



## AASHTO-93 Yönteminin Mekanistik Ampirik Tasarım Yöntemleri İle Uyumunun Belirlenmesi

Murat BOSTANCIOĞLU<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye  
 Murat BOSTANCIOĞLU ORCID No: 0000-0001-6820-2213

\*Sorumlu yazar: [bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr](mailto:bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr)

(Alınış: 05.05.2020, Kabul: 19.10.2020, Online Yayınlanma: 30.12.2020)

**Anahtar Kelimeler**  
 AASHTO,  
 Mekanistik  
 ampirik  
 tasarım,  
 Transfer  
 fonksiyonu,  
 Esnek üst  
 yapı tasarımı

**Öz:** Esnek üst yapı tasarımında kullanılan ve ampirik bir yöntem olan AASHTO yönteminin, değişen yük, yükleme durumu, tabaka malzemelerinin tanımlanması ve çevresel koşullar gibi parametrelere uyumunun sağlanması amacıyla mekanistik-ampirik (M-A) yöntemler ile kıyas ve entegrasyonunun sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada geleneksel bir esnek üst yapı kesitinin, bitümlü sıcak karışım (BSK) yüzey tabakası ile temel tabakasının değişen kalınlık ve rijitlik oranlarına bağlı olarak yol ömrü analizleri AASHTO ve M-A yöntem kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. M-A yöntemde farklı transfer denklemleri kullanılmış ve bu transfer denklemleri arasında AASHTO yöntemi ile en uyumlu sonucu veren denklemler tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yorulmaya bağlı Shell modeli ile tekerlek izinde oturmaya bağlı Ulaşım ve Yol Araştırma Laboratuvarı modellerinin AASHTO yöntemine en uyumlu sonuçlar veren iki model olduğu tespit edilmiştir.

## Determining the Compatibility of AASHTO-93 Method with Mechanistic Empirical Design Methods

**Keywords**  
 AASHTO,  
 Mechanistic  
 empirical  
 design,  
 Transfer  
 function,  
 Flexible  
 pavement  
 design

**Abstract:** AASHTO method, which is an empirical method used in flexible pavement design, must be compared and integrated with mechanistic-empirical (M-E) methods to ensure compliance with parameters such as changing load, loading condition, layer materials, and environmental conditions. In this study, pavement life analyses of a traditional flexible pavement cross-section based on the varying thickness and stiffness ratios of the bituminous hot mix surface layer and the base layer were made using the AASHTO and M-A method, and the results were compared. Different transfer equations are used in the M-A method, and the equations that give the most compatible results with the AASHTO method are tried to be determined. As a result of the analysis, it has been determined that the Shell model due to fatigue and the Transport and Road Research Laboratory models based on rutting are the two models that give the most compatible results to the AASHTO method.

### 1. GİRİŞ

Esnek üst yapılar, karayolu taşıtlarının konfor ve güvenliklerinin sağlanması ve trafik yükleri ile çevresel etkilere karşı direnç gösterilebilmesi amaçları ile taban zemini üzerine inşa edilen granüler alt temel ve temel tabakaları ile bitümlü yüzey tabakalarından inşa edilmektedir [1].

Üst yapı tabakalarının, trafik yükleri ve çevresel etkiler altında, proje ömrü boyunca bozulmadan hizmet verebilmesi için gerekli ve uygun kalınlıkların hesabı ise üst yapı tasarımı olarak tanımlanmaktadır [2].

Üst yapı tasarımında kullanılan yöntemler, ampirik yöntemler, kayma göçmesi sınırlama yöntemi, deplasman sınırlama yöntemi, regresyon yöntemi ve mekanistik-ampirik (M-A) yöntemler olmak üzere beş ayrı kategoride incelenebilir [3].

Üst yapı dizaynında kullanılan ilk yöntemler arasında sayılabilecek [4,5] ampirik yöntemlerin en olumsuz yönü, yöntemin sadece ilgili deney seti (malzeme, çevresel koşullar ve yükleme koşulları) için geçerli olmasıdır. Eğer bu koşullar değişir ise yöntem geçerliliğini yitirmektedir [3].

Yol testlerine bağlı geliştirilen denklemlerin üst yapı tasarımında kullanıldığı ve Türkiye Karayolları Genel

Müdürlüğü tarafından da esnek üst yapıların tasarımında kullanılan [6] AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials) yöntemi regresyon yöntemlerine verilebilecek en önemli ve geçerli örneklerden bir tanesidir [7].

Ottawa Illinois yol testlerinden belirli bir deney seti ve çevresel koşul için türetilen AASHTO yönteminde de en önemli dezavantajlar, ampirik yöntemlerde olduğu gibi dizayn denklemlerinin sadece ilgili test yolu kesiti için geçerli olması ve yöntemin, malzeme ve test yolu imalatı ile ilgili çok sayıda belirsizlik içermesidir [3,7,8]. Bu sebeple AASHTO yöntemi gibi ampirik tabanlı yöntemlerin üst yapı tasarımında kullanılması sorgulanmaktadır [9,10].

M-A tasarım yöntemleri yük, yükleme alanı, yükleme koşulları, çevresel koşullar ve tabaka malzemelerinin tanımlanması gibi üst yapı tasarımında çok önemli yer tutan ve sonuçlara etki eden parametrelerin değişimine karşı uyum gösterebilen [11–13] ve son zamanlarda sıklıkla kullanılan bir üst yapı tasarım yöntemidir [14–18].

Mekanistik-ampirik (M-A) tasarım yöntemlerinde tekerlek yükü, malzeme özellikleri ve çevresel etkiler gibi girdiler, temel malzeme mekaniği kullanılarak gerilme ve birim şekil değiştirme hesabında kullanılmakta ve elde edilen bu mekanik tepki değerleri ile yolun bozulma ömrü tahmin edilmektedir [3,19].

Gerilme, birim şekil değiştirme veya deplasman gibi kaplama tepkilerinin belirlenmesi M-A yöntemlerin

“mekanistik” bölümünü oluştururken, bu tepkilerin laboratuvar deneyleri veya arazi performans verileri ile birleştirilerek tekerlek izinde oturma veya yorulma gibi temel bir göçme tipine bağlı kaplama tasarım ömrünün belirlenmesi ise “ampirik” bölümü oluşturmaktadır [3,10].

Mekanik tepkilerin ampirik transfer fonksiyonları ile kaplama ömrüne dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan göçme tipleri yorulma ve tekerlek izinde oturmadır. Yorulmaya bağlı göçme, mekanik tepkilerden yüzey tabakası altında oluşan yatay çekme birim şekil değiştirmeleri ile ilişkilendirilirken tekerlek izinde oturmaya bağlı göçme ise taban zemini üzerinde meydana gelen düşey basınç birim şekil değiştirmeleri ile ilişkilendirilmektedir [10,19].

