Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

DÜŞEN AĞIRLIK DEFLEKTOMETRE (FWD) VERİLERİNE DAYALI TABAN ZEMİNİ MODÜLÜ GERİ HESAPLAMASININ YENİDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

REVISITING SUBGRADE MODULUS BACKCALCULATION FROM FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) DATA

M. İrşad ÖZKAYNAK[1], Yüksel YILMAZ[2]

ÖZET

Bu çalışmada düşen ağırlık deflektometre (FWD) ölçümlerine dayalı taban zemini elastik modülünün geri hesaplanması, tabaka modelleme yaklaşımları ve farklı analiz yöntemlerinin etkisi dikkate alınarak yeniden değerlendirilmiştir. Analizler, Elmod 6 yazılımı kullanılarak üç tabakalı (kaplama, granüler ve taban zemini) standart profilin yanı sıra tabaka kalınlıklarının değiştirildiği ve tabakaların alt bileşenlere ayrıldığı alternatif modelleme senaryoları altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca analiz yöntemi olarak eşdeğer kalınlık yöntemi (MET), sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve doğrusal elastik teori (LET) yaklaşımları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, geri hesaplanan taban zemini elastik modülünün hem tabaka modelleme yaklaşımına hem de kullanılan analiz yöntemine duyarlı olduğunu göstermektedir. Granüler tabaka kalınlığındaki artışın alt tabakalara aktarılan gerilmeleri azaltarak daha yüksek modül değerlerine yol açtığı belirlenmiştir. Örneğin granüler tabaka kalınlığı 3 katına çıktığında modül değerleri yaklaşık %40 artış göstermiştir. Buna karşılık kaplama tabakasının alt katmanlara ayrılması, taban zemini üzerindeki gerilme-şekil değiştirme davranışını değiştirerek hesaplanan modül değerlerinde %25 dolaylarında azalmaya neden olmuştur. MET yaklaşımının çoğu durumda diğer yöntemlere nazaran yaklaşık %5 daha yüksek elastik modül değerleri ürettiği, FEM yaklaşımının ise gerilme dağılımını daha gerçekçi temsil ederek dengeli sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma FWD verilerinin yorumlanmasında tabaka modelleme yaklaşımlarının dikkatli şekilde tanımlanmasının gerekliliğini vurgulamakta ve uygun olmayan varsayımların önemli sapmalara yol açabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Düşen ağırlık deflektometre, geri hesaplama, taban zemini elastik modülü, tabaka modelleme, analiz yöntemi*

ABSTRACT

In this study, the backcalculation of subgrade elastic modulus based on falling weight deflectometer (FWD) measurements was revisited by considering the influence of layer modeling approaches and different analysis methods. The analyses were carried out using Elmod 6 software under both a standard three-layer profile (pavement, granular, and subgrade) and alternative modeling scenarios in which layer thicknesses were varied and layer were separated into their constituent sub-layers. In addition, the method of equivalent thickness (MET), finite element method (FEM), and linear elastic theory (LET) were comparatively evaluated as analysis approaches. The findings indicate that the backcalculated subgrade elastic modulus is sensitive to both the adopted layer modeling approach and the selected analysis method. It was observed that increasing the thickness of the granular layer reduces the stresses transmitted to the underlying layers, resulting in higher modulus values. For instance, when the granular layer thickness was increased by a factor of three, the modulus values increased by approximately 40%. In contrast, separating the pavement layer into sub-layers altered the stress-strain behavior of the subgrade, leading to reduction of about 25% in the

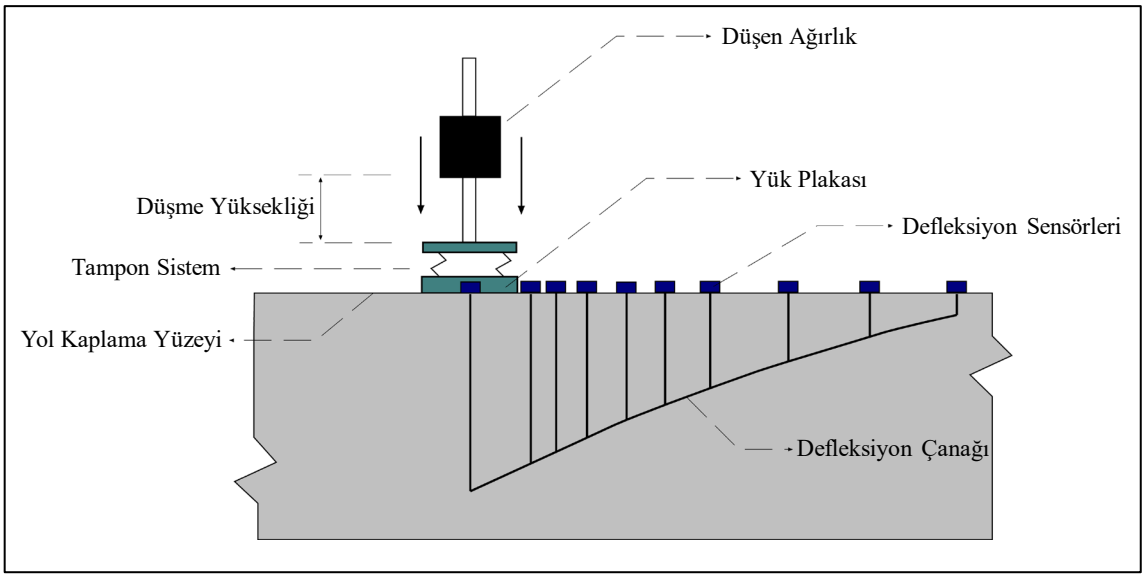
[1] Dr., Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Dairesi Başkanlığı, irsadozkaynak@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Prof.Dr., Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, yyuksel@gazi.edu.tr

