

Üstyapı Sayısı Değişmeyen AASHTO-93 Kesitlerinin Mekanistik-Ampirik Yöntemler ile Yol Ömrü Analizi

Betül KÖSE¹, Murat BOSTANCIOĞLU^{2*}

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

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

¹ betulkose5800@gmail.com, ² bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 03/01/2025;

Kabul/Accepted: 12/03/2025)

Öz: Türkiye karayollarının esnek üstyapı tasarımında regresyon tabanlı ampirik bir yöntem olan AASHTO-93 yöntemi kullanılmaktadır. Üstyapıyı oluşturan tabakaların mukavemet ve kalınlıklarına bağlı olarak hesaplanan üstyapı sayısı (SN) AASHTO yönteminde yol ömrünün hesaplanmasında kullanılan temel parametrelerden bir tanesidir. Yol sınıfı ve taban zemini taşıma gücü değişmeyen bir tasarımda SN değeri değişmedikçe yolun bozulana kadar taşıyabileceği standart dingil yükü sayısı değişmemektedir. Bu çalışmada geleneksel bir üstyapıyı oluşturan tabakaların kalınlıkları, SN değeri değişmeyecek şekilde 0,5-1,0-1,5 ve 2,0 cm olmak üzere 4 farklı değerde artırılmış veya azaltılmıştır. Oluşan SN artış veya azalışı diğer tabakalardan bir tanesinin kalınlığı değiştirilerek dengelenmiştir. Yeni oluşan ve AASHTO yöntemine göre yol ömrü değişmeyen kesitlerin mekanistik-ampirik yöntemler ile analizleri yapılarak yol ömrü değerlerindeki değişim oranları incelenmiştir. Çalışılan farklı kesitler arasında, yorulmaya bağlı kaplama ömründe (N_f) artış sağlayan kritik değişimler; bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakaların kalınlıklarının artması ve plent-miks temel (PMT) tabakasının kalınlığının azalması ile elde edilmiştir. Bitümlü tabakaların kendi içlerindeki kalınlık değişimleri yol ömrü değerlerini anlamlı bir oranda değiştirmemiştir. Tekerlek izinde oturmaya bağlı kaplama ömrü (N_r) hesabında ise BSK tabaka kalınlıklarının azaldığı ve oluşan SN farkının PMT kalınlığı artırımı ile dengelendiği kesitlerde N_r değerleri artmıştır.

Anahtar kelimeler: AASHTO-93 yöntemi, üstyapı sayısı, mekanistik-ampirik yöntem, tekerlek izinde oturma, yorulma.

Road Life Analysis of AASHTO-93 Sections with Fixed Structural Number Using Mechanistic-Empirical Methods

Abstract: AASHTO-93 method, which is a regression-based empirical method, is used in the flexible pavement design of Turkish highways. The structural number (SN), calculated depending on the strength and thickness of the layers forming the pavement, is one of the basic parameters used in the calculation of road life in the AASHTO method. In a design where the road class and subgrade bearing capacity do not change, the standard axle load number that the road can carry until it deteriorates does not change unless the SN value changes. In this study, the thicknesses of the layers forming a traditional flexible pavement were changed in 4 different values as 0.5-1.0-1.5 and 2.0 cm, so that the SN value does not change. The new sections, which did not change the road life according to the AASHTO method, were analyzed with mechanistic-empirical methods and the change rates in road life values were investigated. Among the different sections studied, the critical changes that provide an increase in the fatigue-related pavement life (N_f) were obtained by increasing the thickness of the bituminous hot mix asphalt (HMA) layers and decreasing the thickness of the plant-mix base (PMB) layer. The thickness changes within the bituminous layers did not change the road life values significantly. In the calculation of the pavement life (N_r) due to the rutting, N_r values increased in the sections where the HMA layer thicknesses decreased and the resulting SN difference was balanced with the increase in PMB thickness.

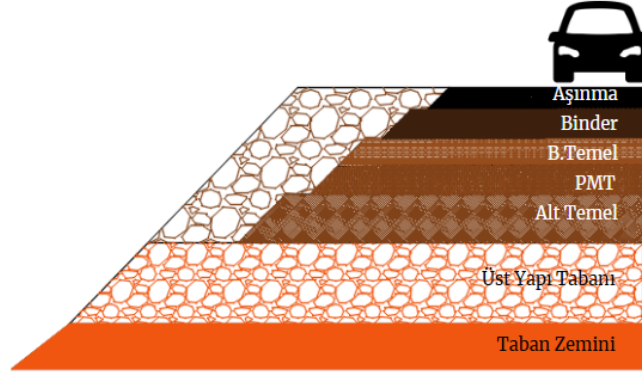
Key words: AASHTO-93 method, structural number, mechanistic-empirical method, rutting, fatigue.

1. Giriş

Ülkemizde yük taşımacılığının %76,1'i, yolcu taşımacılığının ise %95,2'si karayolu ile gerçekleştirilmektedir. Ulaşım türleri arasında yük ve yolcu taşımacılığında ilk sırada yer alan karayolu ulaşımı; aynı zamanda yatırım, bakım ve işletme maliyetleri açısından da ilk sırada yer almaktadır. Karayolu, yapım tekniği ve kullanılan malzeme özellikleri bakımından altyapı ve üstyapı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Karayollarının stabilite, konfor ve emniyetinden önemli ölçüde sorumlu olan üstyapılar yol yapım maliyetlerinin de büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Karayolu üstyapısı, yolun trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma

* Sorumlu yazar: bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr, Yazarların ORCID Numarası: ¹0009-0000-3748-5484, ²0000-0001-6820-2213

gücünü aşmayacak şekilde dağıtmak amacıyla altyapı üzerine alt temel, temel ve kaplama sıralamasıyla inşa edilen çok tabakalı bir yapıdır (Şekil 1) [1,2].



Şekil 1. Karayolu BSK kaplamalı esnek üstyapı yapı enkesiti.

Karayolu üstyapı tasarımı, trafik ve çevresel etkilere maruz kalan bir yolun, yeterli stabilite ve performans koşullarını sağlayabilmesi için gerekli tabaka kalınlıklarının hesaplanması ve bu tabakaları oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesidir [3].

Üstyapı tasarımında kullanılan yöntemler; tabaka kalınlığı için Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) değerinin kullanıldığı ampirik yöntem, Terzaghi taşıma gücü formülünün kullanıldığı kayma göçmesi sınır yöntemi, Burmister'in iki tabaka teorisinin kullanıldığı deplasman sınır yöntemi, arazi deneylerinden elde edilen regresyon denklemlerinin kullanıldığı American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) yöntemi ve Mekanistik-Ampirik (M-A) yöntem olarak beş ayrı kategoride incelenebilir [4-7].