Yorulma ve tekerlek izinde oturmaya bağlı kaplama ömrü tahmin modellerinin genel formülasyonları 1 ve 2 numaralı eşitliklerde, eşitliklerde kullanılan katsayılar Tablo 1’de verilmiştir.

$$N_f = f1\varepsilon_r^{-f2}E_{yüzey}^{-f3} \quad (1)$$

$$N_r = f4(\varepsilon_v)^{-f5} \quad (2)$$

Burada,  $N_f$  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 ( $\psi$ ) belirtmektedir.

**Tablo 1.** Farklı kuruluşlar için bozulma modeli katsayıları [19]

	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL	FHWA	ILLINOIS	ARE
<b>f1</b>	0,0795	0,0685	497,156	4,92E-14	1,66E-10	0,1001	5,00E-06	4,88E-01
<b>f2</b>	3,291	5,671	5	4,76	4,32	3,565	3	3,0312
<b>f3</b>	0,854	2,363	2,66	0	0	1,474	0	0,6529
<b>f4</b>	1,37E-09	6,15E-07	1,81E-15	3,05E-09	1,13E-06	---	---	---
<b>f5</b>	4,477	4	6,527	4,35	3,75	---	---	---

Tablo 1’de görüldüğü gibi farklı kuruluşlara ait model katsayıları birbirlerinden oldukça farklı olup bu modeller ile hesaplanan yol ömrü değerleri de birbirlerinden oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Bu sebeple uygun transfer fonksiyonun bulunması ve yol ömrü tahmininde kullanılması üst yapı tasarımcıları açısından kritik bir öneme sahiptir.

M-A tasarım yöntemleri, ampirik yöntemler ile kıyaslandığında önemli farklılıklar dikkat çekmektedir. Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından esnek üst yapı tasarımında kullanılan regresyon tabanlı ampirik bir yöntem olan AASHTO yöntemi ile [6] M-A dizayn yöntemleri kıyaslandığında öne çıkan temel değişiklikler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- AASHTO yöntemi kaplama tasarımında sadece “mevcut servis kabiliyeti indeksi” (PSI) kriterini kullanırken M-A yöntemler

tekerlek izinde oturma, yorulma, pürüzlülük gibi birden fazla tasarım kriterini dikkate almaktadır.

- AASHTO yöntemi sınırlı arazi test verilerine ve testlerin yapıldığı tek bir lokasyona (Ottawa, Illinois) odaklanırken M-A yöntemlerde daha spesifik iklimsel veriler (hava sıcaklığı, yağış, rüzgar hızı, bağıl nem vd.) ve malzeme özellikleri (Bitümlü tabakaların dinamik modülleri veya granüler tabakaların neme bağlı rezilyans modülleri vd.) dikkate alınabilmektedir.
- AASHTO yönteminde tüm trafik yükleri eşdeğer 8,2 ton standart dingil yükü ( $T_{8,2}$ ) olarak kullanılırken M-A yöntemlerde daha geniş bir yük dağılımı kullanılabilir [9].

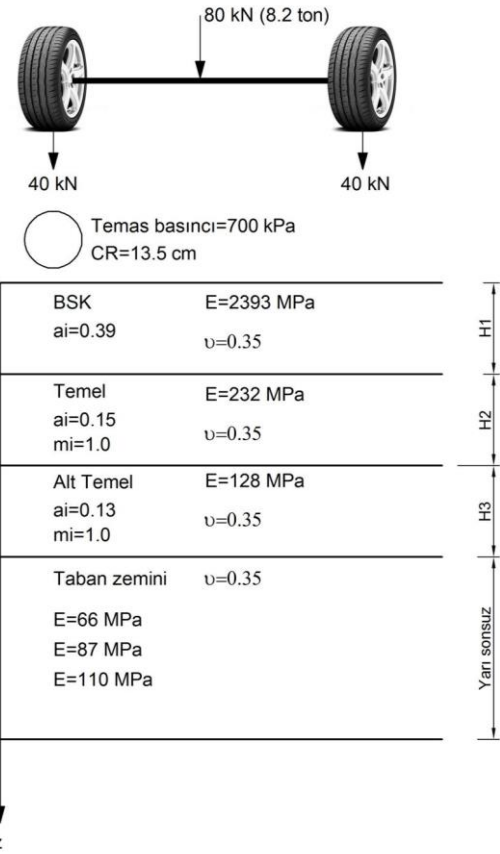
Bir üst yapı mühendisi AASHTO yöntemi ile tasarlanmış mevcut bir kesit geometrisi üzerinde farklı yükler, farklı yükleme alanları (tekerlek izi), farklı malzemeler, farklı malzeme tanımlamaları (lineer elastik, non-lineer elastik, viskoelastik vd.) ve farklı çevresel koşullar (sıcaklık, nem vd.) ile yeni analizler yapmak istediğinde mevcut AASHTO yöntemi yukarıda sayılan dezavantajları sebebiyle bu isteğe uyum sağlayamamaktadır. M-A tasarım yöntemleri ile yeni bir analiz yapıldığında ise elde edilen sonuçlar AASHTO yöntemi ile bulunan tasarım ömründen oldukça farklı değerler ortaya koyacak ve değiştirilen dizayn parametrelerine ilişkin bir kıyaslama yapılamayacaktır.

Bu çalışmanın amacı M-A tasarım yöntemlerinde kullanılan transfer denklemlerinden hangisi veya hangilerinin AASHTO yöntemi ile uyumlu sonuçlar verdiğini belirlemek ve tasarımcıya AASHTO yöntemi ile kalınlık ve yol ömrü analizi yapılmış bir yolun M-A yöntem ile yeniden tasarlanması durumunda değişen yük, malzeme ve çevresel koşullar altında meydana gelen değişimi kıyaslama olanağı sunmaktır.

Literatürde AASHTO yöntemi ile M-A yöntemi kıyaslayan çalışmalar mevcut olsa da, M-A yöntemin transfer denklemleri ile AASHTO yöntemi arasında ilişki kuran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu anlamda mevcut çalışmadan elde edilen sonuçların kaplama mühendisliği alanında önemli bir yer tutacağı düşünülmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada alt temel, temel ve bitümlü sıcak karışım (BSK) yüzey tabakasından oluşan geleneksel bir üst yapı kesiti seçilmiştir (Şekil 1). Tabaka kalınlıkları z ekseninde tanımlanmıştır. Tabakalara ait mekanik özellikler (Elastisite modülü, poisson oranı, izafi mukavemet katsayısı), drenaj katsayıları ve AASHTO yöntemine uygun şekilde tanımlanmış yükleme durumu Şekil 1'de verilmiştir [6,20].



