

GRANÜLER TABAKALARIN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMESİ İLE ESNEK ÜSTYAPILARDA YORULMA VE TEKERLEK İZİNDE OTURMA DAYANIMININ ARTIRILMASI

Murat BOSTANCIOĞLU * 

Alınma: 28.12.2020; düzeltme:19.05.2021; kabul:02.07.2021

Öz: Trafik yükü ve çevresel etkiler altındaki karayolu esnek üst yapılarında meydana gelen temel iki bozulma tipi yorulma çatlakları ve tekerlek izinde oturmadır. Yağış sularının alt tabakalara nüfuz etmesi, agrega-bitüm adezyonunun bozulması, yapısal göçmeler, tekerlek-kaplama temasının ve trafik güvenliğinin azalması bu bozulmaların olumsuz yönleri arasında sayılabilir. Bitüm veya karışım modifikasyonu ve yüzey tabakası gradasyonunun değiştirilmesi yorulma çatlakları ve tekerlek izinde oturma problemlerine karşı alınabilecek önlemler arasında sayılabilir. Bu çalışmada yolun hizmet ömrünün artırılması amacıyla lineer fonksiyonel derecelendirme uygulaması yapılmıştır. Granüler alttemel ve temel tabakalarının alt tabakalara bölünmesi ve belirli bir kurala göre rijitliklerinin değiştirilmesi esasına dayanan bu yaklaşımda yüzey tabakası-temel ve alttemel-taban zemini ara kesitlerinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Mekanistik-ampirik üst yapı dizaynı esas alınarak yapılan analizlerde Asfalt Enstitüsü yöntemine göre yolun yorulma ömrünün %62,3, sürekli deformasyon (tekerlek izinde oturma) ömrünün %36,4'e varan oranlarda arttığı belirlenmiştir. Fonksiyonel derecelendirme ile alt tabakalara ayrılan tabakanın ortalama rijitliğinin değişmiyor olması ve sağlanan iyileşmenin teorik olarak ek maliyet gerektirmemesi çalışmanın dikkat çekici bir diğer yönü olarak vurgulanabilir.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Tekerek İzinde Oturma, Fonksiyonel Derecelendirme, Mekanistik-Ampirik Dizayn, Kaplama Ömrü

Increasing Fatigue and Rutting Resistance of Flexible Pavements by Functional Grading of Granular Layers

Abstract: The two basic types of distress that occur in highway flexible pavements under traffic load and environmental effects are fatigue cracks and rutting. The negative aspects of this distress are the penetration of rainwater into the sublayers, deterioration of aggregate-bitumen adhesion, structural failure, reduced wheel-pavement contact (hydroplaning), and reduced traffic safety. Bitumen or mixture modification and changing the surface layer gradation can be counted among the measures that can be taken against fatigue cracks and rutting problems. In this study, linear functional grading was applied to increase pavement life. In this approach, which is based on the principle of dividing granular subbase and base layers into sub-layers and changing their stiffness according to a certain rule, is aimed to strengthen the intersections of the surface-base and subbase-subgrade. In the analyzes made on the basis of the mechanistic-empirical pavement design, it was determined that the fatigue life increased by 62.3% and the rutting life increased by 36.4% in the calculations made according to the Asphalt Institute method. Another remarkable aspect of the study is that the average stiffness of the layer divided into sublayers by functional grading does not change and does not require additional cost in theory.

Keywords: Fatigue, Rutting, Functional Grading, Mechanistic-Empirical Design, Pavement Life

* Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kampüs, 58140, Merkez/SİVAS

İletişim Yazarı: Murat BOSTANCIOĞLU (bostancioglu@cumhuriyet.edu.tr)

1. GİRİŞ

Esnek üst yapılar, birbirleri ile temas halinde bulunan ve farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip tabakalardan oluşan karmaşık sistemlerdir ve modellenmesi veya matematiksel/fiziksel tanımlanmaları zordur (Graczyk ve diğ., 2016). Trafik yükü altındaki bir üst yapının, deplasman, gerilme ve birim şekil değiştirme tepkilerinin hesaplanması ile mekanik olarak modellenmesi mümkündür. Hesaplanan bu mekanik tepkiler, tanımlı bir göçme kriterine göre kontrol edilerek üst yapı tasarımı yapılır (Hadi ve Bodhinayake, 2003). Kaplamada meydana gelen gerilmeler aşırı ise, bu durum yorulma çatlaklarına veya tekerlek izinde oturmaya (sürekli deformasyon) sebep olabilir (Walituba ve Van De Ven, 2000). Timsah sırtı veya yorulma çatlakları bitümlü yüzey tabakalarının tekrarlı yüke maruz kalması sonucunda oluşan ve birbirleri ile bağlantılı çatlaklar olarak tanımlanmaktadır. Çatlak oluşumu, trafik yükü altında en yüksek çekme gerilmelerinin meydana geldiği bitümlü yüzey tabakasının altında başlar ve yüzeye doğru yayılır. Yağış sularının bu çatlaklardan granüler ve bağlayıcısız tabakalara veya taban zeminine ulaşması önemli yapısal göçmelere öncülük edebilir. Yüzey tabakasının tekerlek izi altında çökmesi ise diğer bir temel bozulma tipidir. Tekerlek izinde oturma, trafik yüklerine bağlı olarak üst yapı tabakalarından birisinin veya taban zeminin oturması veya tabaka malzemelerinin yanal hareketi sonucunda oluşan kalıcı bir deformasyon tipidir ve yapısal göçmelere ve tekerlek-kaplama temasının azalmasına (hydroplaning) sebep olmaktadır (Huang, 2004; Walituba ve Van De Ven, 2000).

Yorulma veya tekerlek izinde oturmaya bağlı birim şekil değiştirme değerleri esnek üst yapıların mekanistik-ampirik (M-A) tasarımında dikkate alınan iki kritik kaplama tepkisidir (Muniandy ve diğ., 2013). Bitümlü yüzey tabakası altındaki yatay çekme birim şekil değiştirmeleri (ϵ_r) yorulma kriteri olarak tanımlanırken taban zemini üzerindeki düşey basınç birim şekil değiştirmeleri (ϵ_v) tekerlek izinde oturma kriteri olarak tanımlanmaktadır (Ekwulo ve Eme, 2009; Mousa ve diğ., 2015).

Esnek üst yapıların yorulma ve sürekli deformasyon dayanımlarının artırılması amacıyla kullanılan temel yöntemler bitüm ve/veya karışım modifikasyonu ile yüzey tabakası gradasyonunun değiştirilmesidir. Esnek üst yapıların sürekli deformasyon direncini artırmak amacıyla kullanılan modifiyerler siyah karbon, sönmüş kireç, uçucu kül gibi fillerler, stiren-butadien-stiren (SBS), stiren-butadien-rubber (SBR), etilen-vinyl-asetat (EVA) gibi polimerler, polipropilen, polyester ve selülozik fiberler olarak sayılabilir. Sülfür, SBS, EVA, atık/öğütülmüş kauçuk, doğal asfalt ve polipropilen katkıları ise kaplamanın yorulma dayanımını artırıcı modifiyerler olarak sıralanabilir (Furtana ve diğ., 2019; Geçkil, 2008; Karakas ve diğ., 2015; Kök ve diğ., 2014; Kök ve Çolak, 2011). Karışımın mekanik özelliklerine ve yol ömrüne sağladığı katkıların yanında modifiye bitümlerin bazı dezavantajları söz konusudur. Plastomerler (polyethylene, polypropylene, EVA) ile modifiye edilen bitümler kaplamanın kalıcı deformasyon direncini artırırken düşük sıcaklıklardaki elastisite kayıpları bu katkıların kullanım olanağını sınırlamaktadır. Modifiyerlerin bitüm ile uyumsuzluğu, faz ayrışmaları, bitüm içerisine homojen dağılımının zorluğu ve depolama stabilitesi problemleri sayılabilecek diğer dezavantajlardır. Özellikle termoset plastiklerde olduğu gibi katkı oranının yüksek olması üretim maliyetini de artırmaktadır (Porto ve diğ., 2019).

