ_v orijinal ve ϵ_v takviye değerlerinin taban zemini rijitlik artışına bağlı olarak azalma eğiliminde olduğu görülmektedir (M_R=60 MPa kesiti dışında). Bu durum taban zemini desteğinin artmasına bağlı olarak olası kesit deformasyonunun azalması olarak açıklanabilir. Ancak %70 güvenilirlik seviyesinde izlenen kararlı azalma %85 ve %95 seviyeleri için geçerliliğini yitirmiştir. Elde edilen değerler AASHTO-93 yönteminde taban zemini rijitliği ile önerilen kesitler arasında doğrusal bir ilişki olmadığını göstermektedir. Belirtilen bu durum BO değerleri için de geçerli olup, BO değerlerinin taban zemini rijitliğine duyarlılığının az olduğunu ortaya koymaktadır. Çok bozulma seviyesi için Tablo 3’te verilen BO maksimum değeri 0,36, minimum değeri 0,33, ortalaması 0,34 ve standart sapması 0,009 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan düşük standart sapma değeri verilerin ortalamaya yakın olduğunu ve BO değerlerindeki tutarlılığın yüksekliğini ifade etmektedir. Bozulma seviyesi orta olduğunda BO minimum değeri 0,64, maksimum değeri 0,71, ortalaması 0,68 ve standart sapması 0,024 olarak hesaplanmıştır. Çok ve orta bozulma seviyeleri için hesaplanan standart sapma değerleri karşılaştırıldığında orta bozulma seviyesinde BO tutarlılığının çok bozulma seviyesine göre azaldığı belirtilebilir. Farklı taban zemini rijitlikleri için elde edilen bu sonuçlar ϵ_v orijinal/ ϵ_v takviye değerlerinin tutarlı bir takviye tabakası göstergesi olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 3’te verilen aynı bozulma seviyesi ve aynı taban zemini rijitliği için ϵ_v orijinal ve ϵ_v takviye değerlerinin R’ye bağlı değişimi incelendiğinde güvenilirlik değerindeki artışa bağlı olarak hesaplanan deformasyon değerlerinin sistematik bir şekilde azaldığı görülmektedir. Güvenilirlik değerinin artışına bağlı olarak hesaplanan deformasyon azalma oranları taban zemini rijitliği arttıkça azalmaktadır. Bu durum AASHTO-93 yönteminin düşük taban zemini rijitliği ve yüksek güvenilirlik seviyeleri için deformasyon direnci daha yüksek kesitler önerdiğini göstermektedir. Hem orijinal hem de takviye kesitlerinde meydana gelen eşdeğer azalma oranları BO değerleri üzerinde R’ye bağlı anlamlı bir etki meydana getirmemiştir.

Tablo 3. Taban zemini rijitlik değişimine bağlı olarak ϵ_v orijinal/ ϵ_v takviye oranları.

R (%)	Bozulma seviyesi	M _R (Mpa)	ϵ_v orijinal	ϵ_v takviye	ϵ_v orijinal/ ϵ_v takviye
70	Çok	50	2,94E-04	8,28E-04	0,35
70	Çok	60	3,02E-04	8,40E-04	0,36
70	Çok	68,95	2,85E-04	8,11E-04	0,35
70	Çok	80	2,62E-04	7,70E-04	0,34
70	Çok	90	2,44E-04	7,38E-04	0,33
70	Orta	50	2,94E-04	4,15E-04	0,71
70	Orta	60	3,02E-04	4,30E-04	0,70
70	Orta	68,95	2,85E-04	4,18E-04	0,68
70	Orta	80	2,62E-04	3,99E-04	0,66
70	Orta	90	2,44E-04	3,84E-04	0,64
85	Çok	50	2,21E-04	6,42E-04	0,34
85	Çok	60	2,27E-04	6,55E-04	0,35
85	Çok	68,95	2,36E-04	6,70E-04	0,35
85	Çok	80	2,17E-04	6,37E-04	0,34
85	Çok	90	2,02E-04	6,12E-04	0,33
85	Orta	50	2,21E-04	3,15E-04	0,70
85	Orta	60	2,27E-04	3,28E-04	0,69
85	Orta	68,95	2,36E-04	3,42E-04	0,69
85	Orta	80	2,17E-04	3,27E-04	0,66
85	Orta	90	2,02E-04	3,15E-04	0,64
95	Çok	50	1,90E-04	5,54E-04	0,34
95	Çok	60	1,97E-04	5,69E-04	0,35
95	Çok	68,95	2,00E-04	5,73E-04	0,35
95	Çok	80	1,91E-04	5,58E-04	0,34
95	Çok	90	1,78E-04	5,36E-04	0,33
95	Orta	50	1,90E-04	2,70E-04	0,70
95	Orta	60	1,97E-04	2,83E-04	0,70
95	Orta	68,95	2,00E-04	2,90E-04	0,69
95	Orta	80	1,91E-04	2,84E-04	0,67
95	Orta	90	1,78E-04	2,74E-04	0,65