AASHTO tasarım yöntemi 1950'li yılların sonunda ABD'nin Illinois eyaletinin Ottawa şehrinde farklı şekil ve kalınlıklarda inşa edilen kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalar sonucu elde edilen gözlem ve ölçümlere dayanarak geliştirilmiştir. Dizayn prosedürü ve elde edilen sonuçlar 1961 yılında geçici rehber şeklinde yayınlanmış ve 1972, 1986, 1993 ve 2002 yıllarında yayınlanan rehberler ile revize edilmiştir [8,9].

AASHTO yöntemine göre, bir yolun ekonomik ömrü boyunca geçirebileceği maksimum standart dingil yükü sayısı ($T_{8,2}$); taban zemini esneklik modülü (M_R), toplam standart sapma (S_0), standart normal sapma (Z_R), servis kabiliyeti indeksi kaybı (ΔPSI) ve üstyapı sayısına (SN) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 1). Eşitlik 1'de görüldüğü gibi proje şartları belirlenmiş bir yolda sabit bir taban zemini üzerinde SN (Eşitlik 2) değişmediği sürece yol ömründe ($T_{8,2}$) herhangi bir değişiklik olmamaktadır.

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

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

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.

Son yıllarda literatürde üstyapı tasarımında sıklıkla kullanılan M-A tasarım yönteminde trafik yükü, çevresel etkiler ve malzeme özellikleri gibi girdiler, temel mekanik denklemleri ile gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyonların hesabında kullanılmaktadır. Elde edilen mekanik tepki değerleriyle yolun bozulma ömrü hesaplanmaktadır. M-A tasarım yöntemlerinde kaplama tepki değerlerinin belirlenmesi (gerilme, birim şekil değiştirme, deplasman) yöntemin mekanik bölümünü oluştururken, bu tepki değerlerinden yol ömrünün elde edilmesi yöntemin ampirik bölümünü oluşturmaktadır [4,10,11].

Üstyapı tasarımında dikkate alınan temel iki bozulma tipi; tekerlek izinde oturma ve yorulma çatlağıdır. M-A tasarım yöntemlerinde tekerlek izinde oturma, taban zemini üzerindeki düşey birim şekil değiştirmeleriyle, yorulma bozulması ise kaplama altındaki yatay birim şekil değiştirme değerleri ile ifade edilmektedir. Bu sebeple yapılan mekanik analizlerde ilgili noktadaki tepki değerleri dikkate alınmaktadır [7,10,12].

Yorulma ve tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü hesabında kullanılan ampirik transfer denklemlerinin genel formülasyonları sırasıyla Eşitlik 3 ve 4'te, eşitliklerde kullanılan katsayılar ise Tablo 1'de verilmiştir.

$$N_f = f_1 \varepsilon_r^{-f_2} E_{yüzey}^{-f_3} \quad (3)$$

$$N_r = f_4 (\varepsilon_v)^{-f_5} \quad (4)$$

Eşitlik 3 ve 4'te,

- N_f : Yorulmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını,
 N_r : Tekerlek izinde oturmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını,
 $E_{yüzey}$: Yüzey tabakasının elastisite modülünü (psi),
 ε_r : Yatay çekme birim şekil değiştirmelerini,
 ε_v : Düşey basınç birim şekil değiştirmelerini belirtmektedir.

Tablo 1. Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları.

	AI*	Shell	USACE	BRRC	TRRL	FHWA	ILLINOIS	ARE
f_1	0,0795	0,0685	497,156	4,92E-14	1,66E-10	0,1001	5,00E-06	4,88E-01
f_2	3,291	5,671	5	4,76	4,32	3,565	3	30,312
f_3	0,854	2,363	2,66	0	0	1,474	0	0,6529
f_4	1,37E-09	6,15E-07	1,81E-15	3,05E-09	1,13E-06	-	-	-
f_5	4,477	4	6,527	4,35	3,75	-	-	-

AI: Asfalt Institute, Shell: Shell Research, USACE: US Army Corps of Engineers, BRRC: Belgian Road Research Center, TRRL: Transport and Road Research Laboratory, FHWA: Federal Highway Administration, ILLINOIS: Illinois Department of Transportation ARE: Austin Research Engineers

*Çalışmada yol ömrü analizlerinde AI yöntemi katsayıları kullanılmıştır

M-A yöntemler, yol ömrü hesabında tekerlek izinde oturma, yorulma ve pürüzlülük gibi farklı bozulma türlerini dikkate alması, tek bir coğrafi bölgede yapılan sınırlı test verisi yerine farklı yük, yüklenme tipi, dingil yapısı ve tabaka malzemesi gibi tasarım parametrelerine kolay uyum sağlayabilmesi ve malzemelerin lineer elastik, non-lineer elastik ve viskoelastik gibi çeşitli mekanik hallerde tanımlanabilmesi sebepleriyle Türkiye'de karayolu üstyapı tasarımında kullanılmakta olan AASHTO yöntemine kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır [11,13].

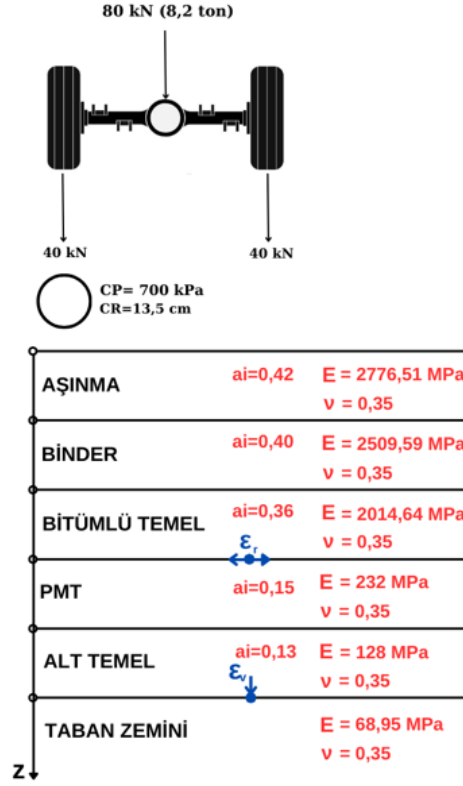
Bu çalışmada geleneksel bir üstyapı kesiti seçilerek kesitin SN değeri değişmeksizin tabaka kalınlıkları değiştirilmiştir. AASHTO yöntemine göre tasarım ömrü değişmeyen kesitlerin mekanik analizleri yapılarak kritik noktalardaki tepki değerleri belirlenmiştir. Ampirik transfer denklemleri ile hesaplanan yol ömrü değerleri AASHTO yöntemi ile karşılaştırılarak AASHTO denkleminin yeterliliği araştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada farklı güvenilirlik seviyeleri (R) ve $T_{8,2}$ değerleri için AASHTO kesitleri belirlenmiş ve kesitlerin tabaka kalınlıkları AASHTO tasarım denkleminde uygun olarak hesaplanmıştır. Alt temel kalınlığı 15 cm altında hesaplanan kesitler için alt temel kalınlığı 15 cm seçilerek analizler sürdürülmüştür. Oluşturulan geleneksel üstyapı kesitine ait bir gösterim Şekil 2'de, farklı R ve $T_{8,2}$ değerleri için hesaplanan tabaka kalınlıkları Tablo 2'de verilmiştir.