calculated modulus values. The MET approach generally produced elastic modulus values approximately 5% higher than those obtained from other methods, whereas the FEM approach yielded more balanced results by more realistically representing stress distribution. This study emphasizes the necessity of carefully defining layer modeling approaches in the interpretation of FWD data and shows that inappropriate assumptions may lead to significant deviations in the estimated subgrade modulus.
Keywords: *Falling weight deflectometer, backcalculation, subgrade elastic modulus, layer modeling, analysis method*

1. GİRİŞ

Karayolu üstyapılarının yapısal durumunun doğru şekilde değerlendirilmesi, bakım-onarım stratejilerinin planlanması ve yeni üstyapı tasarımlarının güvenilir biçimde gerçekleştirilmesi için tabaka modüllerinin doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla kullanılan tahribatsız test (NDT) yöntemleri, trafik akışını kesintiye uğratmadan kısa sürede geniş yol ağlarının değerlendirilmesine olanak sağlamaları nedeniyle günümüzde yaygın olarak tercih edilmektedir. NDT yöntemleri arasında gerçek trafik yükünü dinamik olarak temsil edebilmesi ve tabaka davranışını doğrudan yansıtan defleksiyon ölçümleri sağlayabilmesi nedeniyle düşen ağırlık deflektometre (FWD) en yaygın kullanılan sistemlerden biri olarak ön plana çıkmaktadır (Romeo, 2022; Rakvi, 2021).

FWD deneyinde belirli bir yükseklikten bırakılan ağırlık, tampon sistemi aracılığıyla yük plakasına aktarılmakta ve kaplama yüzeyinde kısa süreli dinamik bir yük oluşturulmaktadır. Bu yükleme sonucunda meydana gelen düşey yer değiştirmeler, yük merkezinden farklı uzaklıklara yerleştirilen defleksiyon sensörleri tarafından eş zamanlı olarak ölçülmektedir. Bu ölçümler sonucunda elde edilen defleksiyon çanağı, üstyapının yük altındaki yapısal davranışını temsil eden temel girdiyi oluşturmaktadır (Erkmen, 2023). Şekil 1'de FWD sisteminin çalışma prensibi ve ölçüm sırasında oluşan tipik defleksiyon çanağı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. FWD sisteminin çalışma prensibi ve defleksiyon çanağı (Özkaynak, 2026)

FWD ölçümlerinden elde edilen defleksiyon verileri doğrudan tabaka modüllerini ifade etmemektedir. Bu nedenle üstyapı tabakalarına ait elastik modüllerin belirlenebilmesi amacıyla geri hesaplama yaklaşımı kullanılmaktadır. Geri hesaplama işleminde, ölçülen defleksiyon çanağı esas alınarak seçilen üstyapı modeli için teorik defleksiyonlar

hesaplanmakta ve hesaplanan değerler ile saha ölçümleri arasındaki fark iteratif optimizasyon algoritmaları yardımıyla en aza indirilmektedir. İteratif optimizasyon işlemi sonunda, ölçülen ve teorik defleksiyon çanakları arasındaki uyumu en iyi sağlayan tabaka elastik modülleri belirlenmektedir (ASTM, 1989).

Geri hesaplama işlemi matematiksel olarak ters çözüm niteliği taşımaktadır. Yani aynı defleksiyon çanağı birden fazla tabaka modül kombinasyonu ile temsil edilebildiğinden, elde edilen modül değerleri yalnızca ölçüm verilerine değil seçilen tabaka modeli, tabaka kalınlıkları, başlangıç parametreleri ve kullanılan analiz yöntemine de bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle geri hesaplama sonuçlarının güvenilirliği, kullanılan modelleme yaklaşımının doğruluğu ile yakından ilişkilidir (FHWA, 2017).