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, ampirik tabanlı efektif kalınlıklar yönteminin M-A yaklaşımla analiz edilerek yöntemin, bozulma kriteri olarak seçilen tekerlek izinde oturma ve yorulma çatlağı parametrelerinden her ikisi veya bir tanesi ile tutarlı sonuçlar vereceği ve kararlı bir BO değerinin elde edileceği hipotezi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar tekerlek izinde oturma kriteri olarak tanımlanan taban zemini üzerindeki ϵ_v değerlerinin “çok” ve “orta” bozulma seviyeleri için bu hipotezi destekler nitelikte olduğunu göstermiştir. Tabaka bozulmalarının “az” olması durumunda kullanılan katsayılar ile granüler tabakaların asfalt betonu cinsinden ifade edilmesi kesiti güçlendirmekte ve kesit orijinal durumundan daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine erişmektedir. Bu durum takviye tabakası tasarımında yöntem ve yöntemde kullanılan parametre seçiminin çok önemli bir tasarım parametresi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Hem bu çalışmadan elde edilen bulgular hem de takviye tabakası tasarımında incelenen literatür bilgisi tekerlek izinde oturma parametresinin takviye tabakası kalınlık tahmininde dikkate alınması gereken kritik bir mekanik tepki olduğunu göstermektedir. Özellikle rehabilitasyon ihtiyacı olan bozulmuş kesitin kaplama ve taban zemininden oluşan iki tabakalı bir sistem olarak modellenmesi durumunda yükler kaplama tabakasından yük dağıtımı olmaksızın doğrudan taban zeminine iletilmekte ve bu durum tekerlek izinde oturma parametresini önemli bir tasarım bileşeni haline getirmektedir. Trafığe yeni açılan bir yol kesitinde oluşan mekanik tepkilerin belirli bir kritik eşik değerine ulaşması durumunda rehabilitasyon ihtiyacını tanımlamak yerine bu durumu tekerlek izinde oturma parametresi üzerinden sabit bir BO değeri ile tanımlamak, bu çalışmanın literatürdeki özgün konumunu ortaya koyan bir çıkarım olarak ifade edilebilir.

Çalışmada “çok” bozulma seviyesi için elde edilen %34-37 ve “orta” bozulma seviyesi için elde edilen %67-70 BO değerleri, çok ve orta bozulma seviyelerinde referans kesitin yaklaşık olarak sırasıyla 3,0 ve 1,5 kat daha fazla deforme olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bu değerler ile, mevcut bir yolda hizmet ömrü içinde herhangi bir yılda yapılacak malzeme testleri ve mekanik modelleme neticesinde kesitin takviye tabakasına ihtiyacı olup olmadığı ortaya koyulabilir. Bu yaklaşım efektif kalınlık belirleme yönteminin bozulma katsayılarına olan hassasiyeti ve defleksiyon tabanlı yöntemlerin pahalı ek ekipman gereksinimi gibi dezavantajlarına karşı alternatif ve pratik bir mühendislik yaklaşımı olarak dikkat çekicidir. Her ne kadar “çok” bozulma seviyesi için kaplama tabakası altındaki yatay birim şekil değiştirme değerleri anlamlı sonuçlar verse de sabit bir değerde kümelenme bakımından kararlı görünmemektedir.