Çalışmada aynı SN sayısına sahip farklı kesitler oluşturmak amacıyla AASHTO kesitleri, Tablo 2'de hesaplanan tabaka kalınlıkları değiştirilerek yeniden düzenlenmiştir. Tabaka kalınlıkları 0,5-1,0-1,5-2,0 cm kalınlık değişimleri (h) ile artırılmış veya azaltılmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken esnek üstyapıyı oluşturan tabakalardan bir tanesinin kalınlığı yukarıda belirtilen miktarda artırılarak veya azaltılarak kesitler elde edilmiştir. Buna bağlı oluşan SN fazlalığı veya eksikliği diğer tabakalardan bir tanesinin kalınlığı artırılarak veya azaltılarak orijinal kesit SN değerine eşitlenmiştir. Kısaca, bu aşamada üstyapıyı oluşturan 5 tabakadan 2 tanesinin kalınlığı değişirken diğer 3 tabaka kalınlığı sabit bırakılmıştır. Bu işlem, yapılan analizlerde 20 farklı varyasyon ile çalışılmıştır (Tablo 3). Tablo 3'te + ve - sembolleri, ilgili tabakanın kalınlığının artırıldığını veya eksiltildiğini ifade etmektedir. A sütununda gösterilen tabakanın kalınlığı 0,5-2,0 cm aralığında değişirken B sütununda

gösterilen tabakanın kalınlığı aynı SN değerini verecek şekilde hesapla bulunmuştur. Yapılan bu işleme ait bir örnek 3 numaralı varyasyon için Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 2. Üstyapı kesiti.

Tablo 2. Tabaka kalınlıkları.

Trafik Kategorileri (Milyon)					
R %70	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*
Trafik Kategorileri (Milyon)					
R %85	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
Trafik Kategorileri (Milyon)					
R %95	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
ATemel	12,96 cm*	14,13 cm*	17 cm	20 cm	22 cm

* 15 cm olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 3. Tabaka kalınlık değişimleri.

	A	B		A	B
1. varyasyon	Aşınma +	Binder -	11. varyasyon	Aşınma -	Binder +
2. varyasyon	Aşınma +	B. Temel -	12. varyasyon	Aşınma -	B. Temel +
3. varyasyon	Aşınma +	PMT -	13. varyasyon	Aşınma -	PMT +
4. varyasyon	Binder +	Aşınma -	14. varyasyon	Binder -	Aşınma +
5. varyasyon	Binder +	B.temel -	15. varyasyon	Binder -	B. Temel +
6. varyasyon	Binder +	PMT -	16. varyasyon	Binder -	PMT +
7. varyasyon	B. Temel +	Aşınma -	17. varyasyon	B.temel -	Aşınma +
8. varyasyon	B. Temel +	Binder -	18. varyasyon	B.temel -	Binder +
9. varyasyon	B. Temel +	PMT -	19. varyasyon	B.temel -	PMT +
10. varyasyon	PMT +	A. Temel -	20. varyasyon	PMT -	A. Temel +

Tablo 4. SN hesabı örneği (R=%95, T_{8,2}=3-10m).

	Orijinal kesit		3. Varyasyon (0,5 cm değişim ile)	
	Tabaka kalınlıkları (cm)	SN orijinal	Tabaka kalınlıkları (cm)	SN
Aşınma	5	2,1	5,5	2,31
Binder	6	2,4	6	2,4
B. Temel	8	2,88	8	2,88
PMT	20	3,0	18,6	2,79
A. Temel	15	1,95	15	1,95
TOPLAM	54	12,33	53,1	12,33

Tablo 4'te R=%95 güvenilirlik değeri için 3 numaralı varyasyon, orijinal kesite 0,5 cm kalınlık değişimi ile uygulanmıştır. Buna göre aşınma tabakası kalınlığı 0,5 cm artırılırken oluşan SN fazlalığı PMT kalınlığının 1,4 cm düşürülmesi ile dengelenmiştir. Diğer tabakaların kalınlıklarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Toplam üstyapı kalınlığı orijinal kesit için 54 cm iken 3 numaralı varyasyonun uygulandığı kesitte toplam üstyapı kalınlığı 0,9 cm azalmıştır.

Orijinal kesitin ve oluşturulan yeni kesitlerin mekanik analizleri KENLAYER programı ile yapılmıştır. KENLAYER, tekil, dual, dual tandem ve dual tridem yüklemeler altındaki lineer elastik, non-lineer elastik ve viskoelastik tanımlanmış çok tabakalı sistemlerin deplasman, gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin bulunmasında kullanılan bir yazılımdır [11,14,15].

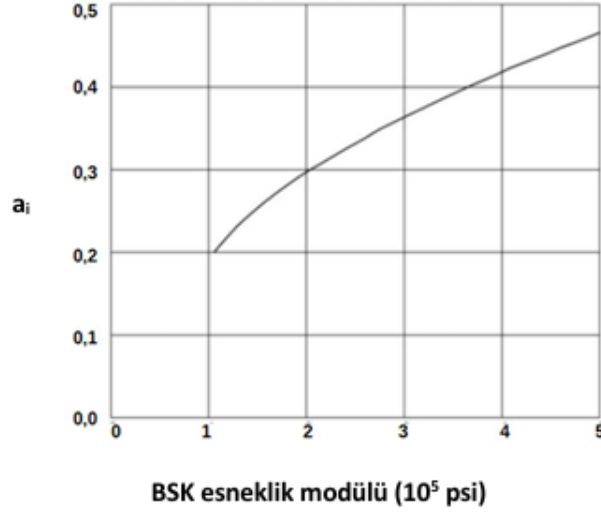
KENLAYER programında kesit analizleri için tabaka sayısı 6, kritik Z koordinat sayısı ise kaplama tabakası altı ve taban zemini üzeri olmak üzere 2 olarak belirlenmiştir. Tabaka tanımlamasında tabakalara ait kalınlıklar, elastisite modülleri ve Poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Yükleme tekil aks üzerindeki tekil tekerlek olarak tanımlanmış ve mekanik tepki değerleri yük ekseninden okunmuştur.