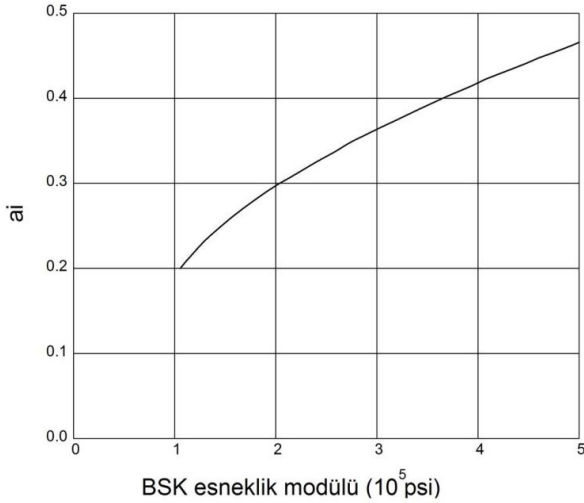
Şekil 1. Model geometrisi

Tabakalara ait izafi mukavemet katsayıları seçilirken Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi (EÜPR) [6] dikkate alınmıştır. BSK tabakasının izafi mukavemet katsayısı bitümlü sıcak karışım olarak imal edilen üç tabakanın ortalaması olarak 0,39 seçilmiştir (Aşınma (0,42), binder (0,40), bitümlü temel (0,36)), Temel tabakası için plentmiks temel katsayısı 0,15, alt temel tabakası için kırmataş alt temel katsayısı 0,13 tercih edilmiştir. Poisson oranı değerleri ( $\nu$ ) tüm tabakalar için 0,35 alınmıştır [3,20–22].

Analizlerde hassasiyet sağlamak ve taban zemini rijitlik (E taban) değişiminin etkilerini dikkate almak amacıyla taban zemini esneklik modülü ( $M_R$ ) 66 MPa (9500 psi), 87 MPa (12600 psi) ve 110 MPa (16000 psi) olarak üç farklı değerde kullanılmıştır [6].

M-A tasarım yönteminde yük altındaki kaplamanın mekanik tepkilerini belirlemek için KENLAYER yazılımı kullanılmıştır. 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 başarı ile kullanılabilen bir yazılımdır [16,23].

Tabakalara ait izafi mukavemet katsayılarının ( $a_i$ ) mekanik analizlerde kullanılmak üzere BSK, temel ve alt temel elastisite modülüne dönüştürülmesinde sırasıyla Şekil 2, Eşitlik 3 ve 4 kullanılmıştır [3].



Şekil 2. BSK için ai-MR dönüşüm grafiği [3]

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

$$a_{alt temel} = 0,227x \log(E_{alt temel}) - 0,839 \quad (4)$$

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

Burada;

$Z_R$ : Güvenilirliğin (R) standart normal sapması olup otoyollar için (R=%95) -1,645, devlet yolları için (R=%85) -1,037 ve il yolları için (R=%70) -0,524 olarak önerilmektedir,

$S_0$ : Trafik ve performans tahmininin bileşik toplam standart sapması olup 0,40-0,50 arasında önerilmektedir, çalışmada bu değer 0,45 olarak kullanılmıştır,

$\Delta PSI$ : Servis kabiliyetindeki azalma miktarı ( $P_0-P_i$ ) olup, yolun ilk servis kabiliyeti ( $P_0$ ) değeri yol ilk hizmete açıldığında 4,2 ile 4,5 arasında alınmaktadır, Çalışmada bu değer 4,2 olarak kullanılmıştır, Son servis kabiliyeti ( $P_i$ ) ise yol üst yapısının onarım ve takviyeden önce müsaade edilebilecek en düşük servis kabiliyetidir ve otoyol ve devlet yolları için 2,5, il yolları için ise 2,0 olarak önerilmektedir,

$M_R$ : Esneklik modülü (psi)

$SN$ : Üst yapı sayısı (inç) olarak tanımlanmaktadır.

$SN$ , tabakaların kalınlıkları ( $D_i$ ,  $D_j$ ), izafi mukavemet katsayıları ( $a_i$ ,  $a_j$ ) ve granüler tabakaların drenaj katsayılarına ( $m_j$ ) bağlı olarak Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır.

$$SN = \sum_{i=1}^k a_i D_i + \sum_{j=1}^n a_j D_j m_j \quad (6)$$

Eşitlikte k, bitümlü sıcak karışım tabaka sayısını, n ise granüler tabaka sayısını belirtmektedir. Granüler tabaka drenaj katsayıları 1,0 olarak alınmıştır.

Eşitliklerde  $a_{temel}$  ve  $a_{alt temel}$  sırasıyla temel ve alt temel tabakalarının izafi mukavemet katsayılarını,  $E_{temel}$  ve  $E_{alt temel}$  ise sırasıyla temel ve alt temel tabakalarının elastisite modülü değerlerini (psi) belirtmektedir.

Şekil 1'de gösterilen H1, H2 ve H3 tabakalarına değer atamak amacıyla EÜPR incelendiğinde BSK tabakası kalınlığı (H1), farklı güvenilirlik ve trafik yükü ( $T_{8,2}$ ) değerlerine bağlı olarak 19 ile 34 cm arasında değiştiği görülmektedir. Temel tabakası kalınlığı (H2) için 20 cm ve alt temel tabakası kalınlığı (H3) için asgari (kum-çakıl alt temel yapılması durumunda) 20 cm önerilmektedir. Bu değerler referans olarak alındığında çalışmada H1/H2 oranı 1 (19/20) ile 1,7 (34/20) arasında değişen değerlerde kullanılmıştır.

Çalışılan kesitin AASHTO yöntemine göre, ekonomik ömrü boyunca geçirebileceği maksimum standart dingil yükü sayısı ( $T_{8,2}$ ) Eşitlik 5 ile belirlenmiştir [6].

H1/H2 oranı değiştirilerek belirlenen bütün kesitlere ait yol ömrü değerleri AASHTO ve M-A tasarım yöntemleri ile bulunmuştur. M-A tasarım yöntemleri ile hesaplanan değerler AASHTO yöntemi ile bağlı hata oranına (BHO) (Eşitlik 7) göre kıyaslanmış ve belirlenen hata oranına göre uyumlu sonuçlar veren M-A transfer denklemleri tespit edilerek farklı zemin tipleri için uyum abakları hazırlanmıştır.

$$BHO = \left[ \frac{y_{AASHTO} - y_{M-A}}{y_{AASHTO}} \right] x 100 \quad (7)$$

Eşitlikte  $y_{AASHTO}$  AASHTO yöntemi ile elde edilen yol ömrü değerini,  $y_{M-A}$  ise M-A dizayn yöntemi ile elde edilen yol ömrü değerini belirtmektedir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'de verilen kesitin, H1=H2=H3=20 cm seçilerek, farklı taban zemini E değerleri ve 1,0 ile 1,7 arasında 0,1 artış ile değiştirilen H1/H2 oranlarına bağlı yol ömrü değerleri AASHTO yöntemi (R%70, 85 ve 95 olmak üzere 3 farklı güvenilirlik seviyesi için) ve M-A tasarım yöntemleri ile hesaplanmıştır. H1/H2 oranı değiştirilirken temel tabakası kalınlığı sabit tutulmuş, BSK tabaka kalınlığı artırılmıştır [6]. Taban zemininin farklı rijitlik değerleri için değişen H1/H2 oranına bağlı olarak elde edilen yol ömrü değerleri Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde M-A yöntemlere ait yorulmaya bağlı yol ömrü değerlerini ifade eden Nf değerlerinin, AASHTO yöntemi sonuçlarından önemli ölçüde farklı olduğu açıkça görülmektedir. ARE transfer denklemi

ile elde edilen Nf değerleri, diğer tüm yöntemlerin yol ömrü değerlerine kıyasla oldukça yüksek değerler verirken BRRC, FHWA ve Illinois yöntemlerine ait sonuçların ise AASHTO yöntemi sonuçlarından oldukça düşük oldukları görülmektedir. AI, USACE ve TRRL yöntemlerine ait sonuçlar, BRRC, FHWA ve Illinois yöntemi sonuçlarından daha yüksek olsa da tüm

