

ICAENS 2022



**4 th International Conference on Applied Engineering and
Natural Sciences**

November 10-13, 2022 : Konya, Turkey

Proceeding Book



4 th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences

November 10 - 13, 2022, Konya, Turkey

Typesetting

Asst. Prof. Dr. Umut ÖZKAYA

Cover Design

Asst. Prof. Dr. Umut ÖZKAYA

Editors

Asst. Prof. Dr. Umut ÖZKAYA

Publication date: 22.11.2022

ISBN: 978-605-73046-4-3



National Organizing Committee

Prof. Dr. Murat Yakar, Mersin University, Turkey

Assoc. Prof. Dr. Enes Yiğit, Uludağ University

Assoc. Prof. Dr. Halit Öztekin, Sakarya Applied Science University

Assoc. Prof. Dr. Harun Kemal Öztürk, Pamukkale University

Assoc. Prof. Dr. Merih Palandöken, İzmir Katip Çelebi University

Asst. Prof. Dr. Umut Özkaya, Konya Technical University

International Organizing Committee

Prof. Dr. Josep Guerrero, Aalborg University

Prof. Dr. Carlos A. Coelho, Universidade Nova de Lisboa

Prof. Dr. Mohammad Ashraf Gondal, King Fahd University

Prof. Dr. Weidong Zhu, University of Maryland

Assoc. Prof. Dr. Abdul Ghaffar, Government College University

Assoc. Prof. Dr. Farid Melgani, University of Trento

Assoc. Prof. Dr. Francesco Cottone, University of Perugia

Assoc. Prof. Dr. Rita Ismailova, Kyrgyz Turkish Manas University

Dr. Amina Othmani, University of Monastir -Tunisia

Dr. Arti Jain, Jaypee Institute of Information Technology

Dr. Mariya Ouaisa, Moulay Ismail University

Dr. Merdaci Slimane, University of -Sidi Bel Abbés, Algeria

Dr. Muhammad Sultan, Zakariya University



Scientific Committee

Prof. Dr. Abdurazzag Ali Aburas, University of Kwazulu-Natal

Prof. Dr. Adnan Sözen, Gazi University

Prof. Dr. Amit Soni, Manipal University

Prof. Dr. Anis Koubaa, Prince Sultan University

Prof. Dr. Carlos A. Coelho, Universidade Nova de Lisboa

Prof. Dr. Josep Guerrero, Aalborg University

Prof. Dr. Juan Vasquez, Aalborg University

Prof. Dr. Laszlo T. Koczy, Budapest University of Technology and Economics

Prof. Dr. Mohammad Ashraf Gondal, King Fahd University

Prof. Dr. Murat Yakar, Mersin University, Turkey

Prof. Dr. Muhammad Rashid, University of West Florida

Prof. Dr. Saad Mekhilef, Malaya University

Prof. Dr. Salim Ibrir, King Fahd University

Prof. Dr. Subarna Shakya, Tribhuvan University

Prof. Dr. Suzuki Hisashi, Chuo University

Prof. Dr. Usha Mehta, Institute of Technology, Nirma University

Prof. Dr. Vagif Gasimov, Azerbaijan Technical University

Prof. Dr. Weidong Zhu, University of Maryland

Assoc. Prof. Abdul Ghaffar, Government College University

Assoc. Prof. Ali Hakan Işık, Burdur Mehmet Akif Ersoy University

Assoc. Prof. Amita Nandal, Manipal University

Assoc. Prof. Aslan İnan, Yıldız Teknik University

Assoc. Prof. Atif Iqbal, Qatar University
Assoc. Prof. Francesco Cottone, University of Perugia
Assoc. Prof. Farid Melgani, University of Trento
Assoc. Prof. Halit Öztekin, Sakarya Applied Science University
Assoc. Prof. Hamdy Ziedan, Assiut University
Assoc. Prof. Harun Kemal Öztürk, Pamukkale University
Assoc. Prof. Jiri Pela, Brno University of Technology
Assoc. Prof. Merih Palandöken, İzmir Katip Çelebi University
Assoc. Prof. Rita Ismailova, Kyrgyz Turkish Manas University
Assoc. Prof. Sadia Samar Ali, King Abdul-Aziz University
Assoc. Prof. Tanmay De, National Institute Of Technology Durgapur
Assoc. Prof. Zeashan Khan, Air University
Dr. Ali Almisreb, International University of Sarajevo
Dr. Amina Othmani, University of Monastir-Tunisia
Dr. Arti Jain, Jaypee Institute of Information Technology
Dr. Arun Kumar Verma, Malaviya National Institute of Technology Jaipur
Dr. Aziz Shah, University of Glaskow
Dr. Bal Chand Nagar, ECE National Institute of Technology Patna
Dr. Baoze Wei, Aalborg University
Dr. Bohumil Brtník, University of Pardubice
Dr. Diptiranjan Behera, The University of the West Indies at Mona
Dr. Fayçal BENSALI, Qatar University
Dr. Fugui Qi, Fourth Military Medical University
Dr. Magdi S. Mahmoud, King Fahd University
Dr. Mariya Ouaisa, Moulay Ismail University
Dr. Merdaci Slimane, University of -Sidi Bel Abbés, Algeria
Dr. Moharram Challenger, Antwerp University