Bu çalışmada tabaka malzemeleri lineer elastik olarak tanımlanmış olup Elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) değerleri ile karakterize edilmiştir. Tabakaların elastisite modülleri, AASHTO yöntemine uyumlu biçimde seçilen izafi mukavemet katsayılarına (Şekil 2) [16] bağlı olarak

Şekil 3 ve Eşitlik 5-6 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 5 ve 6'da a_{temel} ve $a_{alttemel}$ sırasıyla temel ve alttemel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını, E_{temel} ve $E_{alttemel}$ ise sırasıyla temel ve alttemel tabakalarının elastisite modülü değerlerini (ψ) belirtmektedir. Poisson oranı değerleri tüm tabakalar için 0,35 alınmıştır [17,18].

$$a_{temel} = 0,249 * \log(E_{temel}) - 0,977 \quad (5)$$

$$a_{alttemel} = 0,277 * \log(E_{alttemel}) - 0,839 \quad (6)$$



Şekil 3. BSK için a_i-M_R dönüşüm grafiği.

Kesitlerin mekanik çözümlenmesinde aks yükü AASHTO yöntemi ile uyumlu şekilde ve 80 kN olarak dikkate alınmış ve bu yük akstaki tekil tekerleklere eşit olarak dağıtılmıştır (F=40 kN). Tekerlek temas basıncı (CP) 700 kPa olarak belirlenmiş ve bu basıncı sağlayan tekerlek temas yarıçapı (CR), Eşitlik 7 ile hesaplanmıştır.

$$CP = \frac{F}{\pi(CR)^2} \quad (7)$$

Taban zemini elastisite modülü, tüm kesitler için sabit ve literatür ile uyumlu şekilde 10000 psi (68,95 MPa) olarak analizlerde dikkate alınmıştır [6,17,19,20]. KENLAYER analizlerinde üstyapı tabakalarının temas durumu, yapışık (bonded) olarak belirlenmiştir [14,15,21].

Çalışmada 3 farklı R, 5 farklı T_{8,2}, 20 farklı varyasyon ve her varyasyonda 4 farklı kalınlık değişim değeri olmak üzere toplam 1200 yeni kesit üretilmiş ve analizler bu kesitler üzerinde sürdürülmüştür. Yapılan mekanik analizler sonucunda oluşan tüm kesitlerin tepki değerleri kaplama tabakası altından (ε_r) ve taban zemini üzerinden (ε_v) (Şekil 2) okunmuş ve yol ömrü değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, orijinal kesitin yol ömrü değerleri ile kıyaslanmıştır (Eşitlik 8).

$$(\%) \text{Yol Ömrü Değişimi} = \left[\frac{y_{(M-A)} - y_{\text{Orijinal}}}{y_{\text{Orijinal}}} \right] * 100 \quad (8)$$

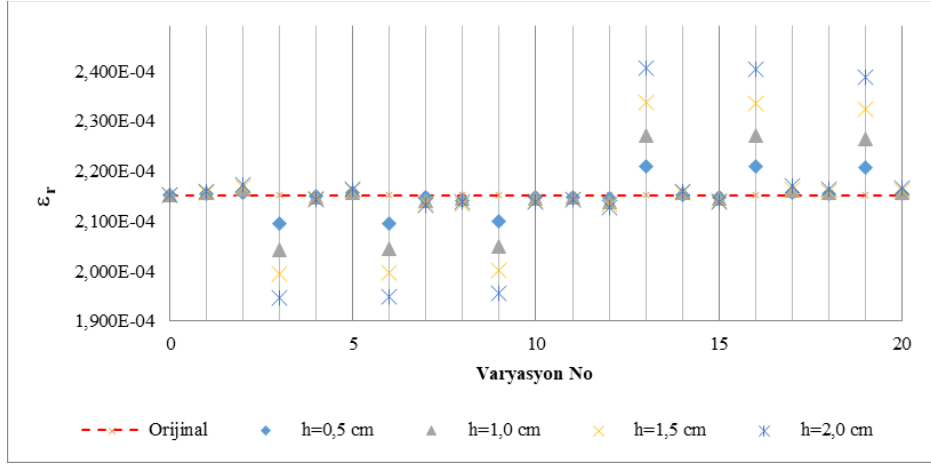
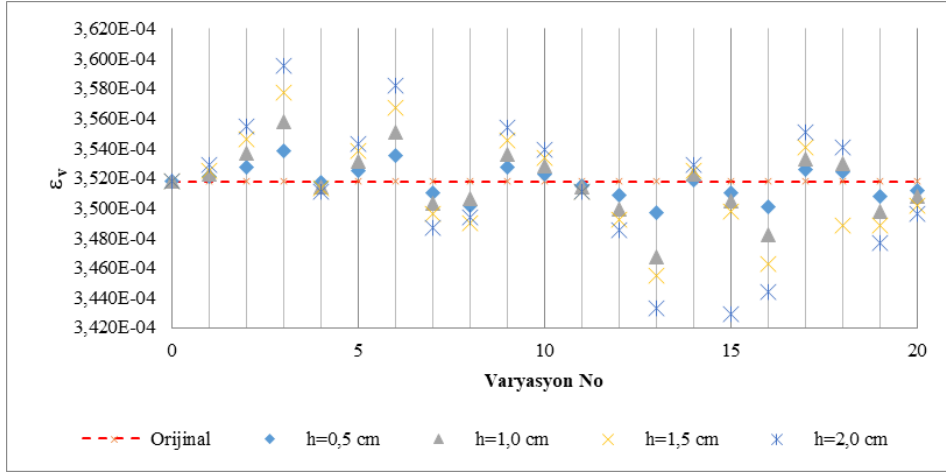
Eşitlik 8'de y_{Orijinal}, orijinal kesitin yol ömrü değerini, y_{M-A}, kalınlık değişimi ile elde edilen kesitin yol ömrü değerini ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

AASHTO yönteminin önerdiği farklı R ve T_{8,2} değerlerine sahip kesitler için Tablo 3'te verilen varyasyonlar 0,5-1,0-1,5 ve 2,0 cm kalınlık değişimleri ile ayrı ayrı uygulanarak oluşan tüm yeni kesitlere ait mekanik tepki değerleri belirlenmiş ve bu tepkilere bağlı olarak yol ömrü değerleri hesaplanmıştır.

R=%95 ve T_{8,2}=3-10m alınarak farklı h değerlerine bağlı elde edilen kesitlerin ε_r ve ε_v değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde; 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı varyasyonlar dışındaki kesitlerin ε_r değerlerinin orijinal kesite kıyasla çok önemli değişiklikler göstermediği belirlenmiştir. Ancak 3-6-9 ve 13-16-19 kesitlerinde özellikle h=2,0 cm olan varyasyonlarda ε_r değerlerinin orijinal kesite kıyasla -%9,53 ile %11,80 oranında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir (Tablo5).

Şekil 4. ϵ_r değerleri ($R=\%95$, $T_{8,2}=3-10m$).Şekil 5. ϵ_v değerleri ($R=\%95$, $T_{8,2}=3-10m$).Tablo 5. $R=\%95$ ve $T_{8,2}=3-10m$ için ϵ_r ve ϵ_v değişim oranları (%).