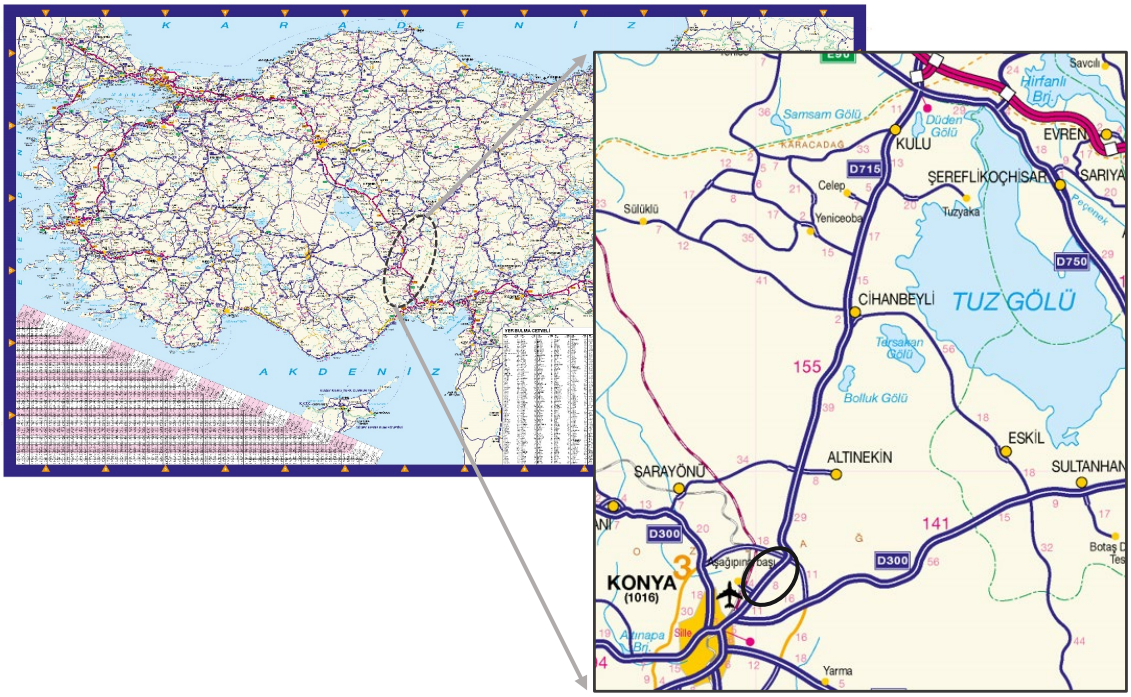
Literatürde FWD verilerine dayalı geri hesaplama çalışmaları, büyük ölçüde geri hesaplanan elastik modüller ile laboratuvar deneylerinden elde edilen esneklik modülleri arasındaki ilişkinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır (Özkaynak, 2026). Park vd. (2018) farklı yol kesimlerinde gerçekleştirilen FWD ölçümleri ile laboratuvar deneylerini karşılaştırarak uygun tabaka kalınlıklarının tanımlanması durumunda geri hesaplanan modüllerin, laboratuvar esneklik modülünü güvenilir biçimde temsil edebileceğini göstermiştir. Benzer şekilde Modtag ve Elmod gibi farklı yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilen karşılaştırmalarda, özellikle Elmod ile elde edilen geri hesaplanmış taban zemini modüllerinin laboratuvar esneklik modülü ile yüksek uyum gösterdiği rapor edilmiştir (Gupta, 2024).

Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu (Rahman ve Gassman, 2017; Nazzal ve Mohammad, 2010; George vd., 2004), geri hesaplanan modül değerlerinin laboratuvar sonuçlarıyla uyumuna odaklanırken geri hesaplama sürecinde kullanılan tabaka modelleme yaklaşımı ve analiz yönteminin sonuçlar üzerindeki etkisini ayrıntılı olarak incelememektedir. Özellikle aynı FWD veri seti üzerinde farklı tabaka modelleme senaryoları ile doğrusal elastik teori (LET), eşdeğer kalınlık yöntemi (MET) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak elde edilen sonuçların birlikte değerlendirildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle geri hesaplanan elastik modül değerlerinin yalnızca sayısal büyüklükleri değil bu değerleri etkileyen modelleme varsayımlarının da değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma kapsamında, literatürdeki söz konusu boşluğun giderilmesi amacıyla aynı FWD ölçüm verileri kullanılarak farklı tabaka modelleme senaryoları ve analiz yöntemlerinin geri hesaplama sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Elmod 6 yazılımında referans ve alternatif üstyapı modelleme senaryoları oluşturulmuş ve geri hesaplama analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde granüler tabaka kalınlığının, kaplama tabakasının alt bileşenlerine ayrılmasının ve farklı geri hesaplama yöntemlerinin (LET, MET ve FEM) taban zemini için geri hesaplanan elastik modül üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI VE FWD ÖLÇÜMLERİ

Arazi çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) sorumluluğunda ve yaklaşık 150 kilometre uzunluğundaki D715 Kulu-Konya Devlet Yolu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında yolun her iki istikametinde yaklaşık 10 km uzunluğundaki kesim, çalışma alanı olarak seçilmiş olup detaylı biçimde Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. D715 Kulu-Konya Devlet Yolu üzerindeki çalışma kesiminin konumu

Belirlenen çalışma kesiminde, gidiş ve dönüş istikametinde toplam 32 istasyonda saha çalışmaları yürütülmüştür. Her istasyonda FWD ölçümleri gerçekleştirilmiş ve yol üstyapısının karakterizasyonuna yönelik sondaj çalışmaları yapılarak tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. Böylece geri hesaplama analizlerinde kullanılan üstyapı modeli, her ölçüm noktasına ait gerçek tabaka yapısını temsil edecek şekilde oluşturulmuştur.

Sondaj logları ile karot fotoğraflarının değerlendirilmesi sonucunda incelenen yol kesiminde üstyapının, yaklaşık 21 cm kalınlığında kaplama tabakası ile bunun altında 45-140 cm arasında değişken kalınlıklara sahip granüler tabakadan oluştuğu belirlenmiştir. Bu çalışmadaki geri hesaplama analizlerinde, her istasyona ait granüler tabaka (temel ve alttemel) kalınlıkları ayrı ayrı tanımlanmış ve analizlerde saha verilerine dayalı üstyapı karakterizasyonu esas alınmıştır.