Dr. Muhammad Sultan, Zakariya University

Dr. Lesya Anishchenko, Bauman Moscow State Technical University

Dr. Sadina Gagula Palalić, International University of Sarajevo

Dr. Stefania Tomasiello, University of Tartu

Dr. Syed Omer Gilani, National University of Sciences and Technology (NUST)

Dr. Tarık Namas, International University of Sarajevo

Dr. Uduak A. Umoh, University of Uyo

Dr. Yajuan Guan, Aalborg University



Topics

Engineering

Aerospace Engineering
Agricultural Engineering
Biological Engineering
and Sciences
Biological Systems
Engineering
Biomedical Engineering
Bioprocess Engineering
Chemical Engineering
Civil Engineering
Computer Engineering
Electrical Engineering
Electronic Engineering
Energy Engineering
Environmental
Engineering
Food Engineering
Geotechnical Engineering
Genetic Engineering
Industrial Engineering
Manufacturing
Engineering
Materials Engineering

Mechanical Engineering
Mining and Geophysical
Engineering
Nanoengineering
Nuclear Engineering
Petroleum Engineering
Power Engineering
Process Engineering
Forest Industry
Engineering
Structural Engineering
Systems and Software
Engineering
Textile Engineering
Thermal Engineering
Web Engineering

Natural Sciences

Astronomy and Space
Sciences
Atmospheric Sciences
Biological Sciences
Botany
Bacteriology
Chemistry

Fisheries and Aquaculture
Sciences
Forestry Sciences
Genetics
Geological Sciences
Materials Science
Mathematics
Medical Sciences
Meteorology
Microbiology
Mineralogy
Palaeoecology
Pharmacology
Physical Sciences
Physics
Plant Sciences
Psychology
Statistics
Systems Biology

Sathi Kaplamalı Üstyapı Tasarımında Mekanistik Yaklaşım

Yavuz ABUT

Ulaştırma Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4249-7791
(yavuz.abut@yalova.edu.tr)

Özet – Üstyapı tasarımında, servis yüklerindeki çeşitlilikler, malzeme karakteristiklerindeki belirsizlikler, yağış ve sıcaklık gibi değişen çevre koşulları, coğrafi farklılıklar gibi karmaşık etkiler rol oynamaktadır. Tasarı aşamasında, mekanistik-ampirik yöntemlerin kullanılması giderek artmakta, deneysel yöntemlere dayanan birçok yaklaşım, yerini performans kriterlerinin olduğu mekanistik yaklaşımlara bırakmaktadır. Birçok ülkede proje hazırlayıcı idare veya kuruluşlar, şartnamelerini bu yöntemlere dayandırarak oluşturmaya başlamıştır. Ülkemizde de bu adaptasyon çalışmaları devam etmektedir. Bu yöntemler, genellikle yüksek hacimli esnek ve rijit üstyapı modellerinde kullanılmakta, düşük hacimli sathi kaplamalı üstyapı modellerinde ekonomik gerekçelerden ötürü kullanımı sınırlı tutulmaktadır. Bu çalışmada, sınırlı olan bu çalışma bölgesine ışık tutmak için; sathi kaplamalı üst yapılarda kesit tasarımı, mekanistik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bu amaçla, taban zemininin üst kısmındaki kalıcı şekil değiştirme miktarına (compressive strain on the top of subgrade) bir sınır değer getirilerek (1 yıl sonunda erişilebilecek kalıcı şekil değiştirme miktarı), taban zemini Esneklik Modülü (M_R) ile Toplam Standart Dingil Sayısı (TSDS)'nin alt-temel tabakası derinliğiyle olan ilişkisi araştırılmıştır. Bunun için KENLAYER yazılımından faydalanılmıştır. Çalışma sonucunda; mekanistik tasarımda M_R ve TSDS ile kesit değişkenliği arasında kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür. Ayrıca Tepki Yüzeyi Yöntembilgisi (TYY) yardımıyla bir dizayn kataloğu geliştirilerek, ampirik yöntemlere alternatif bir çözüm sunulmuştur. Ekonomik bir değerlendirmede ise, orta sınıf zemin M_R değerlerinde mekanistik yöntemin, görece daha pahalı bir çözüm sunduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Sathi Kaplamalar, Zemin Esneklik Modülü, Mekanistik Yol Tasarımı, Optimum Tabaka Kalınlığı, Kalıcı Deformasyon

I. GİRİŞ

Yol tasarımı; dinamik yüklemeler, doğrusal olmayan malzeme karakteristikleri ve farklı çevre koşullarını ilgilendiren karmaşık bir konudur. ASSHTO'nun (American Association of State Highway and Transportation Officials) yayınlamış olduğu üstyapı tasarım rehberlerinde deneysel (ampirik) metotlar baz alınarak, bir takım yol testleri yapılmış ve buna bağlı olarak bazı formüller elde edilmiştir (1972, 1986, 1993) [1]. 1993'ten sonra ise mekanistik-ampirik tasarım yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Mekanistik-ampirik tasarım yöntemindeki esaslar, büyük ölçüde Ulusal Birleşik Yol Araştırmaları Programı (NCHRP) tarafından yapılan NCHRP 1-37A projesinde

belirtilmiştir [2]. Bu tasarım metodunda; yorulma, tekerlek izi, sünme, yüzey düzgünlüğü ve birtakım durabilite özellikleri hakkında kapsamlı bir yaklaşım kabul edilerek, performans kriterleri geliştirilmiştir. Sınır koşullar ise, gerilme (stress), şekil değiştirme (strain) ve yer değiştirme (displacement) gibi reolojik karakterler göz önüne alınarak oluşturulmuştur.