VN	ϵ_r	% Değişim	VN	ϵ_v	% Değişim
Orijinal	2,152E-04		Orijinal	3,518E-04	
3	1,947E-04	-9,53	3	3,595E-04	2,19
6	1,949E-04	-9,43	6	3,582E-04	1,82
9	1,956E-04	-9,11	9	3,554E-04	1,02
13	2,406E-04	11,80	13	3,433E-04	-2,42
16	2,403E-04	11,66	16	3,444E-04	-2,10
19	2,388E-04	10,97	19	3,477E-04	-1,17

3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler incelendiğinde bu altı kesitin tamamında BSK olarak üretilen tabakalardaki SN artış veya azalışının, granüler PMT tabakası ile dengelendiği görülmektedir. BSK ve PMT tabakalarının malzeme kaliteleri ve buna bağlı olarak değişen izafi mukavemet katsayıları arasındaki farklılığın bu sonucu ortaya çıkardığı düşünülmektedir.

3,6 ve 9 numaralı kesitlerde BSK tabakaların kalınlıkları artarken ortaya çıkan SN fazlalığı PMT tabakasının kalınlığını azaltarak dengelenmiştir. Bu durumda kesit, her ne kadar üstyapı sayısı olarak değişikliğe uğramasa da, mekanik olarak güçlenmiş ve ϵ_r değerleri azalmıştır.

13,16 ve 19 numaralı kesitlerde ise 3,6 ve 9 numaralı kesitlerin aksine BSK tabakaların kalınlıkları azalmış ve ortaya çıkan SN azalışı, PMT kalınlığı artırılarak dengelenmiştir. Mekanik olarak güçlü tabakalarının kalınlığının azalması üstyapı kesitlerinde ϵ_r değerlerini artırmıştır.

Tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü hesabında temel tasarım parametresi olarak dikkate alınan ϵ_v değerlerinin kesit tipine bağlı değişimini gösteren

Şekil 5 incelendiğinde, ϵ_r değerlerinde olduğu gibi 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitlerde ϵ_v değişimin orijinal kesite kıyasla daha belirgin olduğu görülmektedir. Değişim oranları -%2,42 ile %2,19 arasında elde edilmiştir (Tablo 5). ϵ_r değişim oranları ile ϵ_v değişim oranları kıyaslandığında ϵ_v değerlerindeki değişimin daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, aynı SN sayısına sahip kesitlerde, BSK tabakaları ile granüler tabakaların SN dengesini sağlayacak şekilde kalınlık değişimlerinin, yorulmaya bağlı yol ömründe daha etkili bir parametre olduğunu açıkça göstermektedir.

3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler kendi aralarında incelendiğinde 9 ve 19 numaralı kesitlerin diğerlerine kıyasla ϵ_r ve ϵ_v değişim oranlarının daha düşük olduğu gözlenmektedir. ϵ_r ve ϵ_v değişim oranlarında tespit edilen bu azalma, ilgili kesitlerde izafi mukavemet katsayıları birbirlerine daha yakın olan Bitümlü temel ve PMT tabakalarının değişiminden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5 incelendiğinde BSK-Granüler tabaka değişimine yakın bir değişim durumu, aşınma-bitümlü temel değişimi için de tespit edilmiştir (2-7-12-17 numaralı varyasyonlar). BSK olarak üretilen tabakaların en üst ve en altında yer alan bu iki tabakanın aynı SN sayısını sağlayacak şekilde kalınlık değişimleri, tekerlek izinde oturma bozulmasında 2. derece öneme sahip bir unsur olarak dikkate alınmalıdır.

Çalışmada analiz edilen farklı kesitlerdeki mekanik tepkilerin trafik yüküne bağlı duyarlılıklarını belirlemek amacıyla aynı R ve h değerlerine sahip kesitlerin değişen trafik yüklerine bağlı olarak hesaplanan ϵ_r ve ϵ_v değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde tüm kesitler için artan trafik yüküne bağlı olarak ϵ_r ve ϵ_v değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum artan trafik yüküne bağlı olarak AASHTO yönteminin önerdiği kesitlerin daha rijit olması ile açıklanabilir.

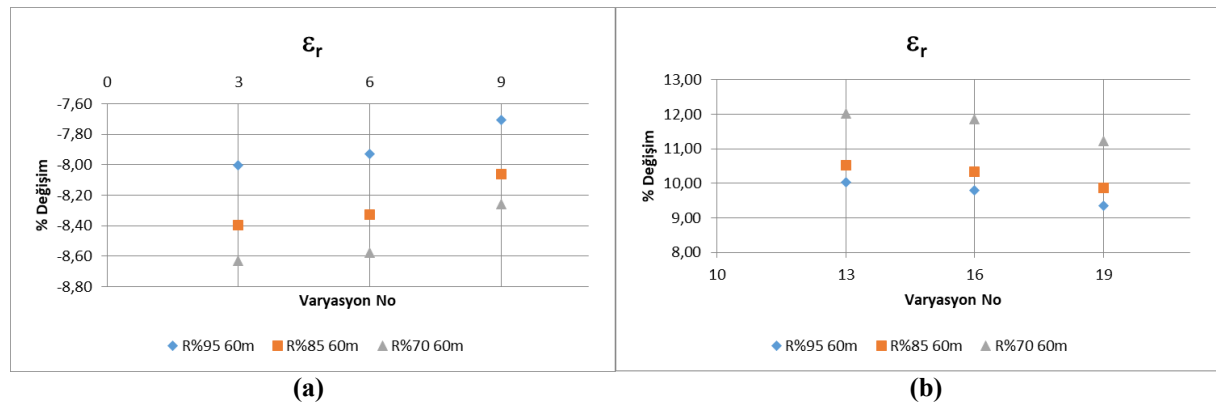
Tablo 6. Farklı $T_{8,2}$ değerine göre ϵ_r ve ϵ_v değerleri (R=%95, h=2,0cm)