H1/H2 oranları için R(%95) sonuçlarının altında kalmışlardır. Tablo 2'ye göre, özellikle H1/H2 oranının 1,4 ve üzerinde olduğu seçeneklerde Shell yöntemi sonuçlarının R(%95) sonuçlarına yakınlaştığı görülmektedir.

**Tablo 2.** H1/H2 oranına bağlı olarak elde edilen AASHTO ve Nf değerleri

Taban zemini rijitliği 66 Mpa												
H1/H2	T8,2 (x10 <sup>6</sup> )			Nf (x10 <sup>6</sup> )								
	R%70	R%85	R%95	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL	FHWA	Illinois	ARE	
1	100,8	34,5	18,45	2,52	6,65	3,50	0,02	1,89	0,01	0,71	39213,43	
1,1	154,5	52	27,6	3,78	13,35	6,47	0,04	3,22	0,02	1,02	56921,99	
1,2	234,2	77,5	41,3	5,57	26,07	11,67	0,08	5,36	0,03	1,46	81418,21	
1,3	350	114,5	60,8	8,10	49,67	20,61	0,13	8,76	0,04	2,05	114902,72	
1,4	509	164,5	87,5	11,62	92,59	35,68	0,22	14,08	0,06	2,85	160291,96	
1,5	740	237	126,4	16,41	167,76	60,27	0,36	22,15	0,09	3,90	220233,99	
1,6	1050	337	179,6	22,85	296,91	99,69	0,59	34,21	0,13	5,28	298815,67	
1,7	1495	475	253	31,42	514,08	161,75	0,93	51,97	0,19	7,06	400711,27	

Taban zemini rijitliği 87 Mpa												
H1/H2	T8,2 (x10 <sup>6</sup> )			Nf (x10 <sup>6</sup> )								
	R%70	R%85	R%95	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL	FHWA	Illinois	ARE	
1	195	67	36	2,64	7,20	3,76	0,03	2,01	0,01	0,74	40934,39	
1,1	300	100	53	3,97	14,57	6,99	0,05	3,44	0,02	1,07	59649,32	
1,2	452	150	80	5,88	28,66	12,69	0,08	5,76	0,03	1,53	85650,25	
1,3	675	220	117	8,59	55,00	22,55	0,14	9,47	0,05	2,16	121343,05	
1,4	980	317	170	12,38	103,28	39,29	0,24	15,30	0,07	3,02	169926,20	
1,5	1425	456	240	17,55	188,41	66,76	0,40	24,19	0,10	4,15	234329,11	
1,6	2040	650	345	24,54	335,83	111,13	0,65	37,58	0,14	5,64	319152,00	
1,7	2880	915	485	33,87	585,06	181,29	1,04	57,36	0,20	7,56	429393,37	

Taban zemini rijitliği 110 Mpa												
H1/H2	T8,2 (x10 <sup>6</sup> )			Nf (x10 <sup>6</sup> )								
	R%70	R%85	R%95	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL	FHWA	Illinois	ARE	
1	340	116	62	2,73	7,65	3,96	0,03	2,11	0,01	0,76	42274,48	
1,1	515	174	93	4,13	15,60	7,42	0,05	3,63	0,02	1,11	61866,68	
1,2	790	260	138	6,15	30,96	13,58	0,09	6,11	0,03	1,60	89248,95	
1,3	1175	384	204	9,01	59,71	24,24	0,15	10,08	0,05	2,26	126786,26	
1,4	1710	553	294	13,02	112,66	42,42	0,26	16,35	0,07	3,16	178010,07	
1,5	2460	795	423	18,50	206,43	72,36	0,43	25,94	0,11	4,36	246053,38	
1,6	3550	1130	602	25,98	370,50	121,18	0,71	40,50	0,15	5,94	336355,79	
1,7	5025	1590	845	35,95	648,18	198,43	1,13	62,01	0,22	7,98	453564,11	



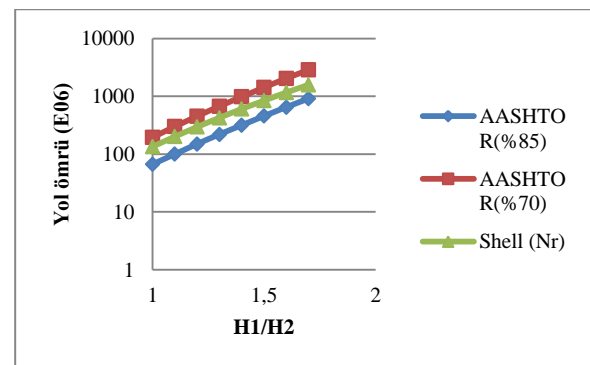
**Tablo 3.** H1/H2 oranına bağlı olarak elde edilen AASHTO ve Nr değerleri

H1/H2	T8,2 (x10 <sup>6</sup> )			Nr (x10 <sup>6</sup> )				
	R%70	R%85	R%95	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL
1	100,8	34,5	18,45	7,36	69,69	155,15	5,87	16,94
1,1	154,5	52	27,6	11,60	104,61	301,05	9,12	24,80
1,2	234,2	77,5	41,3	17,91	154,21	567,05	13,91	35,67
1,3	350	114,5	60,8	27,04	222,85	1034,09	20,77	50,38
1,4	509	164,5	87,5	40,18	317,43	1841,85	30,51	70,20
1,5	740	237	126,4	58,65	445,09	3197,31	44,06	96,37
1,6	1050	337	179,6	84,29	615,39	5424,68	62,68	130,57
1,7	1495	475	253	119,38	839,87	9010,81	87,90	174,77