Mekanistik-ampirik tasarım yöntemi; bir yolda trafik yükü ve çevresel faktörlerden dolayı oluşan gerilme-deformasyonları mekanik teorilerle göre analiz eder. Bu yönüyle ampirik yöntemlerden bir adım öndedir. Çünkü bu yöntemde, tahmin ve gözlemden çok sayısal analiz mevcuttur, bu da daha reel sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır [3].

Ampirik tasarımda ise; deneysel ve gözlemsel verilerden faydalanılır. Günümüzde yol tasarımı için yaygın olarak ampirik tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle; belli bir trafik yükü, yol malzemesinin fiziksel özellikleri ve iklim koşulları göz önünde bulundurularak yolun belirli bir gerilme-deformasyon değeri için oluşacak hasarlara göre performansı ve davranışı tahmin edilir [4]. Bu yöntemde önceki arazi tecrübeleri ve gözlemlerden elde edilen sonuçlardan faydalanmak önemlidir. Ayrıca bu yöntemde kullanılan en yaygın deney CBR (California Bearing Ratio) deneyidir. Bu yöntemde, üstyapı tabaka kalınlıkları; zemin taşıma gücü, trafik yükü, coğrafi konum, iklim koşulları ve yol malzemesinin davranış özellikleri göz önünde bulundurularak tayin edilir. Esnek üstyapı tasarımında öncelikli olarak taşıt dingil tipleri 8,2 tona çevrilir. Taban zemininin taşıma gücü, üstyapı tabakalarının kalınlıklarını etkilemektedir. Bu yüzden Lodometre çalışmasından sonra yol taban zemininin taşıma gücünü belirlemek amacıyla CBR ve Esneklik Modülü (MR) deneyleri yapılır. (MR) değeri; laboratuvar deneyi veya CBR değeri ile olan ilişkisinden, kataloglardan veya formüller yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Esnek üstyapı tasarımında son olarak çevre ve iklim faktörleri göz önünde bulundurularak gerekli servis kabiliyetinin sağlanması amacıyla, yol drenaj altyapısı projelendirilir. Şu an dünyada ve ülkemizde genel itibarıyla yol tasarımı ampirik yöntemlerle yapılmaktadır. Fakat mekanistik-ampirik yöntemlere geçiş için yoğun çalışmalar mevcuttur. Ülkemizde de bu yönde çalışmalar başlamıştır [5].

Sathi Kaplamalı üstyapılar, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğunda bulunan yol ağının yaklaşık %69'unu teşkil etmekle beraber [6], Büyükşehir Belediyeleri ulaştırma planları ve alt yapı hizmetlerinde de ciddi bir yer tutmaktadır. Dünya genelinde sıklıkla yüzey koruyucu/düzenleyici/yenileyici kaplama olarak kullanılmakta ise de Ülkemiz genelinde genellikle düşük hacimli yollarda kademeli inşaat olarak projelendirilir; birkaç yıl hizmet veren bu kaplamalar daha sonra yerlerini asfalt kaplamalara bırakmaktadırlar. Bu tür üstyapıların tasarımında, geniş ölçüde Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (EÜPR-2008) kullanılmaktadır. Bu yayın, büyük ölçüde 1993 AASHTO deneysel (ampirik) tasarım metodunu baz almaktadır [5].

Bu çalışma kapsamında ise, sathi kaplamalı üst yapılarda kesit tasarımı, mekanistik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Bu mekanistik bakış açısıyla; daha uzun servis yeteneğine haiz, yani servis süresinde daha az deformasyon gösteren üstyapıların tasarlanabileceği hedeflenmektedir. Bu amaçla, taban zemininin üst kısmındaki kalıcı şekil değiştirme miktarına bir sınır değer getirilerek (1 yıl sonunda erişilebilecek kalıcı şekil değiştirme miktarı), taban zemini Esneklik Modülü (MR) ve Toplam Standart Dingil Sayısı (TSDS)'nin farklı modlarına göre alt-temel tabakası kesit derinliğinin değişkenliği araştırılmıştır. Modelin kurulmasında KENLAYER [7] programından faydalanılmıştır. Ayrıca, değişkenliğin ekonomik bir değerlendirmede hangi taban zemini esneklik modülü değerlerinde daha etkili olduğu, Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (2008)'ndeki ilgili dizayn kataloğuyla kıyaslanarak tespit edilmiştir. Son aşamada ise, bağımsız değişkenlerden bir tepki yüzeyi oluşturularak, tarif edilen sınır koşullarında; alt-temel kalınlığı için bir dizayn kataloğu geliştirilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