Bitümlü yüzey tabakasının gradasyonu değiştirilerek üst yapının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hususunda verilebilecek en iyi örnek taş mastik asfalt (TMA) kaplamalardır (Yılmaz ve diğ., 2011). TMA kaplamalar bitüm içeriğinin fazla ve agrega üzerindeki bitüm filminin kalın olmasından dolayı yorulmaya karşı iyi dayanım gösterirler. Güçlü bir iskelet formundaki kaba agreganın mekanik kenetlenmesi ise TMA kaplamalarda tekerlek izinde oturma dayanımını artırır. Artan mekanik dayanımın yanında segregasyon, bitüm içeriğinin fazla olması ve buna bağlı süzülme ve maliyet problemleri ile stabilizer (süzülme önleyici katkı) oranının uygun olmayan değerleri TMA kaplamaların dezavantajları olarak sayılabilir (Hainin ve diğ., 2012).

Mekanik karakteristiklerin kalınlık doğrultusunda değiştiği fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FGM) ilgi çekici mekanik özellikleri sayesinde mühendislik, havacılık, optik, nükleer enerji, elektronik, biosensörler gibi bir çok endüstriyel uygulamada geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Amirinezhad ve diğ., 2020; Bohidar ve diğ., 2014; Ghayesh, 2018, 2019; Miteva, 2014). FGM’de farklı malzemeler arasındaki keskin ara yüzeylerin yerini bir malzemedan diğerine daha yumuşak bir geçişin sağlandığı dereceli ara yüzeyler almaktadır. Young’s veya kayma modülü, Poisson oranı, malzeme yoğunluğu ve termal genişleme katsayısı gibi mekanik özellikler FGM’de belirli bir fonksiyona göre (lineer, exponansiyel vb.) dereceli olarak değişmektedir (Çömez, 2015; Güler ve Erdogan, 2004; Nie ve diğ., 2013; Singh ve diğ., 2017).

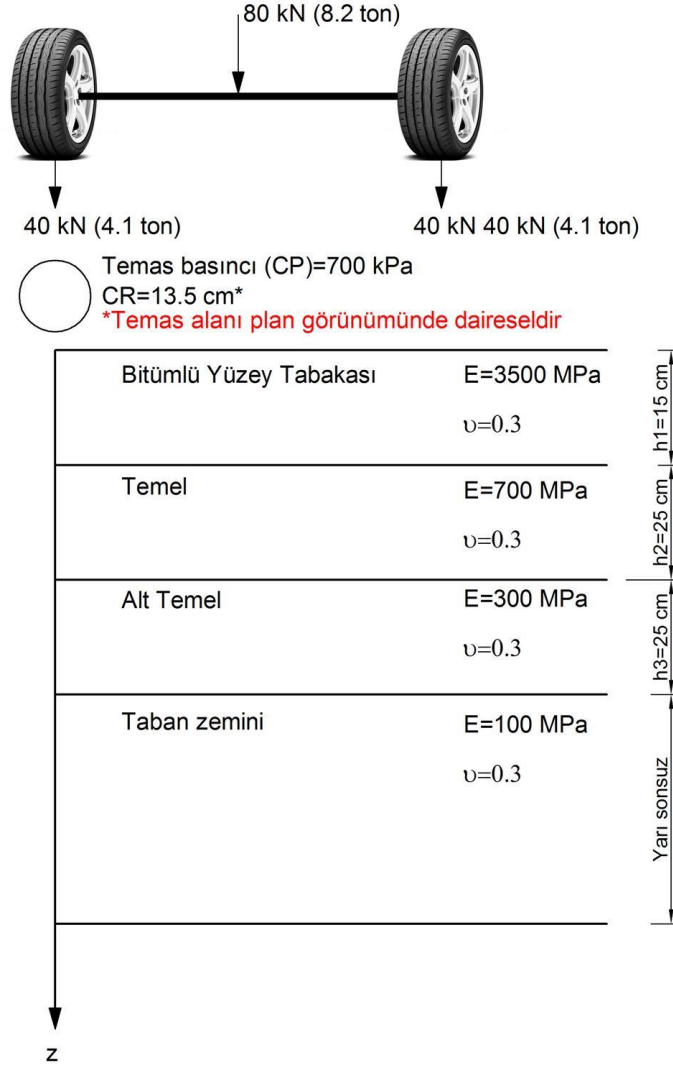
FGM daha çok, birbirinden farklı ve önemli iki özelliğin bir arada kombine edilmesinin gerektiği hallerde uygulama imkanı bulmaktadır. Termal dayanım-antioksidasyon, mekanik dayanım-tokluk ikilileri bu kombinasyonlara örnek olarak verilebilir. Geleneksel kompozitler yerine FGM’nin bu amaçla kullanılıyor olması bir fazdan diğerine geçişte göçmeye sebep olan gerilme konsantrasyonu ve adezyon problemlerini ortadan kaldırmaktadır (Singh ve diğ., 2017).

İnşaat mühendisliğinde temel, karayolu, demiryolu dizaynı gibi tabaka özelliklerinin derinlik ile değiştiği temas ve yük transfer problemlerinin çözümünde fonksiyonel derecelendirme yaklaşımı kullanılmaktadır (Giannakopoulos ve Pallot, 2000; Güler & Erdogan, 2004). Bu amaçla Ke ve Wang (Ke ve Wang, 2006, 2007) tarafından yapılan çalışmalarda derecelendirme işlemi, lineer çok tabakalı sürtünmeli ve sürtünmesiz temas probleminde tabakaların alt tabakalara bölünmesi ve kayma modülünün alt tabakalarda lineer bir fonksiyon ile değiştirilmesi esası ile uygulanmıştır.

Karayolu esnek üst yapıları çok tabakalı sistemler olup yorulma ve sürekli deformasyon ömrünün belirlenmesi amacıyla mekanik tepkilerin hesaplandığı tabaka arayüzlerinde keskin elastisite modülü geçişleri söz konusudur. Bu çalışmada geleneksel bir yol üst yapı kesitinin yüzey tabakası-temel ve alttemel-taban zemini arayüzlerinin güçlendirilmesi ve üst yapının yorulma ve sürekli deformasyon ömrünün artırılması amacıyla lineer fonksiyonel derecelendirme yaklaşımı uygulanmıştır. Üst yapı tabakalarının alt tabakalara bölünerek derecelendirildiği çalışmada M-A üst yapı tasarım yöntemi ile yol ömrü değerleri hesaplanmış ve fonksiyonel derecelendirme işleminin kontrol kesitine kıyasla sağladığı iyileşmeler analiz edilmiştir. Yorulma ve sürekli deformasyon ömrünün herhangi bir modifiyer kullanılmaksızın ve sadece granüler tabakaların fonksiyonel derecelendirilmesi ile artırılmasının amaçlandığı bu çalışmada önerilen yöntemin teorik olarak ek maliyet gerektirmemesi sebebiyle karayolu esnek üst yapısı ile ilgili literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada aksenal simetrik, geleneksel bir esnek üst yapı kesiti (Şekil 1) seçilmiş ve fonksiyonel derecelendirme işlemi uygulanmıştır (Pan ve diğ., 2007). Esnek üst yapı tabakalarında kullanılan malzemeler lineer elastik olarak tanımlanmıştır (Huang, 2004). Lineer malzeme tanımlamasında kullanılan elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) değerleri Şekil 1’de verilmiştir. Kesitin yüklenmesi için standart 8,2 ton (Sağlık ve Güngör, 2008) dingil yükü seçilmiştir. Bu yük aks üzerindeki tekil tekerleklere eşit ve 4,1 ton olarak dağıtılmıştır. Tekerlek iç basıncı (CP) 700 kPa (Hadi ve Bodhinayake, 2003) olarak seçilmiş ve bu iç basıncı sağlayan dairesel temas alanına ait yarıçap (CR) 13,5 cm olarak hesaplanmıştır. Tabakaların temas durumu “bonded/yapışık” olarak belirlenmiştir.