Çalışma kapsamında FWD ölçümleri, Dynatest marka 8082 model yüksek düşen ağırlık deflektometre (HWD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, hareketli teker yükünü kısa süreli dinamik darbe yükü ile simüle etmekte ve yükleme sonucunda oluşan yüzey defleksiyonlarını yük plakasına farklı uzaklıklarda konumlandırılmış 10 jeofon aracılığıyla eş zamanlı olarak ölçmektedir. Ölçümlerde kullanılan HWD sistemi Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Dynatest 8082 HWD ölçüm sistemi ve yükleme düzeni

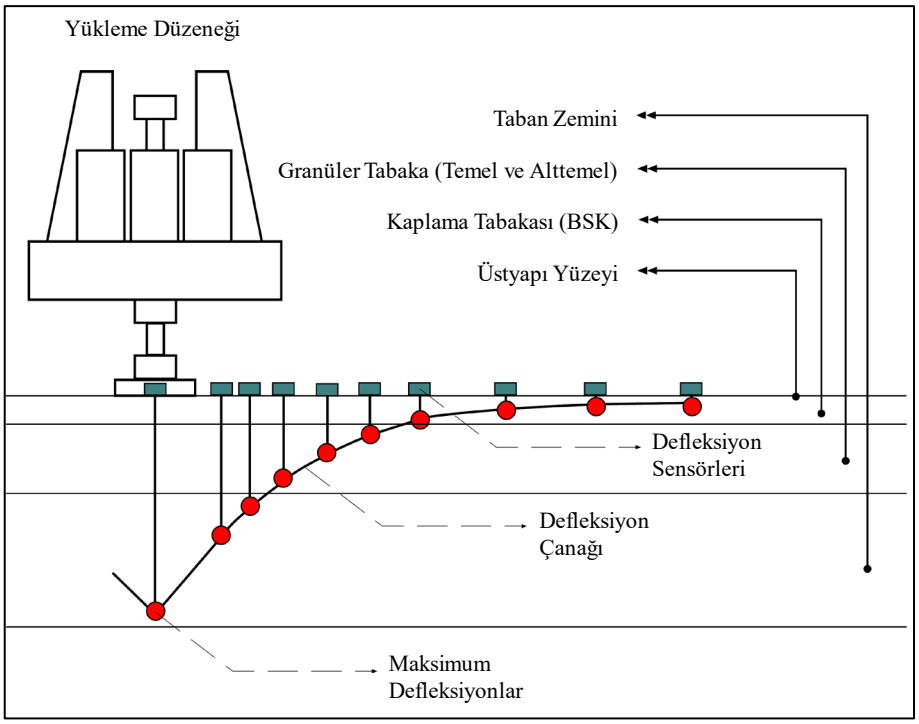
FWD ölçümlerinde 300 mm çapında yükleme plakası kullanılmış ve standart 240 kg ağırlığa ilave edilen altı adet 50 kg ek ağırlık ile toplam 540 kg'lık yükleme düzeni oluşturulmuştur. Her ölçüm noktasında sırasıyla yaklaşık 75, 115, 175 ve 270 kN seviyelerinde dört farklı darbe uygulanmış ve geri hesaplama analizlerinde ise Elmod 6 yazılımının önerileri doğrultusunda ikinci yük seviyesinden elde edilen ölçümler esas alınmıştır.

Defleksiyon ölçümleri, yük merkezinden sırasıyla 0, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150 ve 180 cm uzaklıkta bulunan 10 jeofon yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçülen defleksiyon verileri, Elmod 6 yazılımına aktarılmış ve geri hesaplama analizlerinde temel girdi olarak kullanılmıştır. Analizlerde kaplama, granüler tabaka ve taban zemininden oluşan üç tabakalı referans üstyapı modeli esas alınmış olup daha sonra bu çalışma kapsamında oluşturulan alternatif tabaka modelleme senaryoları üzerinde karşılaştırmalı geri hesaplama analizleri yürütülmüştür.