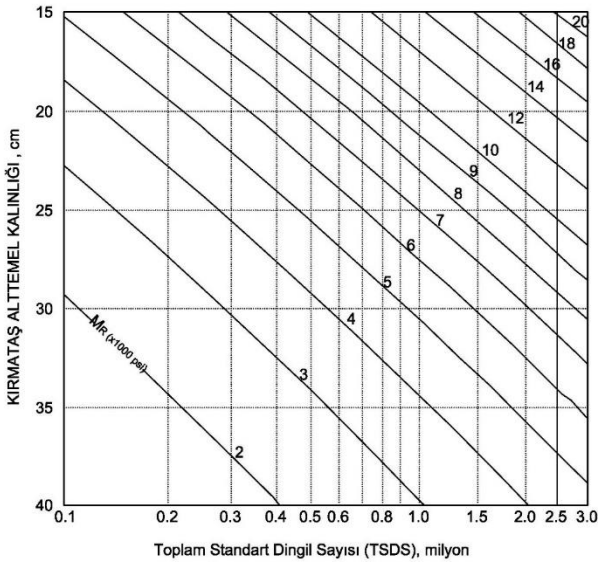
Çalışma kapsamında, EÜPR-2008'de belirtilen Sathi Kaplama Dizayn esasları dikkate alınacaktır. Tarif edilen yönteme göre, zemin karakteristikleriyle ilişkili farklı sayılarda TSDS ve taban zemini MR değerleri kullanılarak, KENLAYER programında bir zemin modeli geliştirilecektir. Mekanistik tasarım yaklaşımıyla tanımlanan sınır koşulları ve sonrasında çıkan sonuçlara göre, farklı sayılardaki TSDS ve taban zemini MR değerlerinin alt-temel kalınlığı ile olan değişimi incelenecektir.

A. Literatürdeki Çalışmalar

Yol üst yapı tabakalarında müsaade edilebilir gerilme ve şekil değiştirme miktarları hakkında birtakım araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları; Asphalt Institute (1982) [8], Otte ve diğerleri (1982) [9], Jameson ve diğerleri, Austroads (2004) [10], NAASRA Siddique and Rajbongshi (2005) [11], Heukelom and Klomp Ekwulo and Eme (2009) [12] 'dir. Bu çalışma kapsamında Asphalt Institute (1982)'nin [8] sınır koşulu kabul edilecek olup, detayları Bölüm C'de verilmiştir.

B. EÜPR-2008'e Göre Tasarım

Rehberine göre; sathi kaplama, yolun kabul edilen hizmet süresi boyunca geçecek, TSDS; 2x106 dan az olan yollarda uygulanmalıdır. TSDS; 500.000'den küçük ise tek kat, bunun üstündeki trafik değerleri için çift kat sathi kaplama yapılmalıdır. 2x106-3x106 arasında olan yollarda ise sıcak karışım kaplama gerekmekte ise de ekonomik durumlar göz önüne alınarak ve proje ömrü kısa tutularak çift kat sathi kaplama yapılabilir. Sathi kaplamalı üst yapılar, taban zemininin MR değeri ve yolun proje süresi boyunca geçecek TSDS'na göre projelendirilmelidir. Sathi kaplamalı üstyapıların kalınlıkları Sekil 1'deki dizayn kataloğu yardımıyla bulunur. Kataloğun göz önüne alınan proje süresi 10 yıl olmakla beraber, projeci; yolun önemi ve özelliğini göz önüne alarak proje süresini daha az veya daha fazla kabul edebilir. [5]



Şekil 1. Sathi Kaplamalı Esnek Üstyapılar İçin Projelendirme Kataloğu [5]

C. KENLAYER'e Göre Tasarım

KENLAYER, dairesel yüklemeler altında, Burmister'in (1945) çok katmanlı yay sistemleri teorisi ışığında zemin davranışını modellemek için Huang (1993) tarafından geliştirilen bir yazılımdır. Bütün katmanlar; doğrusal elastik, homojen, izotropik kabul edilir. Program; tek dingil, tandem, dual-tandem ve tridem gibi çoklu aks/tekerlek modları için çözüm kolaylığı sağlamakta, doğrusal elastik, doğrusal olmayan elastik ve visko-elastik

davranış modlarının teker teker veya karışık şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

KENLAYER'a aşağıdaki bilgiler veri olarak girilmektedir;

- Tabaka sayısı ve yükseklikleri
- Malzeme Esneklik Modül ve Poisson Oranları
- Etki eden dingil yükü sayısı
- Tekerlek konumu, yarıçapı, kuvveti ve basıncı
- Gerilme ve şekil değiştirme değeri istenen koordinatlar
- Performans kriterleri (rutting, fatigue vs) [7].