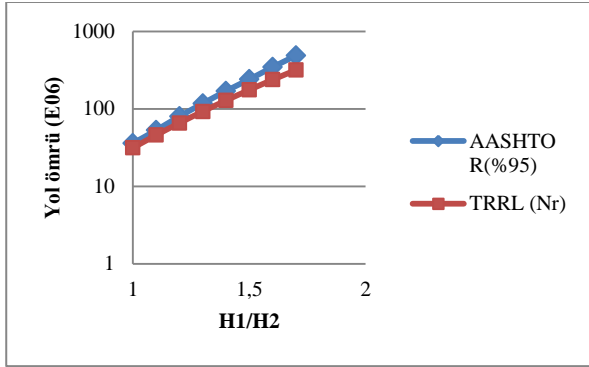
H1/H2	T8,2 (x10 <sup>6</sup> )			Nr (x10 <sup>6</sup> )				
	R%70	R%85	R%95	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL
1	195	67	36	15,38	134,58	454,10	12,00	31,40
1,1	300	100	53	24,13	201,31	876,02	18,59	45,80
1,2	452	150	80	37,08	295,44	1638,22	28,22	65,63
1,3	675	220	117	55,88	426,21	2979,04	42,04	92,53
1,4	980	317	170	82,61	604,43	5268,03	61,46	128,39
1,5	1425	456	240	120,04	843,97	9082,64	88,36	175,56
1,6	2040	650	345	172,08	1164,34	15355,18	125,39	237,39
1,7	2880	915	485	242,64	1582,73	25340,40	175,09	316,56

H1/H2	T8,2 (x10 <sup>6</sup> )			Nr (x10 <sup>6</sup> )				
	R%70	R%85	R%95	AI	Shell	USACE	BRRC	TRRL
1	340	116	62	30,21	246,03	1215,28	23,13	55,28
1,1	515	174	93	47,29	367,19	2335,84	35,75	80,46
1,2	790	260	138	72,47	537,71	4352,65	54,12	115,05
1,3	1175	384	204	108,65	772,04	7853,89	80,21	161,50
1,4	1710	553	294	159,93	1090,60	13800,37	116,78	223,26
1,5	2460	795	423	232,10	1521,14	23751,32	167,69	304,99
1,6	3550	1130	602	330,90	2088,29	39833,53	236,68	410,50
1,7	5025	1590	845	465,24	2831,39	65461,09	329,57	546,08

Tekerlek izinde oturmaya bağlı yol ömrü değerlerinin AASHTO yöntemi sonuçları ile kıyaslandığı Tablo 3 incelendiğinde, AI ve BRRC yöntemleri ile elde edilen sonuçların, AASHTO yöntemi ile elde edilen düşük yol ömrü sonuçları olan R(%95) sonuçlarından düşük olduğu görülmektedir. USACE sonuçlarının ise AASHTO yöntemi ile elde edilen en yüksek yol ömrü sonuçları olan R(%70) sonuçlarından yüksek olduğu belirlenmiştir. Shell yöntemi ile elde edilen sonuçların R(%70) ile R(%85) sonuçları arasında konumlandığı (Şekil 3), TRRL yöntemi sonuçlarının ise R(%95) sonuçlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 3. R(%85) ve R(%70) sonuçları ile Shell (Nr) modeli Sonuçlarının kıyaslanması (Etaban=87 MPa)



Şekil 4. R(%95) sonuçları ile TRRL (Nr) modeli sonuçlarının kıyaslanması (Etaban=87 MPa)

Tablo 2 ve 3'te elde edilen sonuçların daha hassas analiz edilebilmesi amacıyla AASHTO R(%95) sonuçlarına yakın sonuçlar veren Shell yorulma modeli ve TRRL tekerlek izinde oturma modeli ile AASHTO R(%70) ile R(%85) güvenilirlik değeri sonuçları arasında sonuçlar veren Shell tekerlek izinde oturma modeli sonuçlarının, AASHTO sonuçlarına göre BHO değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. BHO değerleri

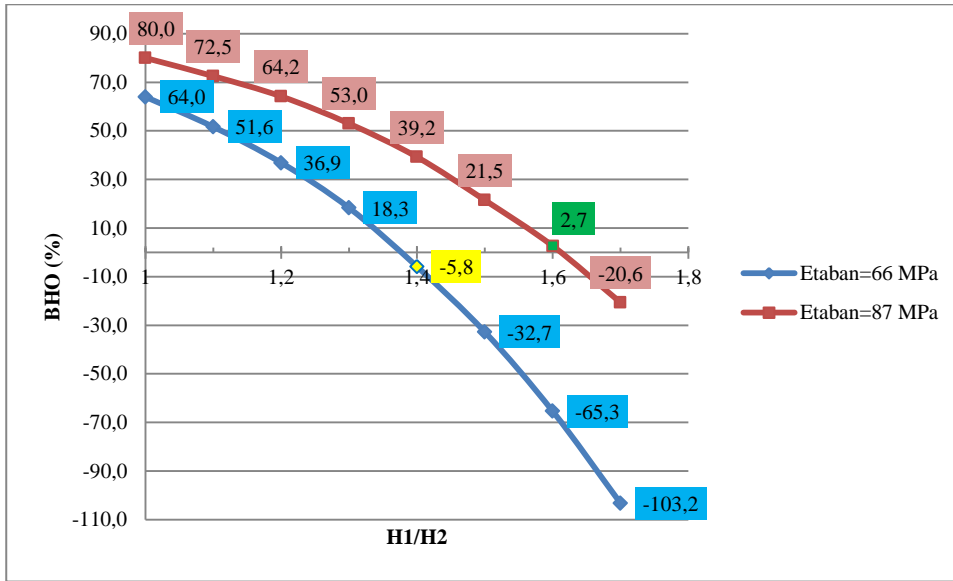
Taban zemini rijitliği (Mpa)	H1/H2	R(%95)'e göre BHO		R(%85)'e göre BHO	R(%70)'e göre BHO
		Shell (Nr)	TRRL (Nr)	Shell (Nr)	Shell (Nr)
66	1	64,0	8,2	-102,0	30,87
	1,1	51,6	10,2	-101,2	32,29
	1,2	36,9	13,6	-99,0	34,16
	1,3	18,3	17,1	-94,6	36,33
	1,4	-5,8	19,8	-93,0	37,64
	1,5	-32,7	23,8	-87,8	39,85
	1,6	-65,3	27,3	-82,6	41,39
87	1,7	-103,2	30,9	-76,8	43,82
	1	80,0	12,8	-100,9	30,98
	1,1	72,5	13,6	-101,3	32,90
	1,2	64,2	18,0	-97,0	34,64
	1,3	53,0	20,9	-93,7	36,86
	1,4	39,2	24,5	-90,7	38,32
	1,5	21,5	26,8	-85,1	40,77
110	1,6	2,7	31,2	-79,1	42,92
	1,7	-20,6	34,7	-73,0	45,04
	1	87,7	10,8	-112,1	27,64
	1,1	83,2	13,5	-111,0	28,70
	1,2	77,6	16,6	-106,8	31,94
	1,3	70,7	20,8	-101,1	34,29
	1,4	61,7	24,1	-97,2	36,22
	1,5	51,2	27,9	-91,3	38,16
	1,6	38,5	31,8	-84,8	41,18
	1,7	23,3	35,4	-78,1	43,65