3. GERİ HESAPLAMA YAKLAŞIMI

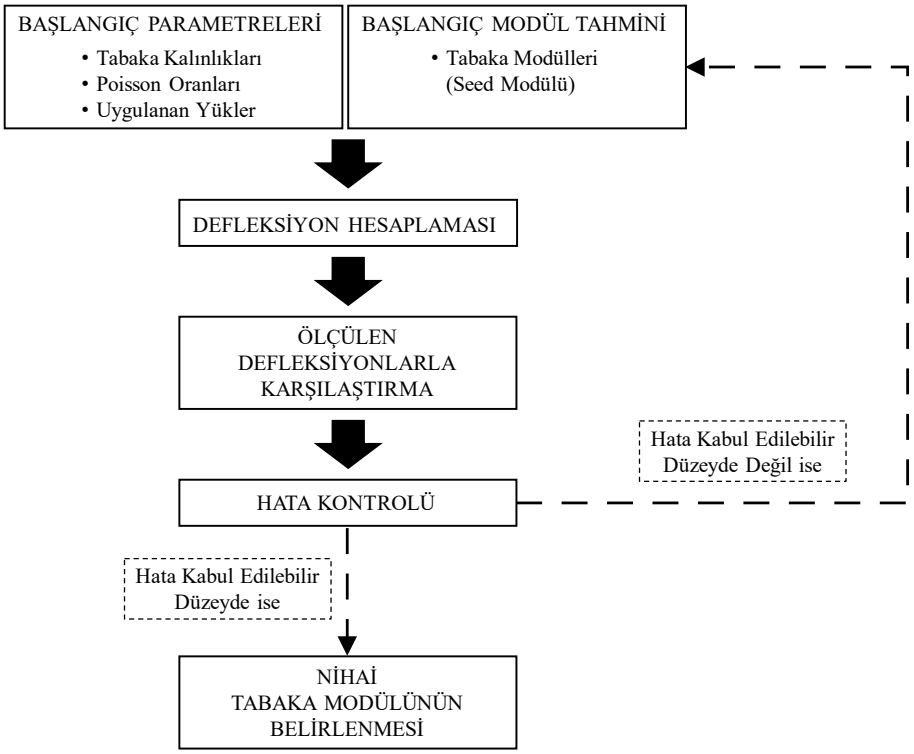
3.1. Geri Hesaplama Süreci

FWD ölçümlerinden elde edilen defleksiyon çanağı, yük altındaki üstyapının mekanik davranışını temsil etmekte ve geri hesaplama analizlerinin temel girdisini oluşturmaktadır. Yükleme merkezine yakın jeofonlardan ölçülen defleksiyonlar üst tabakaların rijitliğini daha fazla yansıtırken, yükleme merkezinden uzak sensörlerden elde edilen ölçümler ise taban zemininin davranışı hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle geri hesaplama analizlerinde yalnızca maksimum defleksiyon değeri değil tüm defleksiyon çanağı birlikte değerlendirilerek tabaka elastik modülleri iteratif olarak belirlenmektedir. Defleksiyon çanağı ile üstyapı tabakaları arasındaki ilişki Şekil 4'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. Defleksiyon çanağı ile üstyapı tabakaları arasındaki ilişki (Özkaynak, 2026)

Bu çalışmada, geri hesaplama analizleri Dynatest Elmod 6 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım, tanımlanan üstyapı modeli için hesaplanan teorik defleksiyon çanağı ile ölçülen FWD defleksiyonlarını iteratif olarak karşılaştırmakta ve ölçülen-hesaplanan defleksiyonlar arasındaki hata kabul edilebilir düzeye ulaşıncaya kadar tabaka elastik modüllerini güncellemektedir. Böylece her tabaka için geri hesaplanan elastik modüller belirlenmektedir. Geri hesaplama sürecinin genel işleyişi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Geri hesaplama analiz sürecinin akış şeması (Özkaynak, 2026)

Geri hesaplama analizlerinde hedef, ölçülen ve teorik defleksiyon çanakları arasındaki farkı en aza indirerek üstyapıyı temsil eden elastik modül kombinasyonunu belirlemektir.

3.2. Analiz Senaryoları

Bu çalışma kapsamındaki tüm geri hesaplama analizlerinde, aynı FWD ölçüm verileri kullanılmış olup yalnızca üstyapı modelleme yaklaşımı ve analiz yöntemi değiştirilmiştir. Referans analizlerde üstyapı; kaplama tabakası, granüler tabaka (temel-alttemel) ve taban zemininden oluşan üç tabakalı sistem olarak modellenmiştir.