Şekil 1:
Model geometrisi

M-A tasarım yönteminde üst yapı kesitine ait mekanik tepkiler, ampirik transfer denklemleri ile yol ömrü değerlerine dönüştürülmektedir. M-A yöntemlerde dikkate alınan en önemli iki bozulma tipi yorulma çatlakları ve tekerlek izinde oturmadır. Bitümlü yüzey tabakası altında oluşan yatay birim şekil değiştirme değerleri yorulma ömrü (N_f) hesabında kullanılırken taban zemini üzerindeki düşey basınç birim şekil değiştirmeleri sürekli deformasyon ömrü (N_r) hesabında kullanılmaktadır (Behiry, 2012; Ekwulo ve Eme, 2009).

Şekil 1’de verilen kesitin yükleme koşulları altındaki mekanik tepkileri KENLAYER (Chegenizadeh ve diğ., 2016; Huang, 2004; Muniandy ve diğ., 2013) programı ile hesaplanmıştır. 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.

Yorulma ömrü (N_f) hesabında kullanılan yatay çekme birim şekil değiştirmeleri $z=14,9999$ cm derinliğinden, sürekli deformasyon ömrü hesabında kullanılan düşey basınç birim şekil değiştirmeleri ise $z=65,0001$ cm derinliğinden okunmuştur.

Elde edilen mekanik tepkilerin yol ömrü değerlerine dönüştürülmesinde kullanılan ampirik transfer denklemlerinin genel formları Eşitlik 1 ve 2’de, eşitliklerde kullanılan ve farklı kurumlara ait model katsayıları (f1-f5) (Behiry, 2012; Priest, 2005) ise Tablo 1’de verilmiştir.

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

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

Burada, N_f yorulmaya bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını, N_r tekerlek izine bağlı bozulma için gerekli yük tekrar sayısını, $E_{yüzey}$ yüzey tabakasının elastisite modülünü (psi) belirtmektedir.

Tablo 1. Farklı kuruluşlara ait model katsayıları (Behiry, 2012; Priest, 2005)

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

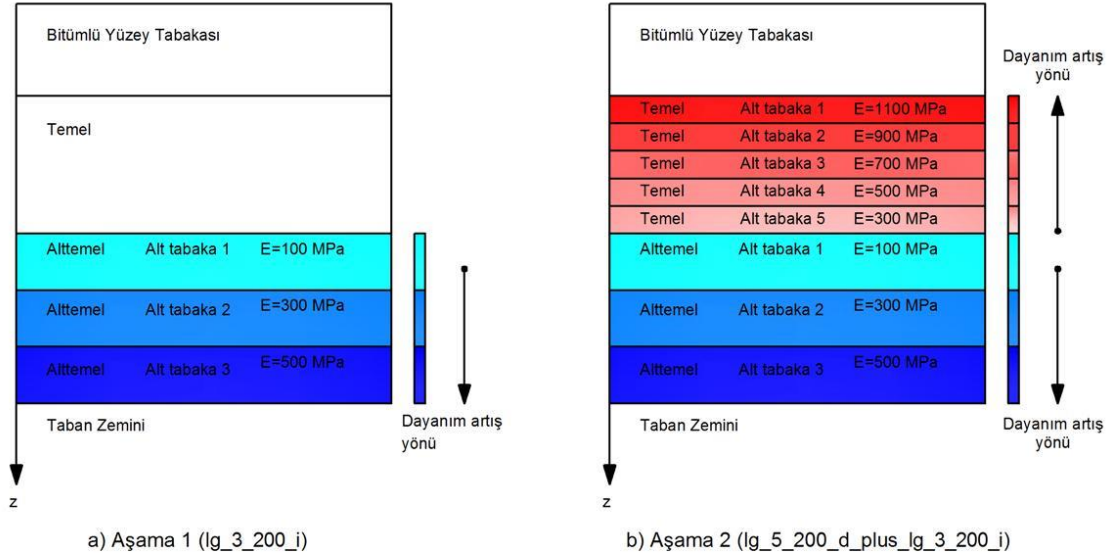
AI: Asphalt Institute, **Shell:** Shell Research, **USACE:** US Army Corps of Engineers, **BRRC:** Belgian Road Research Center, **TRRL:** Transport and Road Research Laboratory, **FHWA:** Federal Highway Administration, **ILLINOIS:** Illinois Department of Transportation **ARE:** Austin Research Engineers

Şekil 1’de verilen kesitin yorulma ve sürekli deformasyon ömrünü artırmak amacıyla geleneksel kesit dizilimi yerine üst yapı tabakalarına fonksiyonel derecelendirme uygulaması yapılmıştır. Fonksiyonel derecelendirme işlemi 2 aşamada uygulanmış olup bu aşamalar Tablo 2’de kısaca özetlenmiştir.

Tablo 2. Çalışma aşamaları

	Güçlendirilen ara yüzey	Derecelendirilen Tabaka(lar)	Derecelendirme Yöntemi
Aşama 1	Alttemel-taban zemini	Alttemel	Lineer
Aşama 2	Alttemel-taban zemini ve Yüzey tabakası-Temel	Temel ve alttemel	Lineer

Geleneksel bir tabakanın derecelendirilmesi işleminde tabaka alt tabakalara bölünmüştür (3,5,7 ve 9 alt tabaka). Bu tabakalara ait rijitlik değerleri z yönünde lineer olarak artırılmış veya azaltılmıştır. Rijitlik değişim değerleri 25,50,100 ve 200 MPa olarak kullanılmıştır. Aşama 1 ve 2’de uygulanan derecelendirmeye ait bir gösterim Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2:

Aşama 1 ve 2'ye ait fonksiyonel derecelendirme gösterimi

Aşama 1 ve Aşama 2'de derecelendirilmiş kesitler lg_3_200_i (Aşama 1'de) ve lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i (Aşama 2'de) şeklinde kodlanmıştır. Aşama 1 için lg_3_200_i kodlaması alttemel tabakasının 3 alt tabakaya bölündüğünü, tabaka rijitliklerinin +z yönünde 200 MPa artarak değiştiğini (increasing) göstermektedir. Aşama 2 için lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kodlaması ise temel tabakasının 5 alt tabakaya bölündüğünü, tabaka rijitliğinin +z yönünde 200 MPa azalarak (decreasing) değiştiğini, alttemel tabakasının ise 3 alt tabakaya bölündüğünü ve tabaka rijitliklerinin +z yönünde 200 MPa artarak (increasing) değiştiğini göstermektedir.

İlgili tabakanın rijitliği değişmeksizin sadece fonksiyonel derecelendirme uygulamasının etkinliğini analiz edebilmek amacıyla derecelendirilmiş tabakaların ortalama rijitlikleri (E_{avg}) Formül 3 yardımı ile derecelendirilmemiş tabakaya eşit tutulmuştur.

$$E_{avg} = \frac{\sum (E_i d_i)}{\sum (d_i)} \quad (3)$$

Formülde E_i ve d_i sırasıyla (i) alt tabakasının elastisite modülünü ve kalınlığını belirtmektedir.

Çalışmada derecelendirme uygulanmış kesitlerin kontrol kesitine kıyasla sağladığı yol ömrü iyileşmeleri, değişim yüzdesi olarak Eşitlik 4 ile hesaplanmıştır.