D. KENLAYER'e Veri Aktarımı

Sathi kaplamalı üstyapılarda, en üstteki yapı ince bir kaplama olarak teşkil edildiğinden, bu tabakanın toplam taşıma kapasitesine katkısı yok denecek kadar azdır. Dolayısıyla modelin kurulmasında üstyapı kaplaması dikkate alınmayacaktır. Böylelikle, aşağıdan yukarıya doğru Şekil 2a'daki gibi alt-temel ve temel olmak koşuluyla iki tabakalı doğrusal elastik bir sistem olarak çözümlenmektedir ve Şekil 2b'deki işlem algoritması kullanılacaktır. Temel tabakası EÜPR-2008'de belirtildiği gibi sabit ve 20 cm olarak kabul edilecektir. 5 farklı taban zemini (MR) değeri, 5 farklı TSDS kullanılarak oluşturulan veri seti Tablo 1'de gösterilmiştir. Alt-temel ve temele ait (MR) değerleri sırasıyla 130 MPa (18.840 psi) ve 230 MPa (33.300 psi), poission oranları ise 0,45 olarak kabul edilmiştir. Tekerlek basıncı ve yarıçapı ise FHWA (1978)'e uygun olarak sırasıyla 552 kPa (80 psi) ve 15,2 cm alınmıştır.

Program içerisinde modelde kullanılacak olan performans kriteri ise, Asphalt Institute (1982)'nin [8] önerdiği şekliyle Denklem 1 yardımıyla tespit edilecektir.

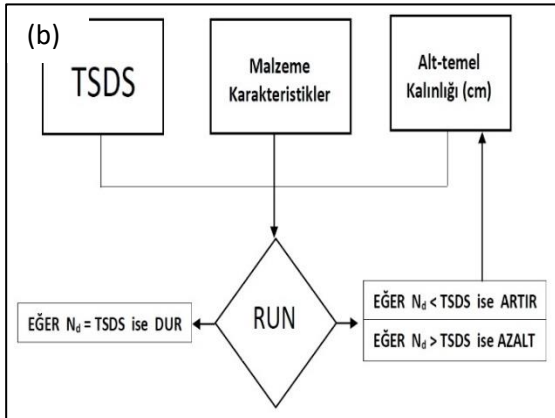
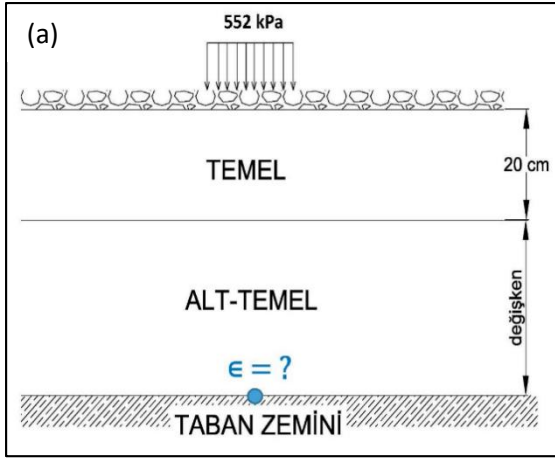
$$N_d = f_4 * (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (1)$$

Burada;

N_d : Müsaade edilebilir dingil yükü tekerrür sayısı

ϵ_c : Taban zemini üzerinde oluşan kalıcı şekil değiştirme miktarı

f_4 ve f_5 : sabitler (1,365 x 10⁻⁹ ve 4,477)



Şekil 2. Kurulan modelin düşey en kesiti (a) ve işlem algoritması (b)

Tablo 1. KENLAYER'a tanıtılan veri seti

Grup No	Sıra No	Taban Zeminin Esneklik Modülü - M_R MPa (psi)	Toplam Standart Dingil Sayısı - TSDS milyon
1	1	13.8 (2,000)	0.1
	2	13.8 (2,000)	0.4
2	3	20.7 (3,000)	0.1
	4	20.7 (3,000)	0.4
	5	20.7 (3,000)	0.8
3	6	34.5 (5,000)	0.1
	7	34.5 (5,000)	0.4
	8	34.5 (5,000)	0.8
	9	34.5 (5,000)	1.5
	10	34.5 (5,000)	3
4	11	62.1 (9,000)	0.1
	12	62.1 (9,000)	0.4
	13	62.1 (9,000)	0.8
	14	62.1 (9,000)	1.5
	15	62.1 (9,000)	3
5	16	120.0 (17,400)	0.1
	17	120.0 (17,400)	0.4
	18	120.0 (17,400)	0.8
	19	120.0 (17,400)	1.5
	20	120.0 (17,400)	3

III. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İlk aşamada, her bir adımda KENLAYER'a veri girildikten sonra; müsaade edilebilir dingil yükü tekrür sayısı (Nd), TSDS'na eşit oluncaya dek; deneme yanılma yöntemi kullanılarak alt-temel tabaka kalınlığı tespit edilmiştir (Tablo 2, sütun 5).