Tablo 4 incelendiğinde tekerlek izinde oturmaya bağlı TRRL modeli sonuçlarının H1/H2 ve taban zemini rijitliğine bağlı olarak AASHTO R(%95) sonuçları ile %8,2 ile %35,4 arasında değişen oranlarda uyum gösterdiği belirlenmiştir. H1/H2 oranı artışına bağlı olarak BHO değerleri artmıştır. Yorulmaya bağlı Shell modeli sonuçlarının R(%95) sonuçlarına göre BHO değerleri incelendiğinde H1/H2 oranı artışına bağlı olarak BHO değerleri azalmıştır. Taban zemini rijitliği 66 MPa ve H1/H2 oranı 1,4 iken hata oranı -%5,8'e,

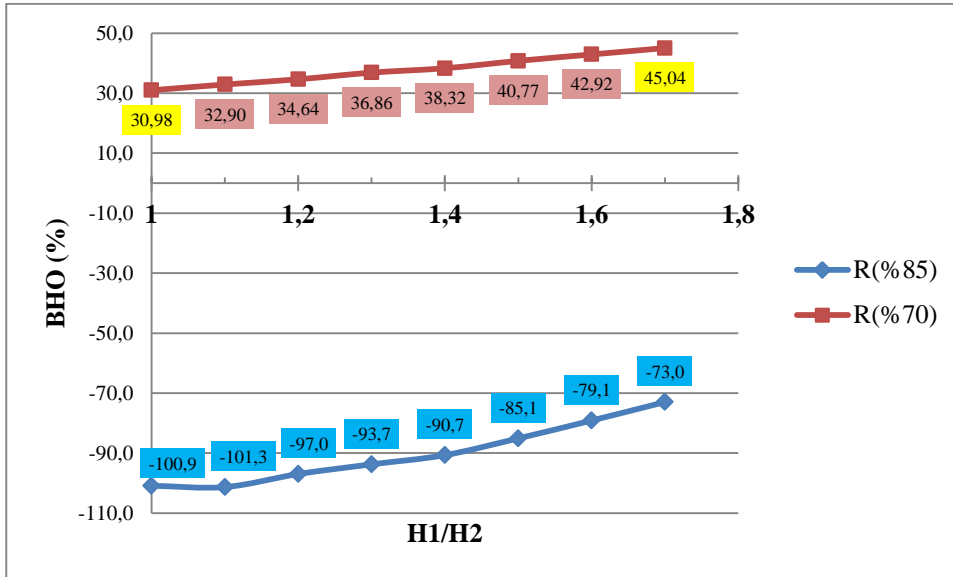
taban zemini rijitliği 87 MPa ve H1/H2 oranı 1,6 olduğunda hata oranı %2,7'ye (Şekil 5) inmiştir. R(%85) ve R(%70) sonuçlarına göre BHO değerleri incelendiğinde, tekerlek izinde oturmaya bağlı Shell modelinin R(%70) sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Ancak elde edilen BHO değerleri R(%95) güvenilirlik seviyesinde olduğu kadar düşük olmayıp %31 ve daha üzerindedir. Özellikle H1/H2 oranı arttıkça BHO değerlerinin %31 seviyesinden %45 seviyesine yükseldiği görülmektedir (Şekil 6). Tablo 4'te bulunan BHO değerleri ile taban

zemini rijitlikleri birlikte değerlendirildiğinde taban zemini rijitliği artışına bağlı olarak BHO değerlerinde

anlamlı bir artış veya azalış belirlenememiştir.



Şekil 5. Shell (Nf) modelinin H1/H2 oranına bağlı BHO değerleri



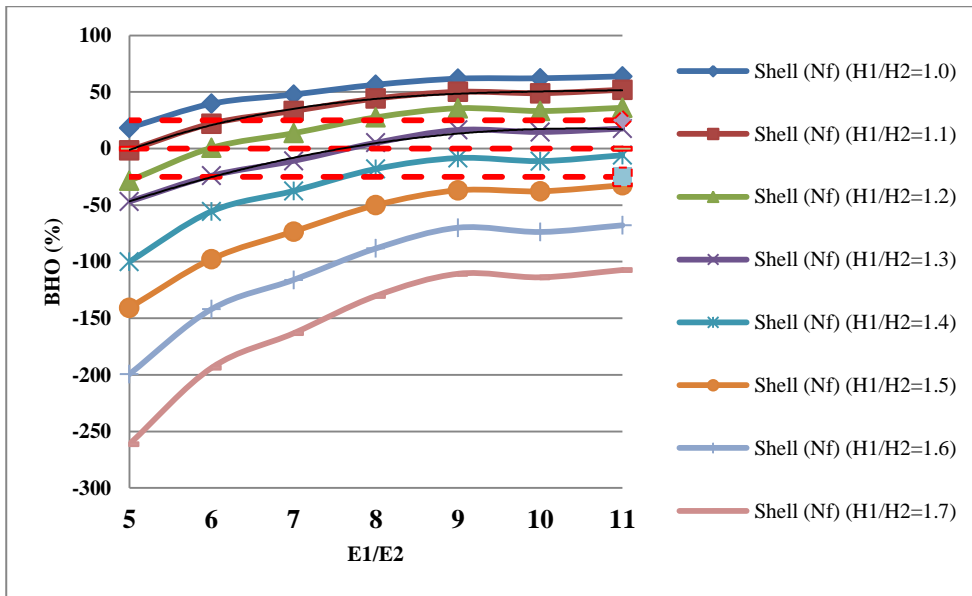
Şekil 6. Shell (Nr) modelinin R(%85) ve R(%70) sonuçlarına göre BHO değerleri (Etaban=87 MPa)

AASHTO yönteminin R(%95) güvenilirlik seviyesindeki sonuçlarına yakın sonuçlar verdiği belirlenen Shell (Nf) ve TRRL (Nr) modellerinin, H1/H2 oranı değişirken aynı zamanda E1/E2 (BSK/Temel) rijitlik oranı değişimine bağlı duyarlılıklarını tespit etmek amacıyla E1 değeri sabit tutularak E1/E2 oranı 5 ile 11 arasında 1,0 artış ile değiştirilerek analizler yapılmıştır. E1/E2 oranı için aralık belirlenirken EÜPR'deki BSK ve temel tabakaları için izafi mukavemet katsayıları dikkate alınmıştır [6]. Taban zemini rijitliği 66 MPa iken Shell (Nf) ve TRRL (Nr) modellerinin R(%95) sonuçlarına göre BHO değerleri Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.