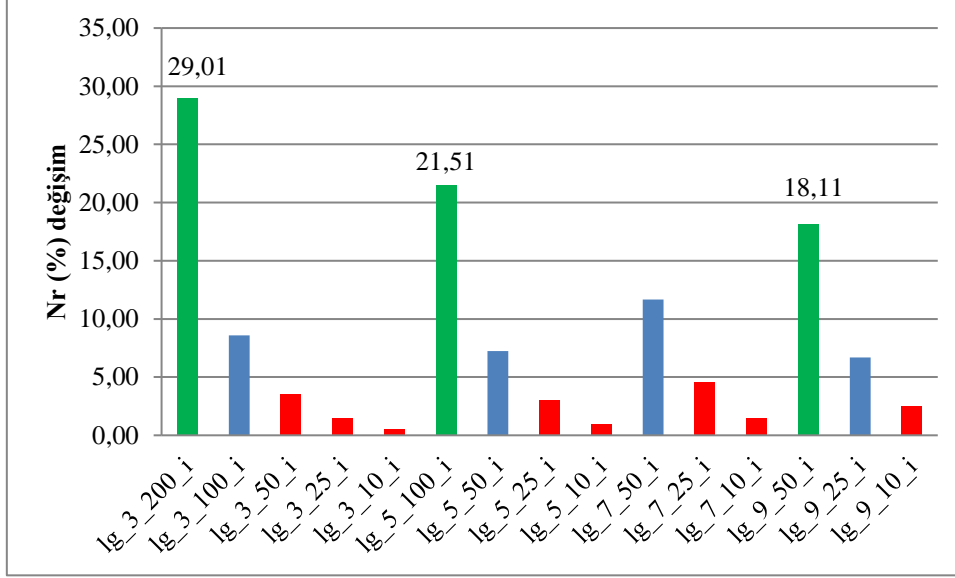
$$(\%)değişim = \frac{N_i - N_{kontrol}}{N_{kontrol}} \times 100 \quad (4)$$

Formülde N_i herhangi bir derecelendirilmiş kesitin yol ömrü değerini, $N_{kontrol}$ kontrol kesitinin yol ömrü değerini belirtmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın 1. Aşamasında farklı alt tabaka sayıları ve farklı rijitlik değişim değerleri için 15 farklı kesit üzerinde çalışılmıştır (Şekil 3). Bu 15 kesitten 8 tanesi için kontrol kesitine kıyasla

yol ömrü artış oranları %5'in altında kalmıştır (Grafikte kırmızı renk ile gösterilmiştir). Diğer 7 kesitte %6,7 ile %29,01 aralığında artış yüzdeleri belirlenmiştir. İyileşme oranları en yüksek 3 kesit incelendiğinde bu kesitlerin alt tabaka sayısı veya rijitlik artış miktarları anlamında ortak bir yönleri bulunmamaktadır. Bu kesitler için belirlenen tek ortak özellik, taban zemini ile temasta olan en alt tabakanın rijitlik değerinin 500 MPa olmasıdır. Alttemel tabakasının ortalama rijitliği (Eşitlik 3) değişmeden sadece taban zemini ile temas eden en alt tabakasının rijitliğinin artması yol ömrü değerlerinde dikkate değer bir artış sağlamıştır.



Şekil 3:

Alttemel tabakasının fonksiyonel derecelendirilmesi sonucunda sağlanan iyileşme değerleri (AI yöntemine göre)

Alttemel tabakasının fonksiyonel derecelendirilmesi sonucunda yorulma ömrü değerini (N_r) %5 ve üzerinde artıran kesitlerin kaplama tabakası altında meydana gelen çekme birim şekil değiştirme değerleri (ϵ_r) Tablo 3'te verilmiştir. Yorulma ömrü hesabında kritik bir tepki değeri olan ϵ_r değerleri incelendiğinde verilen tüm kesitler için ϵ_r değerlerinin kontrol kesitine kıyasla artış gösterdiği (ϵ_r değerlerindeki eski işareti şekil değişiminin çekmeye bağlı olduğunu göstermektedir) ve dolayısıyla yorulma ömrü değerlerinin azaldığı görülmektedir (Eşitlik 1). Fonksiyonel derecelendirmeden meydana gelen bu dezavantajın ortadan kaldırılması ve yolun sürekli deformasyon ömrü artırılırken aynı zamanda yorulma ömrünün de artırılması veya sabit kalması amacıyla Tablo 3'te verilen alttemel derecelendirme kesitlerinin her biri için farklı alt tabaka sayıları, rijitlik değişimleri ve derecelendirme yönleri ile temel tabakası da alttemel tabakası ile birlikte derecelendirilmiştir (Aşama 2). Çalışmanın bu ikinci aşamasında temel tabakası 3 veya 5 alt tabakaya ayrılmış ve tabaka rijitlik değeri (700 MPa) yukarıdan aşağıya artacak veya azalacak şekilde 100 veya 200 MPa değişim değerleri ile derecelendirilmiştir.

Tablo 3. Aşama 1’de N_r değerini %5 ve üzerinde artıran kesitlere ait ϵ_r değerleri

Kesit kodu	ϵ_r
Kontrol	-1,16E-04
lg_3_200_i	-1,19E-04
lg_3_100_i	-1,17E-04
lg_5_100_i	-1,18E-04
lg_5_50_i	-1,17E-04
lg_7_50_i	-1,17E-04
lg_9_50_i	-1,18E-04
lg_9_25_i	-1,17E-04

Temel tabakası ve alttemel tabakasının birlikte derecelendirildiği kesitlere ait mekanik tepki değerleri Tablo 4’te verilmiştir.