İkinci aşamada, iki bağımsız (MR, TSDS) ve bir bağımlı değişken (Alt-temel tabaka kalınlığı) ile, ikinci dereceden bir polinom denklem kurulmuş (Denklem 2), regresyon analizine göre katsayılar belirlenerek (Denklem 3), her bir seri için bir alt-temel tabaka kalınlığı hesaplanmıştır (Tablo 2, sütun 6).

$$ALT-TEMEL KALINLIĞI (cm) = b_0 + b_1 (M_R) + b_2 (TSDS) + b_3 (M_R)^2 + b_4 (TSDS)^2 + b_5 (M_R) * (TSDS) \quad (2)$$

$$ALT-TEMEL KALINLIĞI (cm) = 52.26 - 0.5916 (M_R) + 23.59 (TSDS) + 0.002304 (M_R)^2 - 4.364 (TSDS)^2 - 0.0260 (M_R) * (TSDS) \quad (3)$$

Üçüncü aşamada, Şekil 1'deki katalog yardımıyla alt-temel tabaka kalınlıkları tespit edilmiştir (Tablo 2, sütun 7). Son aşamada ise, birinci aşama ile üçüncü aşamada tespit edilen tabaka kalınlıklarının farkları tespit edilmiştir (Tablo 2, sütun 8).

Tablo 2. Alt-temel tabaka kalınlıkları için veri seti sonuçları

Grup No	Sıra No	Taban Zeminin Esneklik Modülü M_R MPa (psi)	Toplam Standart Dingil Sayısı TSDS (milyon)	Alt-temel tabaka kalınlığı (cm)			
				KENLAYER	Denklem (3)	AASHTO 1993 (EUPR 2008)	(Δ) = KENLAYER - AASHTO 1993
1	1	13.8 (2,000)	0.1	44.5	46.8	29.0	15.5
	2	13.8 (2,000)	0.4	56.7	53.1	40.0	16.7
2	3	20.7 (3,000)	0.1	40.2	43.3	23.0	17.2
	4	20.7 (3,000)	0.4	51.7	49.5	32.5	19.2
	5	20.7 (3,000)	0.8	58.1	56.6	38.0	20.1
3	6	34.5 (5,000)	0.1	34.0	36.8	15.1	18.9
	7	34.5 (5,000)	0.4	44.6	43.0	24.0	20.6
	8	34.5 (5,000)	0.8	50.5	50.0	28.0	22.5
	9	34.5 (5,000)	1.5	56.2	58.8	33.0	23.2
	10	34.5 (5,000)	3	63.0	63.4	38.5	24.5
4	11	62.1 (9,000)	0.1	25.8	26.6	15.0	10.8
	12	62.1 (9,000)	0.4	35.3	32.5	15.1	20.2
	13	62.1 (9,000)	0.8	40.6	39.2	20.0	20.6
	14	62.1 (9,000)	1.5	45.7	47.6	23.5	22.2
	15	62.1 (9,000)	3	51.7	51.1	28.0	23.7
5	16	120.0 (17,400)	0.1	15.6	16.4	15.0	0.6
	17	120.0 (17,400)	0.4	23.8	21.9	15.0	8.8
	18	120.0 (17,400)	0.8	28.3	28.0	15.0	13.3
	19	120.0 (17,400)	1.5	32.7	35.3	15.0	17.7
	20	120.0 (17,400)	3	37.7	36.6	18.0	19.7

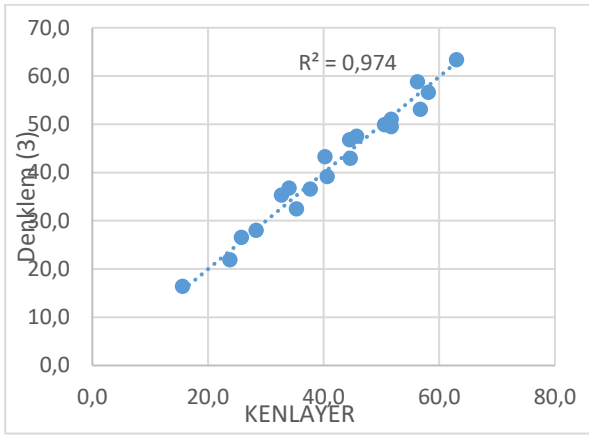
Denklem 3 için, regresyon modelindeki katsayıların anlamlılık düzeyleri, standart sapma (S), R^2 , R^2_{adj} , ANOVA yardımıyla tespit edilerek

Tablo 3’de, tahmin modelinin regresyon grafiği ise Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Regresyon modeli için ANOVA sonuçları

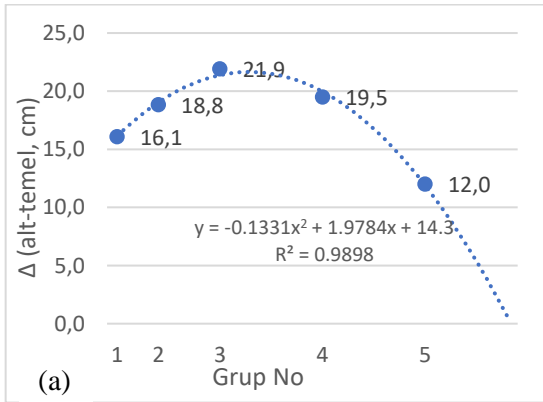
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	3023.0	604.6	107.29	0.000
M_R	1	348.1	348.1	61.78	0.000
TSDS	1	549.2	549.2	97.47	0.000
M_R^2	1	103.7	103.7	18.40	0.001
$TSDS^2$	1	228.6	228.6	40.56	0.000
$M_R * TSDS$	1	15.1	15.1	2.69	0.123
Error	14	78.9	5.6		
Total	19	3101.9			