VN	$T_{8,2}=25-30m$		$T_{8,2}=50-65m$		$T_{8,2}=100-130m$		$T_{8,2}=200-250m$	
	ϵ_r	ϵ_v	ϵ_r	ϵ_v	ϵ_r	ϵ_v	ϵ_r	ϵ_v
0	1,590E-04	2,720E-04	1,337E-04	2,269E-04	1,138E-04	1,890E-04	9,764E-05	1,622E-04
1	1,596E-04	2,726E-04	1,341E-04	2,273E-04	1,141E-04	1,892E-04	9,790E-05	1,624E-04
2	1,606E-04	2,743E-04	1,350E-04	2,285E-04	1,148E-04	1,902E-04	9,848E-05	1,631E-04
3	1,454E-04	2,772E-04	1,230E-04	2,308E-04	1,052E-04	1,918E-04	9,075E-05	1,644E-04
4	1,585E-04	2,716E-04	1,333E-04	2,267E-04	1,134E-04	1,888E-04	9,737E-05	1,621E-04
5	1,600E-04	2,736E-04	1,345E-04	2,281E-04	1,145E-04	1,899E-04	9,819E-05	1,629E-04
6	1,455E-04	2,764E-04	1,231E-04	2,302E-04	1,053E-04	1,914E-04	9,082E-05	1,641E-04
7	1,576E-04	2,702E-04	1,326E-04	2,256E-04	1,129E-04	1,880E-04	9,689E-05	1,615E-04
8	1,581E-04	2,705E-04	1,330E-04	2,258E-04	1,132E-04	1,881E-04	9,713E-05	1,615E-04
9	1,459E-04	2,746E-04	1,234E-04	2,289E-04	1,055E-04	1,904E-04	9,098E-05	1,633E-04
10	1,582E-04	2,737E-04	1,330E-04	2,283E-04	1,132E-04	1,901E-04	9,714E-05	1,631E-04
11	1,585E-04	2,717E-04	1,333E-04	2,267E-04	1,135E-04	1,889E-04	9,738E-05	1,621E-04
12	1,574E-04	2,700E-04	1,325E-04	2,255E-04	1,128E-04	1,879E-04	9,681E-05	1,614E-04
13	1,760E-04	2,666E-04	1,471E-04	2,229E-04	1,244E-04	1,860E-04	1,061E-04	1,599E-04
14	1,596E-04	2,726E-04	1,342E-04	2,273E-04	1,141E-04	1,893E-04	9,791E-05	1,624E-04
15	1,580E-04	2,704E-04	1,329E-04	2,257E-04	1,131E-04	1,881E-04	9,708E-05	1,615E-04
16	1,757E-04	2,672E-04	1,468E-04	2,233E-04	1,242E-04	1,863E-04	1,059E-04	1,601E-04
17	1,604E-04	2,740E-04	1,349E-04	2,284E-04	1,147E-04	1,901E-04	9,840E-05	1,630E-04
18	1,599E-04	2,735E-04	1,345E-04	2,280E-04	1,144E-04	1,898E-04	9,815E-05	1,628E-04
19	1,749E-04	2,692E-04	1,462E-04	2,248E-04	1,238E-04	1,874E-04	1,056E-04	1,610E-04
20	1,600E-04	2,703E-04	1,345E-04	2,255E-04	1,144E-04	1,879E-04	9,819E-05	1,613E-04

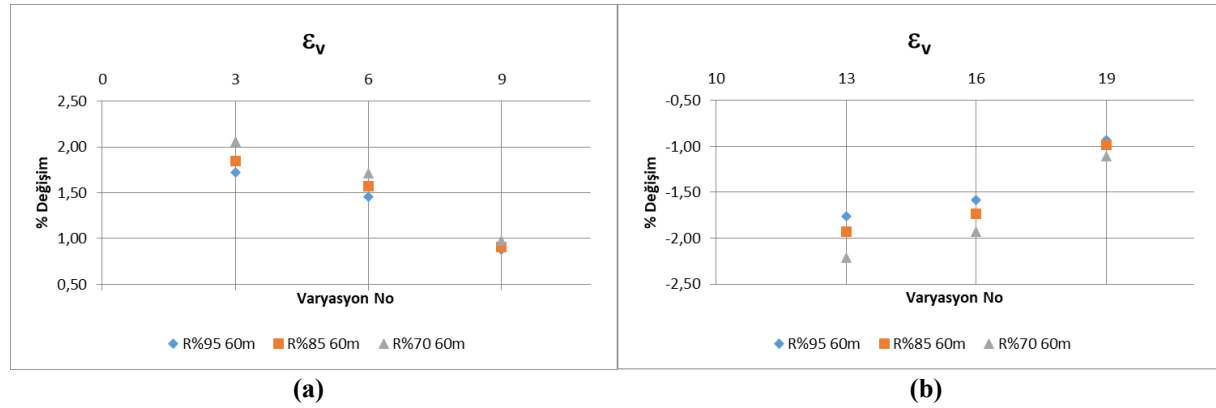
Tablo 6'da ε_r ve ε_v için maksimum değerler her sütunda koyu vurgu ile gösterilmiştir. En yüksek ε_r değerleri tüm trafik yükleri için 13 numaralı varyasyonda (Aşınma-PMT+) gözlenirken, en yüksek ε_v değerleri 3 numaralı varyasyonda (Aşınma-PMT-) gözlenmiştir.

AASHTO yönteminde farklı yol sınıfları için bir tasarım parametresi olarak dikkate alınan güvenilirlik değerinin etkilerini incelemek amacıyla Tablo 2'de verilen farklı $T_{8,2}$ değerlerinden 3 güvenilirlik değerinin tamamında ortak olarak yer alan $T_{8,2}=60m$ değeri için ε_r değişim oranları 3-6-9 numaralı kesitler için Şekil 6 (a)'da, 13-16-19 numaralı kesitler için Şekil 6 (b)'de ve ε_v değişim oranları 3-6-9 numaralı kesitler için Şekil 7 (a)'da, 13-16-19 numaralı kesitler için Şekil 7 (b)'de verilmiştir.

Bu analizde yalnızca, ε_r ve ε_v tepkileri üzerinde en etkin değişimi sağlayan 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı varyasyonlar kullanılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde ε_v değerlerinin güvenilirlik değişimine karşı duyarlılıklarının az olduğu, ε_r değerlerinde ise güvenilirlik seviyesi arttıkça ε_r değişim oranının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, yol sınıfının iyileşmesine bağlı olarak, önerilen üstyapı kesitinin daha kararlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. $T_{8,2}=60$ Milyon değeri için ε_r % değişim a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.



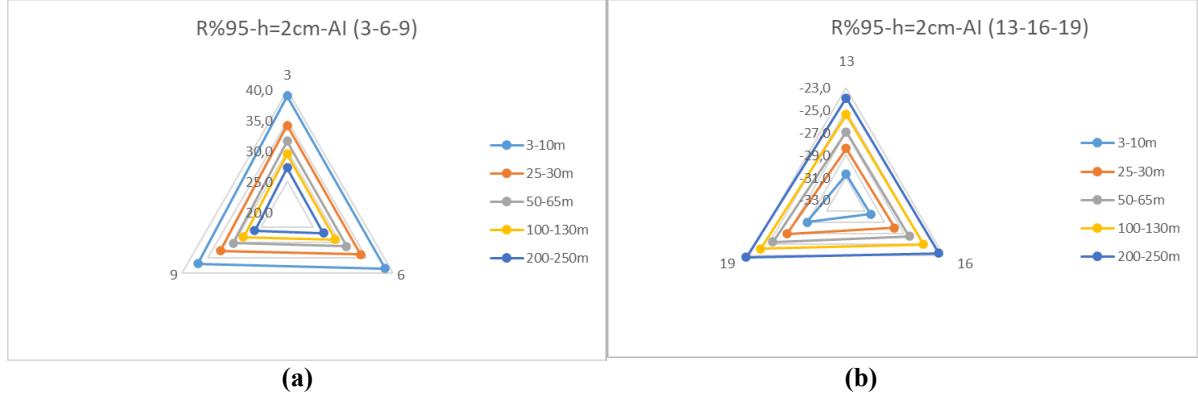
Şekil 7. $T_{8,2}=60$ Milyon değeri için ε_v % değişim a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.