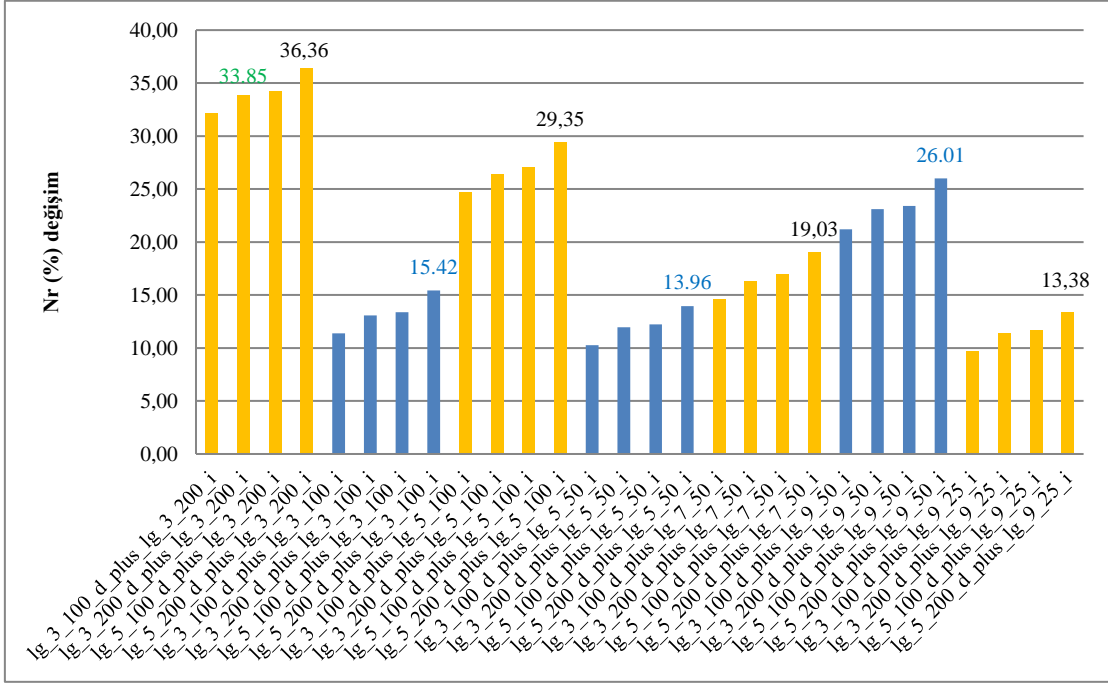
Tablo 4. Mekanik tepki değerleri

No	Kod	ϵ_r	ϵ_v	No	Kod	ϵ_r	ϵ_v
Alttemelde lg_3_200_i derecelendirmesi sabit				Alttemelde lg_7_50_i derecelendirmesi sabit			
1	lg_3_100_i_plus_lg_3_200_i	1,26E-04	1,73E-04	33	lg_3_100_i_plus_lg_7_50_i	1,25E-04	1,78E-04
2	lg_3_200_i_plus_lg_3_200_i	1,35E-04	1,75E-04	34	lg_3_200_i_plus_lg_7_50_i	1,33E-04	1,81E-04
3	lg_3_100_d_plus_lg_3_200_i	1,13E-04	1,70E-04	35	lg_3_100_d_plus_lg_7_50_i	1,11E-04	1,75E-04
4	lg_3_200_d_plus_lg_3_200_i	1,07E-04	1,69E-04	36	lg_3_200_d_plus_lg_7_50_i	1,06E-04	1,75E-04
5	lg_5_100_i_plus_lg_3_200_i	1,34E-04	1,74E-04	37	lg_5_100_i_plus_lg_7_50_i	1,32E-04	1,80E-04
6	lg_5_200_i_plus_lg_3_200_i	1,56E-04	1,81E-04	38	lg_5_200_i_plus_lg_7_50_i	1,54E-04	1,87E-04
7	lg_5_100_d_plus_lg_3_200_i	1,08E-04	1,69E-04	39	lg_5_100_d_plus_lg_7_50_i	1,06E-04	1,75E-04
8	lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i	9,00E-05	1,69E-04	40	lg_5_200_d_plus_lg_7_50_i	9,83E-05	1,74E-04
Alttemelde lg_3_100_i derecelendirmesi sabit				Alttemelde lg_9_50_i derecelendirmesi sabit			
9	lg_3_100_i_plus_lg_3_100_i	1,24E-04	1,79E-04	41	lg_3_100_i_plus_lg_9_50_i	1,25E-04	1,76E-04
10	lg_3_200_i_plus_lg_3_100_i	1,33E-04	1,82E-04	42	lg_3_200_i_plus_lg_9_50_i	1,34E-04	1,78E-04
11	lg_3_100_d_plus_lg_3_100_i	1,11E-04	1,77E-04	43	lg_3_100_d_plus_lg_9_50_i	1,12E-04	1,73E-04
12	lg_3_200_d_plus_lg_3_100_i	1,05E-04	1,76E-04	44	lg_3_200_d_plus_lg_9_50_i	1,07E-04	1,73E-04
13	lg_5_100_i_plus_lg_3_100_i	1,32E-04	1,81E-04	45	lg_5_100_i_plus_lg_9_50_i	1,33E-04	1,78E-04
14	lg_5_200_i_plus_lg_3_100_i	1,54E-04	1,88E-04	46	lg_5_200_i_plus_lg_9_50_i	1,55E-04	1,85E-04
15	lg_5_100_d_plus_lg_3_100_i	1,06E-04	1,76E-04	47	lg_5_100_d_plus_lg_9_50_i	1,07E-04	1,73E-04
16	lg_5_200_d_plus_lg_3_100_i	9,79E-05	1,75E-04	48	lg_5_200_d_plus_lg_9_50_i	9,91E-05	1,72E-04
Alttemelde lg_5_100_i derecelendirmesi sabit				Alttemelde lg_9_25_i derecelendirmesi sabit			
17	lg_3_100_i_plus_lg_5_100_i	1,26E-04	1,75E-04	49	lg_3_100_i_plus_lg_9_25_i	1,24E-04	1,80E-04
18	lg_3_200_i_plus_lg_5_100_i	1,35E-04	1,77E-04	50	lg_3_200_i_plus_lg_9_25_i	1,33E-04	1,82E-04
19	lg_3_100_d_plus_lg_5_100_i	1,12E-04	1,72E-04	51	lg_3_100_d_plus_lg_9_25_i	1,10E-04	1,77E-04
20	lg_3_200_d_plus_lg_5_100_i	1,07E-04	1,72E-04	52	lg_3_200_d_plus_lg_9_25_i	1,05E-04	1,77E-04
21	lg_5_100_i_plus_lg_5_100_i	1,33E-04	1,77E-04	53	lg_5_100_i_plus_lg_9_25_i	1,31E-04	1,82E-04
22	lg_5_200_i_plus_lg_5_100_i	1,55E-04	1,84E-04	54	lg_5_200_i_plus_lg_9_25_i	1,54E-04	1,89E-04
23	lg_5_100_d_plus_lg_5_100_i	1,08E-04	1,71E-04	55	lg_5_100_d_plus_lg_9_25_i	1,06E-04	1,76E-04
24	lg_5_200_d_plus_lg_5_100_i	9,94E-05	1,71E-04	56	lg_5_200_d_plus_lg_9_25_i	9,77E-05	1,76E-04
Alttemelde lg_5_50_i is derecelendirmesi sabit							
25	lg_3_100_i_plus_lg_5_50_i	1,24E-04	1,80E-04				
26	lg_3_200_i_plus_lg_5_50_i	1,33E-04	1,82E-04				
27	lg_3_100_d_plus_lg_5_50_i	1,10E-04	1,77E-04				
28	lg_3_200_d_plus_lg_5_50_i	1,05E-04	1,76E-04				
29	lg_5_100_i_plus_lg_5_50_i	1,31E-04	1,82E-04				
30	lg_5_200_i_plus_lg_5_50_i	1,54E-04	1,89E-04				
31	lg_5_100_d_plus_lg_5_50_i	1,06E-04	1,76E-04				
32	lg_5_200_d_plus_lg_5_50_i	9,78E-05	1,76E-04				

Tablo 4 incelendiğinde temel tabakası rijitliğininin +z yönünde arttığı kesitler için ε_r değerleri kontrol kesiti ε_r değerine (1,16E-04) kıyasla artarken rijitliğin +z yönünde azaldığı kesitler için ε_r değerleri azalmıştır. Temel tabakası rijitliğinin yukarıdan aşağıya azalır şekilde derecelendirilmesi sonucunda yüzey tabakası-temel ara kesitinin kuvvetlenmesi ε_r azalmasının sebebi olarak değerlendirilebilir. Bu şekilde analiz edilen 56 kesitten 28 tanesinde ε_r değerleri kontrol kesitine kıyasla azalmıştır. Yüzey tabakası-temel ara kesitinin kuvvetlendiği bu 28 kesit için ε_v değerlerinin de azaldığı açıkça görülmektedir. Böylece kesitin hem yorulma hem de tekerlek izi dayanımı artırılmıştır.

ε_v değerleri tek başına değerlendirildiğinde ise 56 kesitin 42 tanesinde ε_v değerleri kontrol kesiti ε_v değerine (1,81E-04) kıyasla azalmış ve sürekli deformasyon ömrü değeri artmıştır. ε_v değerlerinde artışa sebep olan 14 kesit incelendiğinde bu kesitlerde temel tabakası rijitliğinin yukarıdan aşağıya arttığı belirlenmiştir. Rijitlik artış miktarı ise 13 kesit için 200 MPa 1 kesit için ise 100 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu 14 kesit içerisinde ε_v değerinin en çok artış gösterdiği iki kesit Tablo 4'te verilen 30 ve 54 numaralı kesitlerdir. Bu iki kesitte alttemel tabakasının rijitlik artış miktarının diğer kesitlere kıyasla düşük olması (50 ve 25 MPa) dikkat çekicidir.