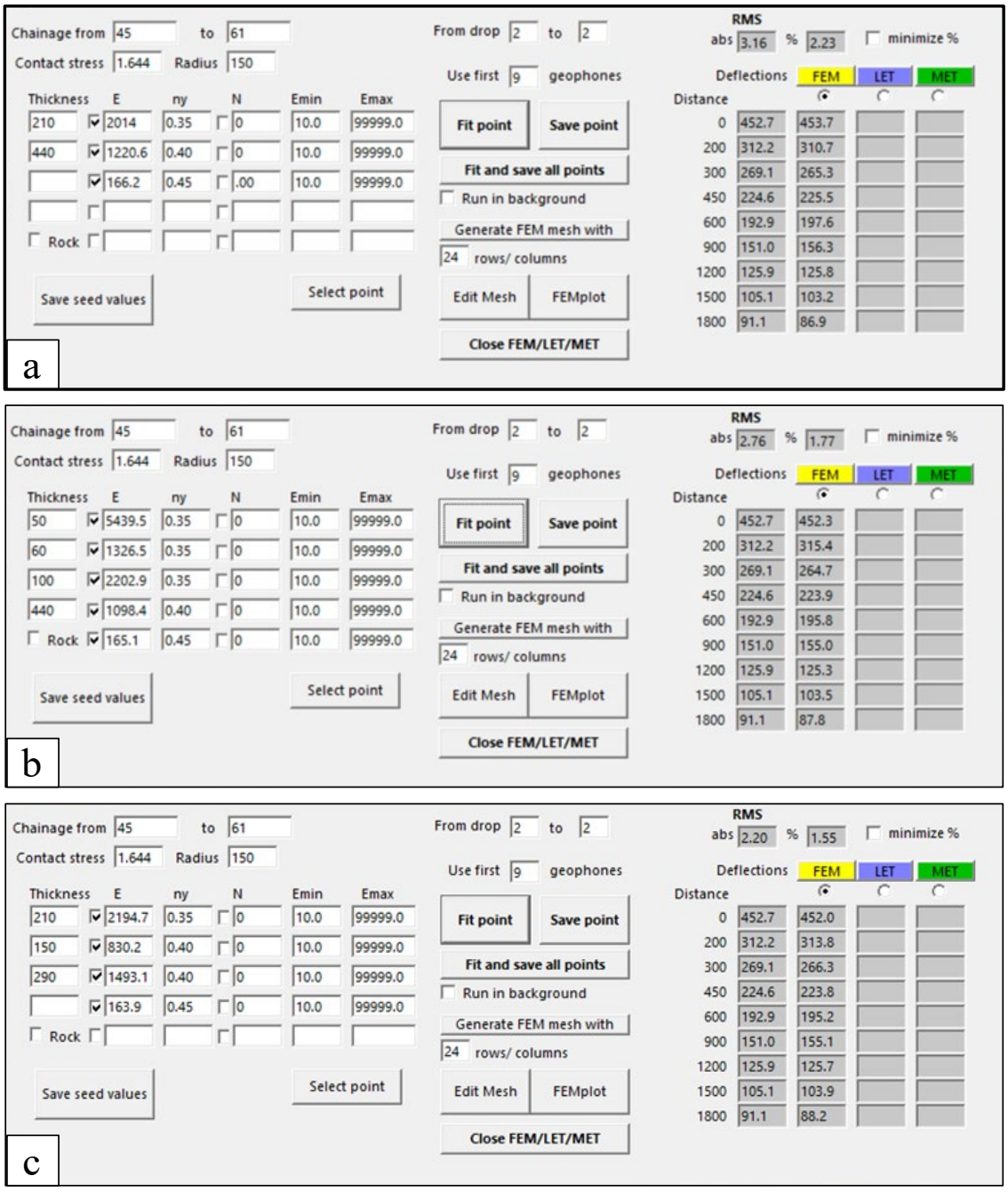
Tabaka modelleme yaklaşımının, geri hesaplanan taban zemini elastik modülü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki farklı alternatif senaryo oluşturulmuştur. Birinci alternatif modelde kaplama tabakası; aşınma, binder ve bitüm tabakaları şeklinde modellenmiş olup granüler tabaka tek katman olarak bırakılmıştır. İkinci alternatif modelde ise granüler tabaka, temel ve alttemel olarak ayrılarak üstyapı dört tabakalı sistem şeklinde tasarlanmıştır. Tüm analizlerde her istasyona ait gerçek tabaka kalınlıkları kullanılmıştır. Referans ve alternatif üstyapı modelleme senaryolarına ait detaylar ise Şekil 6'da gösterilmektedir.

<table>
<tr><th>Referans Model</th><th>Alternatif Model - 1</th><th>Alternatif Model - 2</th></tr>
<tr><td>Üç Tabakalı Sistem</td><td>Kaplama Tabakası Detaylandırılmış</td><td>Granüler Tabakası Detaylandırılmış</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Kaplama (21 cm)</td><td>Aşınma (5 cm)</td><td rowspan="3">Kaplama (21 cm)</td></tr>
<tr><td>Binder (6 cm)</td></tr>
<tr><td>Bitüm (10 cm)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Granüler (h)</td><td rowspan="2">Granüler (h)</td><td>Temel (h_1)</td></tr>
<tr><td>Alttemel (h_2)</td></tr>
<tr><td>Taban Zemini</td><td>Taban Zemini</td><td>Taban Zemini</td></tr>
<tr><td colspan="3">h, her istasyona ait gerçek granüler tabaka kalınlığını; h_1 ve h_2 ise alternatif modelde temel ve alttemel tabakalarının kalınlıklarını göstermektedir.</td></tr>
</table>

Şekil 6. Geri hesaplama analizlerinde kullanılan referans ve alternatif tabaka modelleme senaryoları

3.3. Analiz Yöntemleri

Alternatif tabaka modelleme senaryoları, Elmod 6 yazılımında tanımlanan doğrusal elastik teori (LET), eşdeğer kalınlık yöntemi (MET) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak analiz edilmiştir. LET yöntemi çok katmanlı doğrusal elastik teoriye, MET yöntemi Odemark eşdeğer kalınlık yaklaşımına, FEM ise sonlu elemanlar esaslı sayısal çözüme dayanmaktadır. Sayısal analizlerde oluşturulan modellerin yazılım ortamındaki görünümünü örneklemek amacıyla 17 nolu istasyon için farklı tabaka modelleme senaryolarına ait Elmod 6 analiz ekranları Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. 17 nolu istasyon için farklı tabaka modelleme senaryolarının FEM yöntemiyle Elmod 6 ortamındaki örnek analiz görünümleri: (a) Referans Model, (b) Alternatif Model-1 ve (c) Alternatif Model-2

Karşılaştırmaların tutarlı şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla tüm analizlerde aynı FWD ölçüm verileri, aynı yükleme seviyesi, aynı jeofon dizilimi ve aynı başlangıç parametreleri kullanılmış olup yalnızca analiz yöntemi ve tabaka modelleme yaklaşımı değiştirilmiştir. Böylece geri hesaplanan taban zemini elastik modülü üzerindeki değişimlerin yalnızca modelleme yaklaşımından kaynaklanması sağlanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