R=%95 güvenilirlik seviyesinde farklı $T_{8,2}$ değerleri için önerilen kesitlerin ε_r tepkilerine bağlı olarak AI yöntemi katsayıları ile (Tablo 1) hesaplanan Nf değerlerinin orijinal kesitin yol ömrüne kıyasla değişim oranları 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler için sırasıyla Şekil 8 (a) ve Şekil 8 (b)'de; ε_v tepkilerine bağlı olarak hesaplanan Nr değerlerinin orijinal kesitin yol ömrüne kıyasla değişim oranları 3-6-9 ve 13-16-19 numaralı kesitler için sırasıyla Şekil 9 (a) ve Şekil 9 (b)'de verilmiştir.

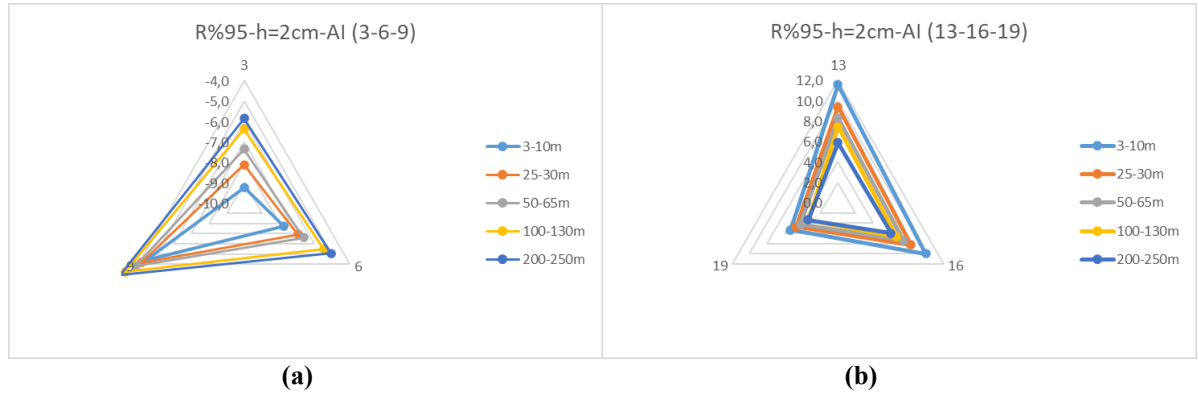
Şekil 8 incelendiğinde SN değeri aynı kalmasına rağmen tabaka kalınlıklarında yapılan değişikliklerin, yolun yorulmaya bağlı ömründe -%31 ile %40 arasında değişikliğe sebep olduğu görülmektedir. Bu durum oldukça dikkat çekicidir. $T_{8,2}$ değerinin artmasına bağlı olarak yorulmaya bağlı yol ömrü değerlerindeki değişimin azaldığı

görülmektedir. Bu durum, daha öncede belirtildiği gibi artan trafiğe bağlı olarak önerilen kesitlerin daha kararlı yapıda olması ile ilişkilendirilebilir.

Tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü değişimini gösteren Şekil 9 incelendiğinde ise aynı SN değerine sahip kesitlerdeki kalınlık değişiminin -%9 ile %12 aralığında yol ömrünü etkilediği görülmektedir.



Şekil 8. AI yöntemi için N_f değişim oranları (%) (R%95, h=2,0 cm) a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.



Şekil 9. AI yöntemi için N_r değişim oranları (%) (R%95, h=2,0 cm) a) 3-6-9 numaralı kesitler b) 13-16-19 numaralı kesitler.

Yol ömrü değerlerinde ortaya çıkan bu değişimler, çalışmanın amacı ile örtüşmektedir. AASHTO yönteminde aynı SN değerine sahip kesitlerinin yol ömrü değerleri değişmezken, M-A yöntem ile elde edilen bu büyük değişim oldukça kayda değerdir.

Mevcut çalışmada yapılan analizlerden elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde; aynı SN değerine sahip olsalar dahi, mevcut bir üst yapı kesitinde asfalt kaplama tabakası kalınlığının, bağlayıcısız granüler tabaka kalınlıklarının, tabakaların mekanik tanımlamalarının ve mekanik tepki okuma noktalarının yüke uzaklık değerlerindeki değişmelerin mekanik tepkiler üzerinde oldukça etkili parametreler olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca yol ömrü hesabında kullanılan bozulma tipinin bir diğer önemli parametre olduğu net bir şekilde ortaya koyulmuştur. Çalışma bulguları, literatürde AASHTO yöntemi ile ilgili ortaya konulan; yalnızca lokal test şartlarına bağlı bir denklem olması, kaplama içerisinde farklı derinliklerde ortaya çıkan mekanik tepkileri ve buna bağlı farklı bozulma türlerini dikkate almıyor olması, yalnızca eşdeğer standart dingil yüküne odaklanırken farklı yükleme tipleri ve yükleme hızlarına adaptasyonunun olmaması, iklimsel değişiklikler ve buna bağlı ortaya çıkan tabaka elastisite modülü azalmalarının göz ardı ediliyor olması, dinamik yük etkisinin analiz edilmeyişi şeklindeki eleştirileri destekleyici bir konumdadır [22-30].