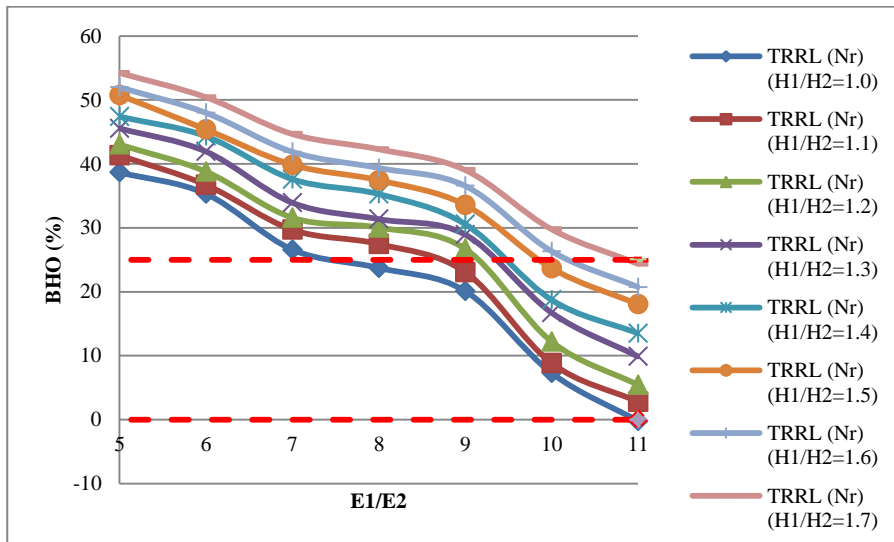
Şekil 7 incelendiğinde, Shell (Nf) modelinin tüm H1/H2 oranları için E1/E2 artışına bağlı olarak BHO değerlerinin sayısal olarak arttığı görülmektedir. Ancak bu artış BHO değeri pozitif olan kesitler için hata

oranını artırırken, BHO değeri negatif olan kesitlerde hata oranını sıfıra yaklaştırmaktadır. Shell (Nf) modelinin BHO değerlerinin artış ve azalışında H1/H2 oranının kritik olduğu görülmektedir. H1/H2 değeri 1,0'den 1,4'e yükseldiğinde E1/E2 oranı 8 ve daha büyük olan kesitlerde BHO değerleri sıfıra yaklaşırken H1/H2 değeri bu sınır değerden daha fazla arttığında BHO değerleri sıfırdan uzaklaşmaktadır. 66 MPa taban zemini rijitliği ve H1/H2'nin 1,1, 1,2 ve 1,3 değerlerinde E1/E2'nin sırasıyla 5, 6 ve 7,59 (grafik denkleminde elde edilmiştir) değerleri için BHO değerinin sıfır olduğu görülmektedir. H1/H2 oranı 1,4 olduğunda hata oranları E1/E2'nin 9, 10 ve 11 olduğu kesitler için sırasıyla -8,34, -11,05 ve -5,92 olarak okunmuştur.





Şekil 7. Shell (Nf) modelinin R(%95) sonuçlarına göre BHO değerleri (Etaban=66 MPa)



Şekil 8. TRRL (Nr) modelinin R(%95) sonuçlarına göre BHO değerleri (Etaban=66 MPa)

Şekil 8 incelendiğinde TRRL (Nr) modelinin tüm H1/H2 oranları için E1/E2 artışına bağlı olarak BHO değerlerinin düştüğü açıkça görülmektedir. H1/H2 oranlarına bağlı olarak yapılan değerlendirmede ise H1/H2'nin artmasının BHO değerini artırdığı belirlenmiştir. BHO değerinin 0 ile %25 arasında olmasını sağlayan tüm kesitler için E1/E2 oranının 7'den büyük olması gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 7 ve 8'de görülen kırmızı kesikli çizgiler BHO değerinin 0, %25 ve -%25 olduğu noktalardan geçirilmiştir. Bu çizgiler arasında kalan E1/E2 ve H1/H2 kombinasyonları, R(%95) sonuçlarına  $\pm$ %25 hata ile yaklaşıldığını göstermektedir. Buna göre hazırlanan uyum abağı Şekil 9'da verilmiştir.

H1/H2	E1/E2						
	5	6	7	8	9	10	11
1	Shell (Nf)		*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,1	Shell (Nf)	Shell (Nf)	*	*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,2	*	Shell (Nf)	Shell (Nf)	*	*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,3		Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	TRRL (Nr)
1,4				Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)
1,5						TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,6						*	TRRL (Nr)
1,7						*	TRRL (Nr)

MUTLAK (BHO)	Renk Skalası	İlişki
0,0-5,0		KUVVETLİ
5,0-10,0		ORTA
10,0-15,0		
15,0-20,0		
20,0-25,0		ZAYIF

Şekil 9. R(%95) sonuçları ile  $\pm$ 25 uyum abağı (Etaban=66 MPa için)

Şekil 9'da düşey ekseninde bulunan H1/H2 oranları ile yatay ekseninde bulunan E1/E2 oranları kesiştirilerek ilgili kesit durumu için AASHTO R(%95) sonucu ile yaklaşık sonuç veren M-A model tespit edilmektedir. Sonuçların birbirine yakınlığı Şekil 9'da verilen renk skalası ile tespit edilebilmektedir. Taban zemini rijitliği 66 MPa iken 56 farklı H1/H2 ve E1/E2 kombinasyonu için 28 adet uyumlu sonuç elde edilmiştir. Şekil 9'a göre E1/E2 değerinin 10 ve 11 olduğu kesitlerde TRRL (Nr) modelinin R(%95) değerleri ile daha uyumlu

olduğu gözlenirken E1/E2'nin 5, 6 ve 7 değerlerinde Shell (Nf) yönteminin uyumu belirgin şekilde gözlenmektedir.

Taban zemini rijitliği 87 ve 110 MPa değerleri için benzer biçimde hazırlanan abaklar Şekil 10 ve 11'de gösterilmiştir. Şekil 10'da 26 adet, Şekil 11'de 23 adet uyumlu sonuç bulunmuştur.

H1/H2	E1/E2						
	5	6	7	8	9	10	11
1				*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,1					*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,2	*	*			*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,3						TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,4	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)			TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,5		Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	TRRL (Nr)
1,6			*	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)
1,7					Shell (Nf)	*	Shell (Nf)

Şekil 10. R(%95) sonuçları ile  $\pm$ 25 uyum abağı (E taban=87 MPa için)

H1/H2	E1/E2						
	5	6	7	8	9	10	11
1				*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,1					*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,2					*	TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,3						TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,4	*					TRRL (Nr)	TRRL (Nr)
1,5	Shell (Nf)	*				*	TRRL (Nr)
1,6	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)				TRRL (Nr)
1,7		Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)	Shell (Nf)

Şekil 11. R(%95) sonuçları ile  $\pm$ 25 uyum abağı (E taban=110 MPa için)

Şekil 9-11 abakları incelendiğinde taban zemini rijitliği arttıkça R(%95) sonuçları ile  $\pm$ 25 uyumlu M-A model sayısı düşmektedir. Bu durumda her bir taban zemini rijitliği için hesabı yapılan toplam 56 kombinasyonun M-A model ile temsil edilme oranları taban zemini rijitliği 66, 87 ve 110 MPa için sırasıyla %50, %46 ve %42 olarak elde edilmektedir. Hata oranı  $\pm$ 30'a çıkarıldığında Şekil 9'da 8 adet, Şekil 10'da 7 adet ve Şekil 11'de 6 adet ilave uyumlu model bulunmaktadır (Abaklarda \* ile gösterilmiştir), buna göre temsil oranları sırasıyla %64, %59 ve %52'ye çıkmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından esnek üst yapı tasarımında kullanılan AASHTO yönteminin 8 adet yorulmaya, 5 adet ise tekerlek izinde oturmaya bağlı M-A tasarım yöntemi ile kıyaslandığı bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