Esnek kaplamaların mekanik modellenmesinde sonuca etki eden pek çok parametre mevcut olup, tabaka malzemelerinin mekanik tanımlamaları, yükün statik veya dinamik olarak etki etmesi, yük temas geometrisi, tekerlek iç basıncı ve aks ve tekerlek konfigürasyonu bu parametrelerin başlıcaları olarak sıralanabilir. Mevcut çalışmada analizler, tabaka malzemelerinin lineer elastik, yükleme durumunun ise tek aks üzerinde tek tekerlek ve statik yükleme ile tanımlandığı senaryolar için yapılmıştır. Özellikle BSK tabakalarında viskoelastik, granüler tabakalarda ise nonlineer elastik malzeme tanımlaması ve yükün tandem veya tridem aks geometrisi ile statik yerine tekrarlı uygulanması durumunda malzeme davranışının değişeceği ve sıcaklık değişimi ile çevresel etkilerin sonuçlar üzerinde daha belirleyici etkilerinin olacağı dikkate alınmalı ve BO değerlerinin yeniden değerlendirilmesi gerekeceği önemle vurgulanmalıdır. Bu parametrelerdeki değişimin sonuca etkileri üzerinde duyarlılık analizleri ilerideki çalışma önerileri olarak verilebilir.

Kaynaklar

- [1] İnanlı B. Mekanistik Ampirik Üstyapı Tasarımının Mevcut Bir Yolda Kullanılması ve Bakım/Onarımın Performansa Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [2] Karakaş A.S. Bitümlü Sıcak Karışımların Trafik Etkisi Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2014.
- [3] Armağan K. Karayolunun AASHTO Metoduna Göre Tasarımı ve Türkiye Kalibrasyonu. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2019.
- [4] Yağtu İ. Rijit Üstyapıların Köy Yollarında Uygulanabilirliği: Eskipazar Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2019.
- [5] Hanlı E. Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar ve Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [6] Sağlık A., Güngör A.G. Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008.
- [7] Doğan O. Esnek Üstyapılı Devlet Yollarındaki Bozulmaların Bulanık Mantık ile Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.
- [8] Aslan H. Esnek Kaplamalı Karayollarında Meydana Gelen Deformasyonların Değerlendirilmesi: Kırıkkale Keskin Yolu Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, 2022.
- [9] Bağdatlı M.E.C., Yıldırım M.C. Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine Etkisi. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi 2017; 6(1): 102–111.
- [10] Ilıcalı M., Tayfur S., Özen H., Sönmez _ , Eren K. Asfalt ve Uygulamaları. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi, İsfalt Seçil Ofset, 2001.
- [11] Ayçiçek S. Esnek Üstyapılarda İmalat ve Uygulama Kusurları. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2011.
- [12] Demir M.C. Esnek Yol Üstyapılarında Takviye Tabakası Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2001.
- [13] Highway Design Manual Chapter 600 Design of the Pavement Structural Section. 2000.
- [14] Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi. 1995.
- [15] Huang Y.H. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [16] Abaza K.A. Performance-Based Models for Flexible Pavement Structural Overlay Design. J Transp Eng 2005; 131(2): 149–159.
- [17] Soós Z., Tóth C. Simple Overlay Design Method for Thick Asphalt Pavements Based on the Method of Equivalent Thicknesses. Period Polym Civ Eng 2017; 61(3): 389–397.
- [18] Tutumluer E., Sarker P. Development of Improved Overlay Thickness Design Alternatives for Local Roads (Research Report No. FHWA-ICT-15-008). Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana-Champaign; Illinois Department of Transportation; Federal Highway Administration, 2015.
- [19] Abaza K.A., Murad M.M. Predicting Remaining Strength of Flexible Pavement and Overlay Design Thickness with Stochastic Modeling. Transp Res Rec 2009; 2094(1): 62–70.
- [20] Gong H., Sun Y., Huang B. Estimating Asphalt Concrete Modulus of Existing Flexible Pavements for Mechanistic-Empirical Rehabilitation Analyses. J Mater Civ Eng 2019; 31(11): 04019252.