S	R^2	R^2_{adj}
2.374	%97.5	%96.6

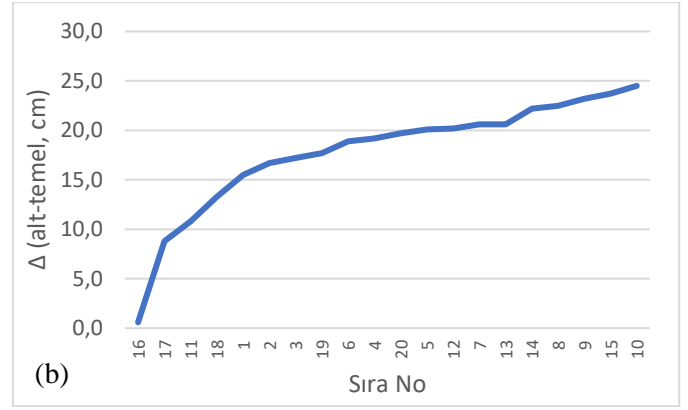


Şekil 3. Tahmin modelinin regresyon grafiği

Mekanistik çözümlerle ampirik çözümler arasındaki farkı ortaya koymak adına alt-temel kaplama kalınlıkları farkları tespit edilmiştir (Tablo 2, sütun 8). Bu fark verileri yardımıyla kesit farklılığının hem kombinasyon (grup) bazında ve hem de taban zemini M_R değeri (seri) bazında değişimi grafikler yardımıyla gösterilmiştir (Şekil 4a ve Şekil 4b).

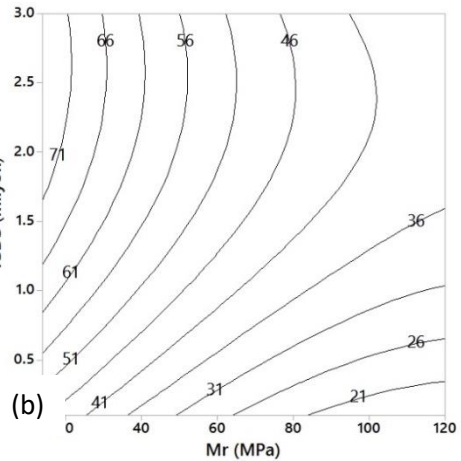
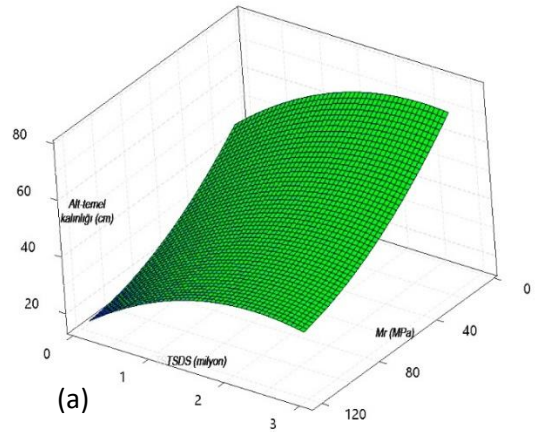


Şekil 4 (a). Mekanistik çözümlerle ampirik çözümler arasındaki kesit farklılıkları (cm)



Şekil 4 (b). Mekanistik çözümlerle ampirik çözümler arasındaki kesit farklılıkları (cm)

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, M_R ve TSDS arasındaki etkileşimin farklılığı, alt-temel kalınlığının tespitinde doğrusal olmayan bir ilişkiyi ortaya çıkarmaktadır. Bu etkileşimi daha anlaşılır kılmak için, Minitab [13] yazılımıyla Tepki Yüzeyi Yöntem Bilgisi; TYY (Response Surface Methodology; RSM) [14] kullanılarak bir Tepki Yüzeyi ve bir dizayn kataloğu geliştirilmiştir (Şekil 5a ve Şekil 5b).