- Yorulmaya bağlı Shell ve tekerlek izinde oturmaya bağlı TRRL yöntemlerinden elde edilen sonuçlar AASHTO R(%95) güvenilirlik

seviyesi ile, tekerlek izinde oturmaya bağlı Shell yöntemi ise AASHTO R(%70) ve R(%85) güvenilirlik seviyeleri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Özellikle yorulmaya bağlı Shell yönteminin AASHTO R(%95) güvenilirlik seviyesine göre BHO değerlerinin %2,7'ye kadar düştüğü belirlenmiştir. Tekerlek izinde oturmaya bağlı Shell yönteminin ise en iyi uyum gösterdiği AASHTO R(%70) güvenilirlik seviyesine göre hesaplanan BHO değerinin %28 seviyesinde kaldığı görülmektedir.

- AASHTO R(%95) güvenilirlik seviyesi ile yüksek uyum gösteren yorulmaya bağlı Shell ve tekerlek izinde oturmaya bağlı TRRL yöntemleri değişen H1/H2 ve E1/E2 oranlarına bağlı olarak analiz edildiğinde H1/H2 oranı değişiminin Shell yöntemi için etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Özellikle H1/H2 oranı 1,0 ile 1,4 arasında değiştiğinde BHO değerlerinin sıfıra yaklaştığı tespit edilmiştir. TRRL yönteminde ise BHO değerinin sıfıra yaklaştığı tüm kesitler için E1/E2 oranının 7,0'den büyük olması gerekmektedir.
- Yorulmaya bağlı Shell ve tekerlek izinde oturmaya bağlı TRRL yöntemlerinin AASHTO R(%95) güvenilirlik seviyesi ile uyumunu gösteren abaklar incelendiğinde E1/E2'nin 5,6 ve 7 değerleri için Shell, 10 ve 11 değerleri için TRRL yönteminin daha yüksek uyum gösterdikleri açıkça söylenebilir. Uyum abaklarında mutlak BHO değeri %25 iken Shell ve TRRL yöntemlerinin AASHTO R(%95) güvenilirlik seviyesini temsil etme oranı maksimum %50 iken mutlak BHO değeri %30'a çıkartıldığında temsil oranı %64'e ulaşmaktadır.
- Üst yapı tasarımcıları AASHTO yöntemi ile çözdükleri bir kesitin, değişen yük, çevre ve malzeme koşullarına göre duyarlılık analizlerini yapmak istediklerinde hangi transfer denkleminin hangi ilişki düzeyinde (zayıf-orta-kuvvetli) uygun sonuçlar vereceğine hazırlanan uyum abakları yardımıyla karar verebilir. Bu sayede tasarımı yapılan yolun özel şartları (yük, çevre, trafik, hız vd.) daha hassas bir çerçevede değerlendirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Tunç A. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. 2nd ed. Nobel Yayınevi; 2007.
- [2] Tunç A. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları. Asil Yayın Dağıtım; 2004.
- [3] Huang YH. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall; 2004.
- [4] Choudhary DK, Joshi YP. A Detailed Study of CBR Method for Flexible Pavement Design. J Eng Res Appl 2014;4:239–53.
- [5] Lanjewar PV, Chawale L, Bhoge A, Dharmik T, Ilme P. Design of Flexible pavement by CBR method according Traffic volume study data 2017;4:149–58.
- [6] Sağlık A, Güngör AG. Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü; 2008.
- [7] Mashayekhi M, Amini AA, 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, p. 319–28.
- [8] Alhasan A, Ali A, Offenbacher D, Smadi O, Lewis-Beck C. Incorporating spatial variability of pavement foundation layers stiffness in reliability-based mechanistic-empirical pavement performance prediction. Transp Geotech 2018;17:1–13.
- [9] Carvalho RL, Schwartz CW. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical versus NCHRP project 1-37A mechanistic-empirical. Transp Res Rec 2006:167–74.
- [10] Mousa MR, Abo-Hashema MA, Gadallah AA, Mousa RM. Evaluation of pavement performance prediction models under different traffic and climatic conditions. 14th Int. Conf. Asph. Pavement Eng. Infrastructure., 2015, p. 1–19.
- [11] Ktari R, Saint-Laurent D, Hornych P, Hammoum F, Marsac P, Nguyen ML. Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. Int J Pavement Eng 2020:1–26. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1806276>.
- [12] Mohd Hasan MR, Hiller JE, You Z. Effects of mean annual temperature and mean annual precipitation on the performance of flexible pavement using ME design. Int J Pavement Eng 2016;17:647–58. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019504>.
- [13] Li P, Liu J, Zhao S. Implementation of stress-dependent resilient modulus of asphalt-treated base for flexible pavement design. Int J Pavement Eng 2018;19:439–46. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1402600>.
- [14] Luo Z, Karki A, Pan E, Abbas AR, Arefin MS, Hu B. Effect of uncertain material property on system reliability in mechanistic-empirical pavement design. Constr Build Mater 2018;172:488–98.
- [15] Luo X, Gu F, Zhang Y, Lytton RL, Zollinger D. Mechanistic-empirical models for better consideration of subgrade and unbound layers influence on pavement performance. Transp Geotech 2017;13:52–68.
- [16] Muniandy R, Eltaher A, Thamer N. Comparison of flexible pavement performance using Kenlayer and Chev PC software program. Aust J Basic Appl Sci 2013;7:112–9.
- [17] Samad E. Sensitivity analysis in flexible pavement performance using mechanistic empirical method (Case study: Cirebon–Losari

- road segment, West Java). *Civ Eng Forum* 2011;20:1163–74.
- [18] Tang X, Stoffels SM, Palomino AM. Mechanistic-empirical approach to characterizing permanent deformation of reinforced soft soil subgrade. *Geotext Geomembranes* 2016;44:429–41.
- [19] Behiry AEAEM. Fatigue and rutting lives in flexible pavement. *Ain Shams Eng J* 2012;3:367–74.
- [20] Hadi MNS, Bodhinayake BC. Non-linear finite element analysis of flexible pavements. *Adv Eng Softw* 2003;34:657–62.
- [21] Ahmed A, Erlingsson S. Viscoelastic response modelling of a pavement under moving load. *Transp Res Procedia* 2016;14:748–57.
- [22] Sarkar A. Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. *Int J Pavement Eng* 2016;17:377–87.
- [23] Chegenizadeh A, Keramatikerman M, Nikraz H. Flexible pavement modelling using Kenlayer. *Electron J Geotech Eng* 2016;21:2467–79.