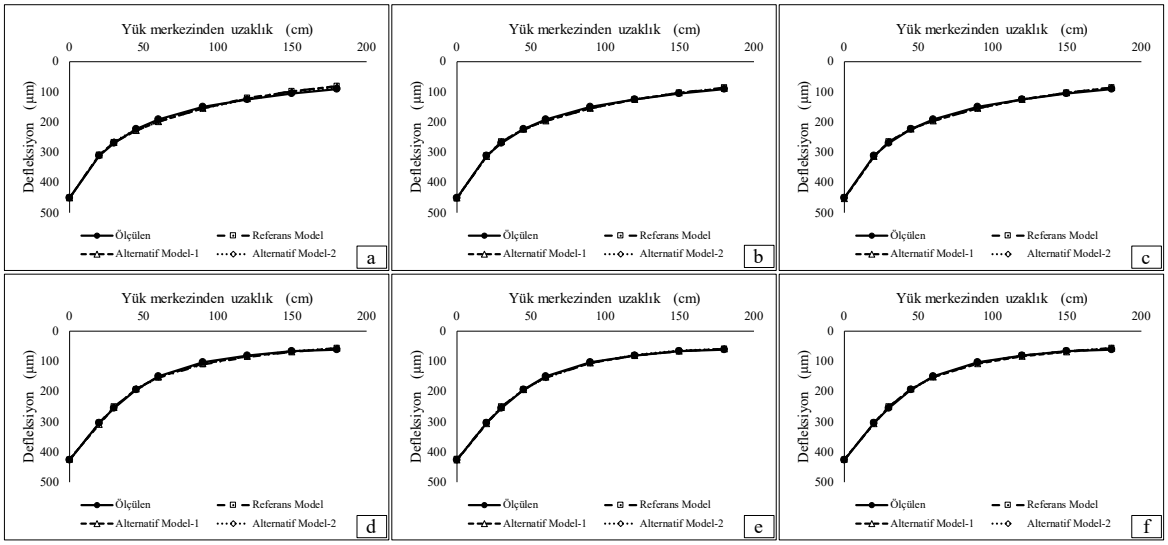
Farklı tabaka modelleme senaryoları ve analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen geri hesaplama analizleri sonucunda, geri hesaplanan taban zemini elastik modülünün hem

analiz yöntemine hem de üstyapı modelleme yaklaşımına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Referans ve alternatif modelleme senaryolarına ait geri hesaplama sonuçları Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1. Geri hesaplanan taban zemini elastik modüllerinin modelleme senaryolarına göre değişimi

Analiz Yöntemi	Taban Zemini Elastik Modülü (MPa)		
	Referans Model	Alternatif Model - 1	Alternatif Model - 2
17. İstasyon			
MET	211,3	166,2	212,7
FEM	209,8	165,1	209,1
LET	202,2	163,9	212,1
30. İstasyon			
MET	368,1	217,8	281,2
FEM	288,3	215,0	281,2
LET	294,2	225,3	283,6

17 ve 30 nolu istasyonlar sırasıyla minimum (45 cm) ve maksimum (140 cm) granüler tabaka kalınlığını temsil eden örnek kesitler olarak seçilmiştir. Temel tabakasının kalınlığı her iki istasyonda da 15 cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Farklı tabaka modelleme senaryolarında ölçülen ve geri hesaplanan defleksiyon çanaklarının karşılaştırılması: 17 nolu istasyon için (a) MET, (b) FEM, (c) LET; 30 nolu istasyon için (d) MET, (e) FEM, (f) LET

Geri hesaplama sonuçlarının, ölçülen FWD verilerini temsil etme düzeyinin değerlendirilmesi amacıyla 17 ve 30 nolu istasyonlarda referans ve alternatif modelleme senaryoları için ölçülen ve geri hesaplanan defleksiyon çanakları ayrıca karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de sunulan sonuçlar, tabaka modelleme yaklaşımının değiştirilmesine bağlı olarak geri hesaplanan taban zemini elastik modüllerinde farklılaşma görülmesine rağmen tüm modellerin ölçülen defleksiyon çanağını genel olarak yakın düzeyde temsil ettiğini göstermektedir. Bu durum benzer defleksiyon uyumlarının farklı tabaka rijitliği kombinasyonlarıyla elde edilebildiğini ve yalnızca defleksiyon çanağı uyumunun geri hesaplanan tabaka modüllerinin güvenilirliğini değerlendirmek için tek başına yeterli olmayabileceğini ortaya koymaktadır.

Öncelikle analiz yöntemleri karşılaştırıldığında, MET yaklaşımının çoğu analiz senaryosunda en yüksek taban zemini elastik modülü değerlerini verdiği görülmektedir. FEM ve LET yöntemleri ise genel olarak birbirine daha yakın sonuçlar üretmiştir. Bu

durum farklı çözüm yaklaşımlarının yük yayılımını farklı şekilde temsil etmesinden kaynaklanmaktadır.

Tabaka modelleme senaryoları değerlendirildiğinde, granüler tabaka kalınlığının geri hesaplanan taban zemini elastik modülü üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Granüler tabaka kalınlığı arttıkça taban zeminine aktarılan gerilmelerin azalmasına bağlı olarak daha yüksek taban zemini elastik modülü değerleri elde edilmiştir. Buna karşılık granüler tabakanın temel ve alttemel olarak modellenmesi, toplam granüler tabaka kalınlığı değişmediği sürece geri hesaplanan taban zemini elastik modülü üzerinde belirgin bir değişikliğe neden olmamıştır.