Şekil 5. TYY ile oluşturulan Tepki Yüzeyi (a) ve dizayn kataloğu (b)

IV.SONUÇ VE ÖNERİLER

Üstyapı tasarımında, servis yüklerindeki çeşitlilikler, malzeme karakteristiklerindeki belirsizlikler, yağış ve sıcaklık gibi değişen çevre koşulları, coğrafi farklılıklar gibi karmaşık etkiler rol oynamaktadır. Bu karmaşıklığı en aza indirmek adına, birtakım deneysel çalışmalar yapılmış, 20. yüzyılın sonlarına kadar üstyapı tasarımında ampirik yöntemler kullanılmıştır. Günümüzde ise çözümlenemelerde yetersiz kalan bu bakış açısı, mekanistik yöntemlere evrilmektedir. Bu çalışmada, sathi kaplamalı üstyapı tasarımında mekanistik tasarımla elde edilecek üstyapı tabaka kalınlıklarının, ampirik yöntemlerle elde edilenlere kıyaslaması yapılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Mekanistik tasarımda MR ve TSDS ile kesit değişkenliği arasında kuvvetli bir ilişki olduğu görülmüştür; tanımlanan regresyon modelinde, standart sapma (S) = 2,374, (R^2) = %97,5, ($R^2_{adj.}$) = %96,6, p-value = 0,000 (Tablo 3, Şekil 3). Ayrıca ANOVA analizinden anlaşılacağı gibi, MR*TSDS dışındaki bütün katsayıların %99 güvenilirlik düzeyinde anlamlı olduğu görülmektedir (Tablo 3).
- Mekanistik tasarım ile ampirik tasarım arasındaki kesit farklılıkları incelendiğinde, 3. ve 4. grup veri setinin (MR = 34,5 MPa, 62,1 MPa) daha fazla değişkenlik gösterdiği görülmüştür (Şekil 4a). Farklılığın, minimum ve maksimum zemin değerlerinde orta noktalardan daha az değerlerde seyrederek içbükey bir şekil almasının nedeninin, Şekil 1'deki sınır koşullardan kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Kesit farklılığı sıra bazında incelendiğinde ise, en az farkın Sıra 16'da (0,6 cm), en fazla farkın ise Sıra 10'da (24,5 cm) olduğu görülmektedir (Tablo 2, Şekil 5b). Şekil 4b'deki değişimin azalarak artması; belli bir MR değerinden sonra (Örneğin 120 MPa) kalıcı deformasyonun çok azaldığı, bu yönüyle mekanistik çözümün ampirik esaslara yakınsadığı anlaşılmaktadır.

- Ekonomik bir değerlendirmede orta sınıf zemin MR değerlerinde mekanistik yöntem, görece daha pahalı bir çözüm sunmaktadır.
- Tepki Yüzeyi Yöntembilgisi (TYY) ile oluşturulan Şekil 5b'deki dizayn kataloğu yardımıyla, değişik MR ve TSDS değerlerine göre mekanistik bir yaklaşımla tasarlanacak sathi kaplamalı üstyapı tasarımının, Şekil 1'deki ampirik yöntemle elde edilecek kesit tasarımına alternatif bir çözüm olabileceği düşünülmektedir.
- Teorik olarak hesaplanan taban zeminindeki plastik şekil değiştirme miktarının, benzer yük ve malzeme karakteristikleri ile deneysel olarak da tespit edilebilmesi bundan sonraki çalışmalarda ele alınması gereken ayrı bir konu olacaktır. Bununla birlikte 2'den fazla katmanda teşkil edilen tabakalı yapılarda da inceleme yapılmalıdır. Ara tabakalarda temel ve alt-temel için farklı MR değerlerinin kullanıldığı modellerin teşkil edilmesi ve benzeri çalışmaların deneysel sonuçlarla (mesela Düşey Ağırlıklı Deflektometre; Falling Weight Deflectometer, FWD) desteklenmesi mekanistik-ampirik açıdan kurulacak modeli daha da güçlendirecektir.

KAYNAKLAR

- [1] AASHTO, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1972, 1986, 1993.
- [2] NCHRP, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Project 1-37A, National Research Council, Washington, DC, 2004.
- [3] Carvalho, R.L., Mechanistic-Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study, Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, 2006.
- [4] Ali, O., Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (NCHRP 1-37A), Report No: UR 3002.1, Contract No: Research Report 216, Program: Urban Infrastructure, National Research Council Canada, 2005.
- [5] Sağlık, A., Güngör, A.G, 2008, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, KGM, ANKARA.
- [6] Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013, Faaliyet Raporu.
- [7] Huang, Y.H., 1993, Pavement Analysis And Design. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.

- [8] Asphalt Institute, Research and Development of Asphalt Institute Thickness Design Manual, 9th ed., Research Report, The Asphalt Institute, 1982, 82–2.
- [9] Otte Eddie, Savage Phillip F, Monismith Carl L. Structural design of Cemented Pavement layers. Proc Am Soc Civil Eng ASCE 1982;108(TE4):428–46.
- [10] Austroads, Technical basis of Austroads pavement design guide, AP-T-33 (2004), Austroads, Sydney.
- [11] Siddique Abu, Rajbongshi Bipradas. An analytical study on design and analysis of stabilized rural roads. Proc Eastern Asia Soc Transport Stud 2005;5:813–28.
- [12] Emmanuel Ekwulo O, Eme Dennis B. Fatigue and rutting strain analysis of flexible pavements designed using CBR methods. Afr J Environ Sci Technol 2009;3:412–21.
- [13] “Minitab Statistical Software - Minitab" Software for Statistics, Process Improvement, Six Sigma, Quality - Minitab.
- [14] Myers, Raymond H.; Montgomery, Douglas C.; Anderson-Cook, Christine M., 2009, Response Surface Methodology. New York: Wiley