4. Sonuçlar ve Öneriler

Aynı SN sayısına sahip ancak tabaka kalınlıklarının değiştiği kesitlerde yapılan mekanik analizlerin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Türkiye Karayollarının esnek üstyapı tasarımında kullanılan AASHTO-93 yöntemi, yol ömrü hesabında taban zemini üzerindeki üstyapı sayısına odaklanmaktadır. Aynı SN değerinin farklı kombinasyonlar ile elde edildiği kesitlerde AASHTO yöntemine göre yolun bozulma ömrü değişmezken yapılan mekanik analizlerde kesit içerisindeki kritik noktalarda mekanik tepki değerlerinin (gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyonlar) değiştiği görülmektedir.
- BSK olarak üretilen tabakaların ve bağlayıcısız granüler tabakaların aynı SN değerini sağlayacak şekilde kendi aralarında kalınlık değişimleri, mekanik tepki ve yol ömrü değerlerini belirgin bir şekilde etkilememektedir. Bu koşullarda AASHTO yöntemi kararlı bir üstyapı kesiti öngörmektedir. Ancak BSK olarak üretilen tabakaların granüler tabakalar ile aynı SN değerini sağlayacak şekilde kalınlık değişimleri durumunda mekanik tepki değerleri ve yol ömürleri önemli ölçüde değişmektedir. Bu durum yol ömrü hesabında dikkate alınan kritik tepki değerlerinin elde edildiği noktaların z koordinatlarının ve aynı zamanda ilgili noktaya etki eden gerilmenin değişmesi ile ilgilidir. Kısacası M-A yöntemlerin tasarımında dikkate aldığı en önemli parametre olan mekanik tepki değişimi AASHTO yönteminde dikkate alınmamaktadır.
- Yüksek trafik hacmine ve dingil yüküne maruz kalan yollarda herhangi bir malzeme modifikasyonu yapılmadan ve AASHTO yöntemi ile yapılan tasarımdaki SN değeri değişmeden tabaka kalınlıklarında yapılacak düzenlemeler yolun bozulma ömrünü önemli ölçüde artırabilir.
- Bu çalışmada yapılan analizlerde tabaka malzemeleri lineer elastik olarak tanımlanmış ve sonuçlar bu karakterizasyona bağlı olarak elde edilmiştir. BSK tabakaların viskoelastik, granüler tabakaların non-lineer elastik olarak tanımlanması sonuçları etkileyebilecek potansiyele sahip parametrelerdir. Malzeme karakterizasyonundaki değişimi dikkate alacak analizler ilerdeki çalışma önerisi olarak sunulabilir.
- Türkiye karayollarında son yıllarda sürekli artma eğiliminde olan trafik ve yük değerlerinin, ayrıca geniş bir coğrafyaya yayılan ülkemizde doğu-batı, kuzey-güney akslarında görülen iklimsel değişimlerin dikkate alınması amacıyla mekanistik-ampirik yöntemin üst yapı tasarımında önemle değerlendirilmesi gereken bir tasarım yöntemi olduğu, kaplama tasarımında iklim, trafik ve malzeme özelliklerine bağlı lokal kalibrasyonların yapılmasının gerekliliği bu çalışmanın diğer önemli önerileri olarak sıralanabilir.

Yazar Katkısı

Konunun önerilmesi M.B., Analizlerin yapılması ve grafiklerin oluşturulması B.K., Sonuçların yorumlanması ve değerlendirilmesi M.B., B.K., Makalenin yazılması B.K.

Kaynaklar

- [1] Hacıoğlu S. Esnek üstyapılı yollarda çatlak tamir yöntemi uygulanarak asfalt ömrünün uzatılması. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2013.
- [2] İnanlı B. Mekanistik ampirik üstyapı tasarımının mevcut bir yolda kullanılması ve bakım/onarımın performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2016.
- [3] Kök E. Karayolu ve havaalanı üstyapı tasarım yöntemleri, karşılaştırması ve Türkiye uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [4] Huang YH. Pavement Analysis and Design (2nd ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [5] Tunç A. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. Ankara: Asil Yayın Dağıtım, 2004
- [6] Mashayekhi M, Amini AA, Behbahani H, Nobakht S. Comparison of mechanistic-empirical and empirical flexible pavement design procedures of AASHTO: a case study. International Conference Bituminous Mixtures and Pavements; 2011; Thessaloniki, Greece. 319–28.
- [7] Bostancıoğlu M. AASHTO-93 yönteminin mekanistik ampirik tasarım yöntemleri ile uyumunun belirlenmesi. Türk Doğa ve Fen Dergisi 2020; 9(2): 64–75.
- [8] Tunç A. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Ankara: Nobel Akademi Yayıncılık; 2001.
- [9] İncegül M. Bilgisayar destekli üstyapı tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
- [10] Mousa MR, Abo-Hashema MA, Gadallah AA, Mousa RM. Evaluation of pavement performance prediction models under different traffic and climatic conditions. 14th International Conference on Asphalt, Pavement Engineering, and Infrastructure; 2015; 1–19.

- [11] Bostancıoğlu M. Mekanistik ampirik esnek üstyapı tasarım modellerinin tabaka kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak karşılaştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 11(1): 91-102.
- [12] Behiry AEAEM. Fatigue and rutting lives in flexible pavement. Ain Shams Eng J 2012; 3(4): 367-374.
- [13] Carvalho RL, Schwartz CW. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical versus NCHRP project 1-37a mechanistic-empirical. Transp Res Rec 2006; 1947(1): 167-174.
- [14] 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 :112-9.
- [15] Chegenizadeh A, Keramatikerman M, Nikraz H. Flexible pavement modelling using Kenlayer. Electron J Geotech Eng 2016; 21(7): 2467-2479.
- [16] Sağlık A, Güngör AG. Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008.
- [17] Hadi MNS, Bodhinayake BC. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. Adv Eng Software 2003; 34(11-12): 657-662.
- [18] Sarkar A. Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. Int J Pavement Eng 2016; 17(5): 377-387.
- [19] Ekwulo E, Eme D. Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. Afr J Environ Sci Techno 2009; 3(12): 412-421.
- [20] Samad E. Sensitivity analysis in flexible pavement performance using mechanistic empirical method (Case study: Cirebon-Losari road segment, West Java). Civ Engineering Forum 2011; 20: 1163-1174.
- [21] Ghanizadeh A, Ziaie A. Nonpas: a program for nonlinear analysis of flexible pavements. Int J Integr Eng 2015; 7(1): 21-28
- [22] Zhao J, Wang H. Mechanistic-empirical analysis of asphalt pavement fatigue cracking under vehicular dynamic loads. Constr Build Mater 2021; 284: 122877.
- [23] Ahmet F, Thompson J, Kim D, Huynh N, Carrol E. Evaluation of pavement service life using AASHTO 1972 and mechanistic-empirical pavement design guides. Int J Transp Sci Technol 2023; 12: 46-61.
- [24] Çelik ON, Eyada SO. Assessment of flexible pavement fatigue life of turkish typical sections using mechanistic empirical pavement design approach for coastal region. Ain Shams Eng J 2019; 10: 33-43.
- [25] Shakhan MR, Topal A, Şengöz B. Data collection for implementation of the mechanistic empirical pavement design guide (MEPDG) in Izmir, Turkey. Turk J Civ Eng 2021; 32: 11361-11380.
- [26] Le AT, Lee HJ, Park HM, Kim TW. Development of Korean pavement design guide for asphalt pavements based on the mechanistic-empirical design principle. Balt J Road Bridge Eng 2011; 6: 169-176.
- [27] Toth C, Primusz P. New Hungarian mechanistic-empirical design procedure for asphalt pavements. Balt. J. Road Bridge Eng. 2020; 15: 161-186.
- [28] Fuhaid AFA, Arifuzzaman M, Gul MA. Application of mechanistic empirical pavement design guide software in Saudi Arabia. Appl Sci-Basel 2022; 12: 8165.
- [29] Diaz MM, Perez I. Mechanistic-empirical pavement design guide: features and distinctive elements. Rev Constr 2015; 14: 32-40.
- [30] Kaimo LT, Sargado JM, Jr DP. Flexible Pavement Design Using Mechanistic Empirical Pavement Design Guide in the Philippines. International Journal of Geomate 2019; 17: 9-17.