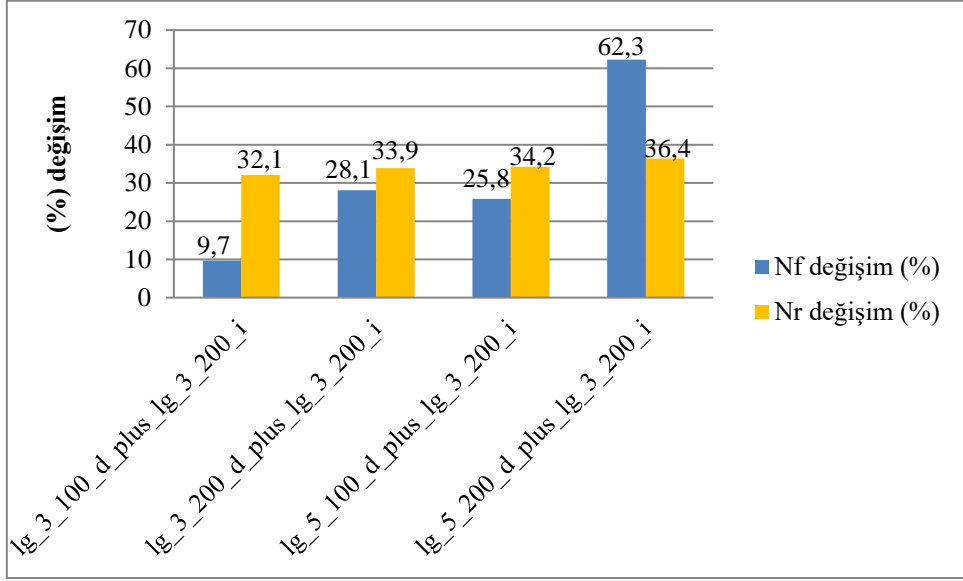
ε_v ve ε_r değerlerini birlikte artıran kesitler için AI transfer denklemi ile hesaplanan N_r %değişim değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'de alttemel derecelendirmesinin sabit kaldığı kesitler aynı renkler ile gösterilmiştir. Alttemel derecelendirmesi sabit iken temel tabakasında alt tabaka sayısı ve rijitlik artış miktarı değerleri arttıkça N_r artış yüzdeleri artmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde N_r değerlerinde en yüksek iyileşmeyi sağlayan kesitin lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kesiti olduğu görülmektedir. Bu kesit için sürekli deformasyon ömrü değeri %36,36 artmıştır. Herhangi bir modifiyer malzeme kullanmadan ve sadece granüler tabakaların rijitlik değerlerini belirli bir fonksiyona göre değiştirerek sağlanan bu iyileşme oldukça ilgi çekicidir. lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kesitinde toplam 50 cm kalınlığa sahip olan 2 granüler tabaka (25 cm temel+25 cm alttemel) toplamda 8 (5+3) alt tabakaya bölünerek önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Daha az alt tabaka sayısına sahip olması sebebiyle uygulamada daha çok tercih edilebilir olan 6 alt tabaka (3+3) ile ulaşılan en yüksek iyileşme değeri ise %33,85 (lg_3_200_d_plus_lg_3_200_i) olarak elde edilmiştir. Şekil 3'te verilen ve sadece alttemel tabakasının fonksiyonel derecelendirilmesi sonucunda elde edilen %29,01 oranındaki iyileşme değeri dikkate alındığında temel tabakasında da derecelendirilmesi, toplam 8 alt tabaka için ilave %7,35, toplam 6 alt tabaka için ilave %4,84 oranında iyileşme sağlamıştır.



Şekil 4:

Alttemel ve temel tabakasının fonksiyonel derecelendirilmesi sonucunda Nr artış değerleri (AI yöntemine göre)

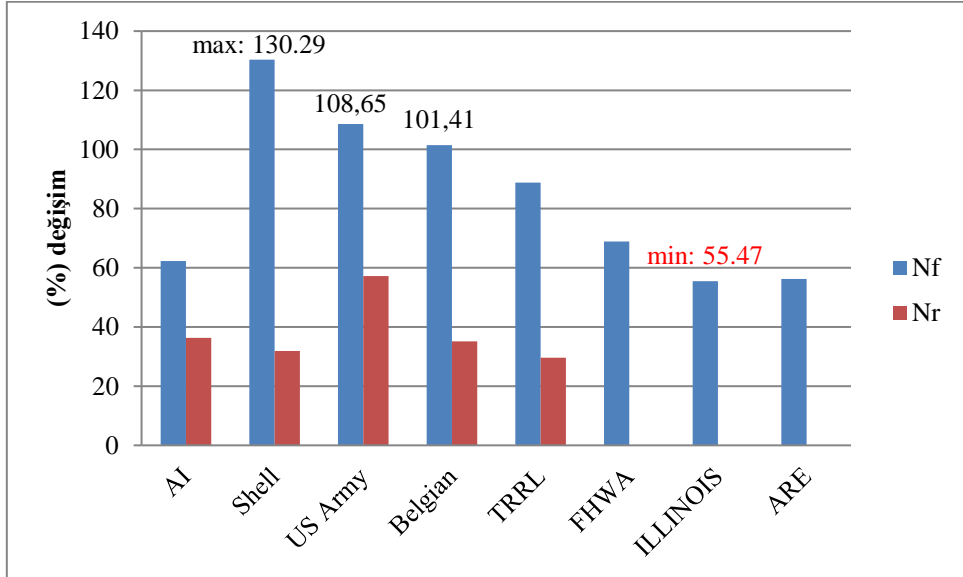
Alttemel tabakası derecelendirmesinin sabit ve lg_3_200_i olduğu ve sürekli deformasyon ömrü değerlerinde en yüksek artış oranlarını sağlayan 4 kesit için yorulma ve sürekli deformasyon ömrü değerlerindeki artış değişimleri Şekil 5'te birlikte verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde toplam 6 alt tabaka ile derecelendirilmiş kesitlerde fonksiyonel derecelendirme uygulaması Nr değerlerinde daha yüksek oranda bir iyileşme sağlamıştır. 8 alt tabaka uygulaması yapılan ve temel rijitliğinin 200 MPa değiştiği lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kesitinde ise yorulma ömrü, sürekli deformasyon ömrüne kıyasla daha yüksek bir artış göstermiştir. Bu kesitte sağlanan %62,3 oranındaki yorulma ömrü artışı oldukça dikkat çekicidir.



Şekil 5:

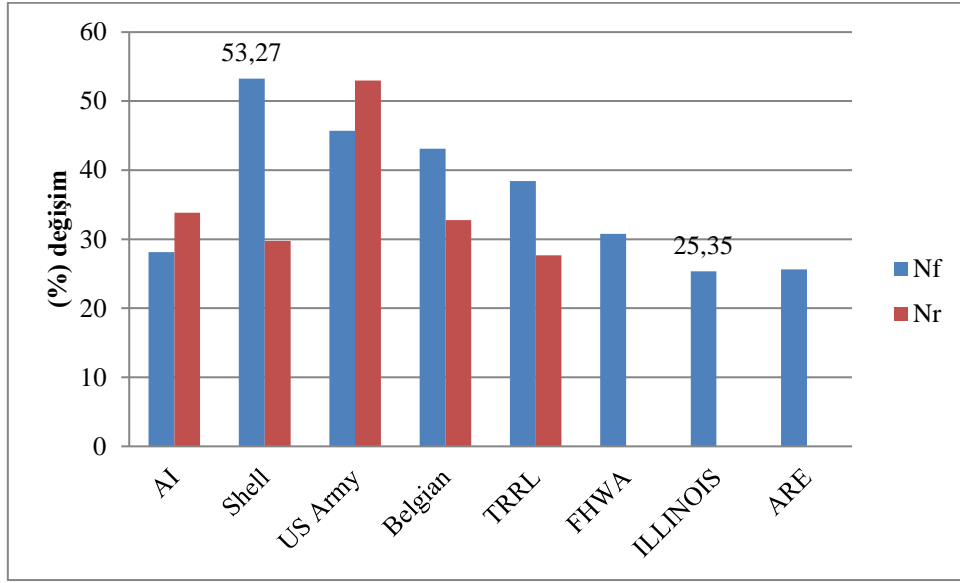
Alttemel tabakasının lg_3_200_i şeklinde derecelendirildiği kesitler için N_r ve N_f değişim değerleri (AI yöntemine göre)

8 (lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i) ve 6 (lg_3_200_d_plus_lg_3_200_i) alt tabaka ile en yüksek N_r ve N_f artışını sağlayan iki kombinasyon için farklı transfer denklemleri ile hesaplanan iyileşme değerleri Şekil 6 ve 7’de verilmiştir.