En belirgin değişim ise kaplama tabakasının aşınma, binder ve bitüm tabakaları şeklinde modellenmesi durumunda gözlenmiştir. Bu modelleme yaklaşımı, tüm analiz yöntemlerinde geri hesaplanan taban zemini elastik modülünü önemli ölçüde azaltmış ve tabaka modelleme varsayımlarının geri hesaplama sonuçları üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular FWD verilerinin yorumlanmasında yalnızca kullanılan geri hesaplama algoritmasının değil üstyapı modelleme yaklaşımının da sonuçlar üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu nedenle geri hesaplama analizlerinde tabaka kalınlıklarının ve tabaka modelleme varsayımlarının gerçek saha koşullarını temsil edecek şekilde tanımlanması büyük önem taşımaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, aynı FWD ölçüm verileri kullanılarak farklı üstyapı modelleme senaryoları ve geri hesaplama yöntemlerinin taban zemini elastik modülü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Aynı FWD ölçüm verileri kullanılsa bile geri hesaplanan taban zemini elastik modülü, seçilen tabaka modelleme yaklaşımı ve kullanılan geri hesaplama yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir.

- Analiz yöntemleri karşılaştırıldığında, eşdeğer kalınlık yöntemi (MET) çoğu senaryoda en yüksek taban zemini elastik modülü değerlerini üretirken, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve doğrusal elastik teori (LET) birbirine daha yakın sonuçlar vermiştir.

- Granüler tabaka kalınlığının artması halinde geri hesaplama ile elde edilen taban zemini elastik modülleri ciddi şekilde artmıştır.

- Granüler tabakanın temel ve alttemel olarak modellenmesi, toplam granüler tabaka kalınlığı değişmediği sürece geri hesaplanan taban zemini elastik modülü üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuştur.

- Kaplama tabakasının aşınma, binder ve bitüm tabakaları şeklinde ayrıştırılması, tüm analiz yöntemlerinde geri hesaplanan taban zemini elastik modülünde belirgin değişimlere neden olmuş ve tabaka modelleme yaklaşımının geri hesaplama sonuçları üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur.

- Sonuç olarak, FWD verilerine dayalı geri hesaplama analizlerinde güvenilir taban zemini elastik modülü tahminleri için yalnızca uygun geri hesaplama algoritmasının seçilmesi yeterli olmayıp üstyapı tabakalarının saha koşullarını temsil edecek doğrulukta modellenmesi de kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, geri hesaplama sonuçlarının çözüm algoritmasının yanı sıra tabaka modelleme varsayımlarına da önemli ölçüde bağlı olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

TEŞEKKÜR

Arazi çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve geri hesaplama analizlerinde kullanılan ticari yazılıma erişimin sağlanması hususundaki katkılarından dolayı Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

American Society for Testing and Materials. (1989), "Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli", ASTM, West Conshohocken, PA, 702.

Erkmen, F. (2023), "Düşen Ağırlıklı Deflektometre Ölçümlerinde Asfalt Sıcaklığı Etkisi ve Sıcaklık Düzeltme Metodunun Belirlenmesi", Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 158.

Federal Highway Administration. (2017), "Using falling weight deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis, Volume III: guidelines for deflection testing, analysis, and interpretation", FHWA, Washington, DC, 122.

George, K.P., Bajracharya, M. ve Stubstad, R. (2004), "Subgrade characterization employing the falling weight deflectometer", Transportation Research Record, 1869(1), 73-79.

Gupta, K. (2024), "Prediction Tools for Subgrade Resilient Modulus", Doctoral Dissertation, Faculty of Purdue University, West Lafayette, Indiana, 223.

Nazzal, M.D. ve Mohammad, L.N. (2010), "Estimation of resilient modulus of subgrade soils using falling weight deflectometer", Transportation Research Record, 2186, 1-10.

Özkaynak, M.İ. (2026), "Düşen Ağırlık Deflektometre Ölçümleri ve Pre-Post Deneysel Zemin Özelliklerine Dayalı Esneklik Modülü Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 294.

Park, S.S., Nantung, T. ve Bobet, A. (2018), "Correlation between resilient modulus (M_R) of soil, light weight deflectometer (LWD) and falling weight deflectometer (FWD)", Purdue University, West Lafayette, IN, 87.

Rahman, M.M. ve Gassman, S.L. (2017), "Effect of resilient modulus of undisturbed subgrade soils on pavement rutting", International Journal of Geotechnical Engineering, 13(2), 152-161.

Rakvi, A.M. (2021), "Pavement Condition Evaluation Using Field Data of Surface Deflection and Tire-Pavement Noise", Master's Dissertation, School of the Graduate Studies Rutgers The State University of New Jersey, New Brunswick, New Jersey, 95.

Romeo, R.C. (2022), "Improving The Efficacy of Dynamic, Gradient-Based Falling Weight Deflectometer Backcalculation", Doctoral Dissertation, Graduate Faculty of The University of Georgia, Athens, Georgia, 137.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
cm	Santimetre
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FHWA	Federal Highway Administration (Amerika Birleşik Devletleri Federal Karayolları İdaresi)
FWD	Falling Weight Deflectometer (Düşen Ağırlık Deflektometresi)
HWD	Heavy Weight Deflectometer (Yüksek Düşen Ağırlık Deflektometresi)
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LET	Linear Elastic Theory (Doğrusal Elastik Teori)
MET	Method of Equivalent Thickness (Eşdeğer Kalınlık Yöntemi)
NDT	Non-Destructive Testing (Tahribatsız Deney)