- [21] Rabaiotti C. Inverse Analysis in Road Geotechnics. Doctor of Sciences, Laurea in Ingegneria Civile, Università Degli Studi di Parma, Italy, 1975.
- [22] Khweir K.A. United Kingdom Overlay Design of Flexible Pavement: Determination of the Important Parameters. *J Transp Eng* 2012; 138(3): 324–331.
- [23] Wasanta T., Subagio B.S., Wibowo S.S., Hariyadi E.S. Comparative Analysis of Overlay Thickness Using the Asphalt Institute's and MEPDG with KENLAYER. *Int J GEOMATE* 2024; 26(118): 57–64.
- [24] Sahis M.K., Biswas P.P., Mandal G.C., Paul S. A Mechanistic Empirical Design of Bituminous Overlay on Flexible Road Pavement Using Vertical Interface Deflection as Design Parameter. *Lect Notes Civ Eng* 2024; 523: 408–417. Springer.
- [25] Abo Hashema M. Artificial Neural Network Approach for Overlay Design of Flexible Pavements. *Int Arab J Inf Technol* 2009; 6(2): 204–212.
- [26] Deshpande V.P., Damjanovic I.D., Gardoni P. Effects of Overlay Designs on Reliability of Flexible Pavements. *Struct Infrastruct Eng* 2012; 8(2): 185–198.
- [27] Zhou F., Hu S., Scullion T. Advanced Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis System. *J Assoc Asph Pav Technol* 2010; 79: 597–634.
- [28] Ullidtz P., Harvey J., Basheer I., Jones D., Wu R., Lea J., Lu Q. CalME, a Mechanistic–Empirical Program to Analyze and Design Flexible Pavement Rehabilitation. *Transp Res Rec* 2010; 2153: 143–152.
- [29] Köse B., Bostancıoğlu M. Üstyapı Sayısı Değişmeyen AASHTO-93 Kesitlerinin Mekanistik-Ampirik Yöntemler ile Yol Ömrü Analizi. *Fırat Univ Müh Sci Derg* 2025; 37(1): 475–486.
- [30] Mashayekhi M., Amini A.A., Behbahani H., Nobakht S. Comparison of Mechanistic-Empirical and Empirical Flexible Pavement Design Procedures of AASHTO: A Case Study. *5th Int Conf Bitum Mix Pavements* 2011; 319–328.
- [31] Hadi M.N.S., Bodhinayake B.C. Non-Linear Finite Element Analysis of Flexible Pavements. *Adv Eng Softw* 2003; 34(11–12): 657–662.
- [32] Ekwulo E., Eme D. Fatigue and Rutting Strain Analysis of Flexible Pavements Designed Using CBR Methods. *Afr J Environ Sci Technol* 2009; 3(12): 412–421.
- [33] Samad E. Sensitivity Analysis in Flexible Pavement Performance Using Mechanistic-Empirical Method (Case Study: Cirebon–Losari Road Segment, West Java). *J Civ Eng Forum* 2011; 20: 1163–1174.
- [34] Sarkar A. Numerical Comparison of Flexible Pavement Dynamic Response Under Different Axles. *Int J Pavement Eng* 2016; 17(5): 377–387.
- [35] Zhao J., Wang H. Mechanistic-Empirical Analysis of Asphalt Pavement Fatigue Cracking under Vehicular Dynamic Loads. *Constr Build Mater* 2021; 284: 122877.
- [36] Bostancıoğlu M. Mekanistik Ampirik Esnek Üstyapı Tasarım Modellerinin Tabaka Kalınlık ve Rijitlik Oranlarına Bağlı Olarak Karşılaştırılması. *Gümüşhane Univ Fen Bil Enst Derg* 2021; 11(1): 91–102.
- [37] Muniandy R., Aburkaba E., Thamer N. Comparison of Flexible Pavement Performance Using Kenlayer and Chev PC Software Program. *Aust J Basic Appl Sci* 2013; 7: 112–119.
- [38] Chegenizadeh A., Keramatikerman M., Nikraz H. Flexible Pavement Modelling Using Kenlayer. *Electron J Geotech Eng* 2016; 21(7): 2467–2479.
- [39] Ghanizadeh A., Ziaie A. Nonpas: A Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements. *Int J Integr Eng* 2015; 7(1): 21–28.
- [40] Tunç A. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. İstanbul: Asil Yayın Dağıtım, 2004.