Şekil 6:

lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kesiti için farklı transfer fonksiyonları ile hesaplanan (%) değişim değerleri



Şekil 7:

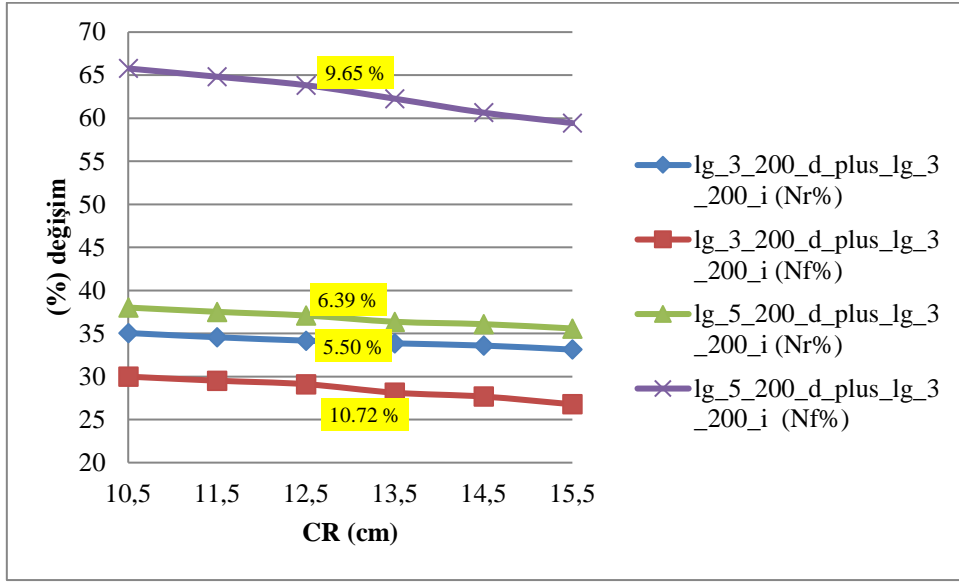
lg_3_200_d_plus_lg_3_200_i kesiti için farklı transfer fonksiyonları ile hesaplanan (%) değişim değerleri

Şekil 6’da verilen ve lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kesiti ile hesaplanan 8 adet N_f , 5 adet N_r (%) değişim değeri incelendiğinde bu kesit için yorulma ömrü için sağlanan iyileşme, tekerlek izinde oturma için sağlanan iyileşmeden tüm transfer denklemleri için daha fazladır. lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i şeklinde uygulanan fonksiyonel derecelendirmenin Shell, US Army ve Belgian yöntemleri için sağladığı artış %100’ün üzerindedir. Bu kesitte sağlanan en düşük N_f artış miktarı ILLINOIS yöntemine ait ve %55,47’dir.

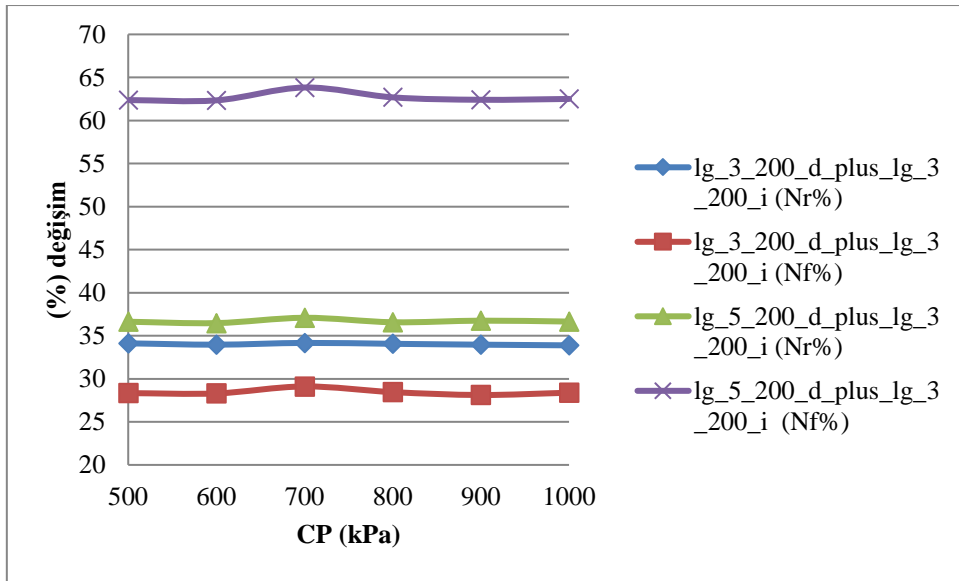
Şekil 7’de verilen ve 6 alt tabakalı lg_3_200_d_plus_lg_3_200_i kesiti için AI ve US Army yöntemlerinde tekerlek izi ömrü yorulma ömrüne kıyasla daha yüksek bir artış göstermiştir. Shell, Belgian ve TRRL yöntemlerinde ise lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i kesitinde olduğu gibi yorulma ömrü tekerlek izine kıyasla daha fazla artmıştır. Yorulma ömrü için en yüksek artış değeri (%53,27) Shell denklemi ile elde edilirken en düşük değer (%25,35) ILLINOIS denklemi ile elde edilmiştir.

Şekil 6 ve 7 birlikte değerlendirildiğinde granüler tabakalarda uygulanan fonksiyonel derecelendirme işleminin yolun yorulma ömrüne olan katkısı çalışmada dikkate alınan tüm kurumlara ait transfer denklemlerinde açıkça görülmektedir.

Fonksiyonel derecelendirme işleminin yük yarıcağı ve tekerlek iç basıncı değişimine duyarlılığını belirlemek amacıyla granüler tabakaların toplam 6 ve 8 alt tabakaya bölünmesi durumunda en yüksek artış oranlarını sağlayan iki kesit (lg_3_200_d_plus_lg_3_200_i ve lg_5_200_d_plus_lg_3_200_i) için diğer parametreler sabit kalmak üzere CR ve CP değişimine bağlı analizler yapılarak sonuçlar Şekil 8 ve 9’da verilmiştir.



Şekil 8:
CR değişimine bağlı % değişim değerleri



Şekil 9:
CP değişimine bağlı % değişim değerleri

CR değişimine bağlı % değişim değerleri (Şekil 8) incelendiğinde fonksiyonel derecelendirmenin düşük yüklemeye yarıçaplarında daha yüksek % değişim değerleri verdiği ve yüklemeye yarıçapı arttıkça kontrol kesitine kıyasla sağladığı iyileşmenin azaldığı görülmektedir. Ancak bu azalma oranı CR değerinin 10,5 cm'den 15,5 cm'ye çıkması durumunda (%48 artış) en yüksek %10,72 seviyesindedir (Şekil 8'de sarı vurgulama ile verilmiştir).

CP değişimine bağlı yapılan analizde ise (Şekil 9) fonksiyonel derecelendirme işleminin tekerlek iç basıncı değişiminden belirgin bir şekilde etkilenmediği ve tüm yüklemeye basınçları için benzer bir performans gösterdiği belirtilebilir.

4. SONUÇLAR

Esnek üst yapı tabakalarının lineer derecelendirilmesi sonucunda sağlanacak yorulma ve sürekli deformasyon dayanımı artışını analiz eden bu çalışmadan elde edilen bulguların özeti ve çıkarılan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir,

- Sadece alttemel tabakasının fonksiyonel derecelendirilmesi sonucunda %29,01'e varan N_r iyileşmesi sağlanmaktadır. Üstelik bu iyileşme alttemelin yalnızca 3 alt tabakaya bölünmesi ile sağlanmış ve saha uygulaması açısından önemli bir avantaj sağlanmıştır.

- Çalışmanın birinci aşamasında yalnızca alttemelin derecelendirilmesi ve alttemel – taban zemini temas yüzeyinin güçlendirilmesi sonucunda N_r değerleri artmakta ancak N_f değerlerinde bir azalma gözlenmektedir. Geleneksel bir kesitin hem N_r hem de N_f dayanımın artırılması için alttemel tabakası ile temel tabakasının birlikte derecelendirilmesi önemli bir çözüm yöntemidir. Bu şekilde derecelendirilmiş bir kesitte AI yöntemine göre yapılan hesaplamalarda %36,36 N_r , %62,3 N_f artışı sağlanmıştır. Bu artışı sağlamak için temel tabakası +z yönünde azalan, alttemel tabakası ise +z yönünde artan rijitlik ile derecelendirilmelidir.

- Temel ve alttemel tabakalarının toplam 8 alt tabaka yerine toplam 6 alt tabaka ile derecelendirilmesi sonucu sağlanan N_r ve N_f iyileşmeleri sırasıyla %33,9 ve %28,1 olarak hesaplanmıştır. Sahada uygulanması daha avantajlı olan 6 alt tabakalı çözümde N_r değerlerindeki azalma çok belirgin değil iken N_f değerleri 8 alt tabakalı çözüme göre %55 azalmıştır.

- Fonksiyonel derecelendirmenin yük uygulama parametrelerine hassasiyeti değerlendirildiğinde sağlanan olumlu etki temas yarıçapının artışına bağlı olarak düşmekte ancak temas gerilmesinden etkilenmemektedir.

- Granüler tabakaların esneklik modülü değerlerinin tabakalarda kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik parametrelerine göre değiştiği bilinmektedir. Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinde granüler malzemelerin esneklik modülü değerinin hesaplanması amacıyla önerilen eşitlik gereğince alt temel ve temel malzemelerinin Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) değerinin artırılması, No4 ve No200 elek altında kalan malzeme oranlarının azaltılması veya kıvam limitlerinin düzenlenmesi sonucunda tabaka rijitlikleri fonksiyonel derecelendirmeye uygun hale getirilerek mevcut çalışmanın sahada uygulanabilirliği sağlanabilir (Sağlık ve Güngör, 2008). Yalnızca gradasyonu değiştirilerek dahi esneklik modülü artırılmış malzemenin sahada doğru sıralama ile serilmesi sonucunda ek bir katkıya ihtiyaç duyulmadan önemli bir N_r ve N_f dayanım artışı sağlanabilir.

- Fonksiyonel derecelendirme uygulaması yapılmış kesitin kontrol kesitine kıyasla ortalama rijitliğinin değişmiyor olması teorik olarak bu iyileşmenin ek bir maliyet gerektirmemesi şeklinde değerlendirilebilir.

- Önerilen bu derecelendirme yaklaşımı gerçek saha koşullarında düşük alt tabaka sayıları ile bir deneme kesimi inşa edilerek uygulanabilir ve saha performansı ölçülebilir. Bu anlamda, fonksiyonel derecelendirme yaklaşımı deneysel üst yapı araştırmacıları için de önemli bir çalışma konusu olarak belirtilebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadır.

YAZAR KATKISI

Murat Bostancıoğlu çalışmanın her aşamasında %100 katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Amirinezhad, H., Tarkashvand, A. ve Talebitooti, R. (2020). Acoustic Wave Transmission Through a Polymeric Foam Plate Using the Mathematical Model of Functionally Graded Viscoelastic (FGV) Material. *Thin-Walled Structures*, 148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106466>
2. Behiry, A. E. A. E. M. (2012). Fatigue and Rutting Lives in Flexible Pavement. *Ain Shams Engineering Journal*, 3(4), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.04.008>
3. Bohidar, S. K., Sharma, R. ve Mishra, P. R. (2014). Functionally Graded Materials: A Critical Review. *International Journal of Research*, 1(7), 289–301. <https://journals.pen2print.org/index.php/ijr/article/view/378#.XO0ZqXktAjs.mendeley>
4. Chegenizadeh, A., Keramatikerman, M. ve Nikraz, H. (2016). Flexible Pavement Modelling Using Kenlayer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(7), 2467–2479.
5. Çömez, İ. (2015). Contact Problem for a Functionally Graded Layer Indented by a Moving Punch. *International Journal of Mechanical Sciences*, 100, 339–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.07.006>
6. Ekwulo, E. O. ve Eme, D. B. (2009). Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(12), 412–421. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690094>
7. Furtana, B., Yalçın, E., Kök, B. V. ve Yılmaz, M. (2019). EVA Bazlı Reçine Modifiyeli Bitümlü Karışımların Mekanik Özellikler Bakımından SBS Modifikasyonu ile Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 497–506. <https://doi.org/10.35234/fumbd.558758>
8. Geçkil, T. (2008). Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
9. Ghayesh, M. H. (2018). Dynamics of Functionally Graded Viscoelastic Microbeams. *International Journal of Engineering Science*, 124, 115–131.
10. Ghayesh, M. H. (2019). Mechanics of Viscoelastic Functionally Graded Microcantilevers. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 73(September 2018), 492–499. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2018.09.001>
11. Giannakopoulos, A. E. ve Pallot, P. (2000). Two-Dimensional Contact Analysis of Elastic Graded Materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(8), 1597–1631. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(99\)00068-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00068-X)
12. Graczyk, M., Rafa, J. ve Zofka, A. (2016). The Selected Problems of Multi-layer Pavements - Influence of Composite Impacts Vehicles and Climatic Factors on the Behavior of Roads Pavements. *Transportation Research Procedia*, 14, 2487–2496. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.316>
13. Güler, M. A. ve Erdogan, F. (2004). Contact Mechanics of Graded Coatings. *International Journal of Solids and Structures*, 41(14), 3865–3889. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.02.025>
14. Hadi, M. N. S. ve Bodhinayake, B. C. (2003). Non-Linear Finite Element Analysis of Flexible Pavements. *Advances in Engineering Software*, 34(11–12), 657–662.
15. Hainin, R., Reshi, W. F. ve Niroumand, H. (2012). The Importance of Stone Mastic Asphalt in Construction. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17 HR(January 2012), 49–56.
16. Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design (2nd ed.)*. Pearson Prentice Hall.

17. Karakas, A. S., Kuloglu, N., Kok, B. V. ve Yilmaz, M. (2015). The Evaluation of the Field Performance of the Neat and SBS Modified Hot Mixture Asphalt. *Construction and Building Materials*, 98, 678–684. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.140>
18. Ke, L. L. ve Wang, Y. S. (2006). Two-Dimensional Contact Mechanics of Functionally Graded Materials with Arbitrary Spatial Variations of Material Properties. *International Journal of Solids and Structures*, 43(18–19), 5779–5798.
19. Ke, L. L. ve Wang, Y. S. (2007). Two-Dimensional Sliding Frictional Contact of Functionally Graded Materials. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 26(1), 171–188.
20. Kök, B. V., Yılmaz, M. ve Akpolat, M. (2014). Evaluation of the Conventional and Rheological Properties of SBS + Sasobit Modified Binder. *Construction and Building Materials*, 63, 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.015>
21. Kök, B. V. ve Çolak, H. (2011). Laboratory Comparison of the Crumb-Rubber and SBS Modified Bitumen and Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3204–3212.
22. Miteva, A. M. (2014). An Overview of the Functionally Graded Materials. *Machines. Technologies. Materials*, 8(3), 13–16.
23. Mousa, M. R., Abo-Hashema, M. A., Gadallah, A. A. ve Mousa, R. M. (2015). Evaluation Of Pavement Performance Prediction Models Under Different Traffic And Climatic Conditions. *International Conference on Asphalt, Pavement Engineering, and Infrastructure.*, February 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3311.9767>
24. Muniandy, R., Eltahir, A. ve Thamer, N. (2013). Comparison of flexible pavement performance using Kenlayer and Chev PC software program. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(9), 112–119.
25. Nie, G. J., Zhong, Z. ve Chen, S. (2013). Analytical Solution for a Functionally Graded Beam with Arbitrary Graded Material Properties. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.029>
26. Pan, E., Chen, E. ve Alkasawneh, W. (2007). *An exploratory study on functionally graded materials with applications to multilayered pavement design* (No. FHWA/OH-2007/12). Ohio. Dept. of Transportation. Office of Research and Development.
27. Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B. ve Rossi, C. O. (2019). Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/app9040742>
28. Priest, A. (2005). Calibration of Fatigue Transfer Functions for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design, *Doctoral Dissertation*, Auburn University, Auburn.
29. Sağlık, A. ve Güngör, A. G. (2008). *Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
30. Singh, R., Bhavar, V., Kattire, P., Thakare, S., Patil, S. ve Singh, R. K. P. (2017). A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 229(1).
31. Walituba, L. F. ve Van De Ven, M. F. (2000). Stresses and Strains in Flexible Pavements. *South African Transport Conference*.
32. Yılmaz, M., Kök, B. V. ve Kuloğlu, N. (2011). Effects of Using Asphaltite as Filler on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4279–4286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.072>