4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

DİNAMİK VE PSEUDO-STATİK ANALİZLERDE İSTİNAT DUVARINDA OLUŞAN KUVVETLERİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF FORCES ACTING ON A RETAINING WALL IN DYNAMIC AND PSEUDO-STATIC ANALYSES

Doğukan ALATAŞ[1], Emre ERBEK[2], Kadir Emir GÜNGÖR[3], Ozan BİLAL[4]

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, istinat yapılarının tasarımında kullanılan pseudo-statik ve dinamik analiz yöntemlerinin kesit tesirleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları Yönetmeliği (2026), statik eşdeğer hesap (pseudo-statik) yöntemiyle yapılan tasarımların kesit açısından yetersiz kaldığı veya maliyet optimizasyonunun hedeflendiği durumlarda zaman tanım alanında analizlerin yapılmasını öngörmektedir. Bu yönetmelik doğrudan istinat yapılarını kapsamasa da öngördüğü dinamik analiz metodolojisi bu çalışmada referans alınmıştır. Bu kapsamda, seçilen bir kesit üzerinde iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve iki farklı çözüm yöntemi karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, dinamik analiz yönteminin pseudo-statik yönteme kıyasla daha yüksek kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ürettiğini, dolayısıyla incelenen kesit için daha ekonomik bir tasarım sağlamadığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Pseudo-statik analiz, Dinamik analiz, Kazı Destek Yapıları Yönetmeliği*

ABSTRACT

The aim of this study is to compare the effects of pseudo-static and dynamic analysis methods, commonly used in the design of retaining structures, on the internal forces developed within the structure. The Regulation on the Design and Construction Principles of Excavation Support Structures (2026) recommends performing time-domain dynamic analyses in cases where designs based on the equivalent static (pseudo-static) method are insufficient in terms of structural section capacity or when cost optimization is targeted. Although this regulation does not directly cover retaining walls, the dynamic analysis methodology it specifies is adopted as a reference in this study. Within this scope, two-dimensional numerical analyses were conducted on a selected retaining wall section, and the results obtained from the two analysis approaches were compared. The findings indicate that the dynamic analysis method produced higher shear force and bending moment values than the pseudo-static method, and therefore did not yield a more economical design for the section examined.

Keywords: *Pseudo-static analysis, Dynamic analysis, Regulation on Design and Construction of Excavation Support Structures*

[1] Geoproje Mühendislik Danışmanlık İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti, dogukanalatas@geoproje.com.tr
[2] Geoproje Mühendislik Danışmanlık İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti, emreerbek@geoproje.com.tr
[3] Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kadiremirgungor7@gmail.com (Sorumlu yazar)
[4] Geoproje Mühendislik Danışmanlık İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti, ozanbilal@geoproje.com.tr

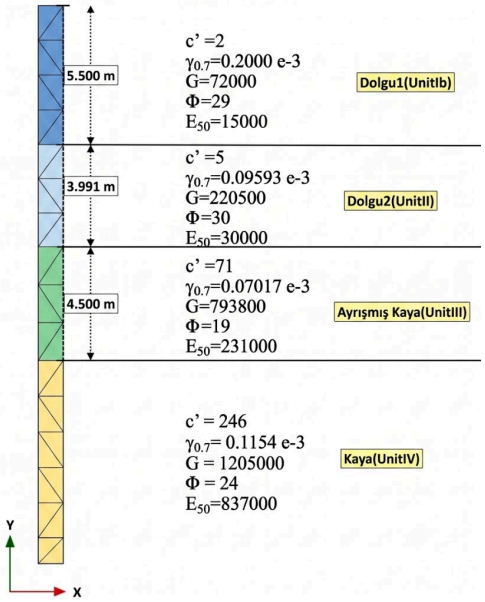
1. GİRİŞ

İstinat yapıları, şev stabilitesinin sağlanması ve zemin itkilerinin karşılanması amacıyla geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sismik aktiviteye sahip bölgelerde inşa edilen istinat duvarlarının deprem altındaki davranışını doğru tahmin etmek, yapısal güvenlik açısından büyük önem taşımaktadır (Kramer, 1996). Zaman tanım alanında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri, doğrusal olmayan zemin davranışının ve zemin–yapı etkileşiminin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayarak istinat yapılarının deprem davranışının daha gerçekçi biçimde incelenmesine imkân tanımaktadır (Gazetas vd., 2004).

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları Yönetmeliği (KDYY, 2026) istinat yapılarını doğrudan kapsamamaktadır. Bununla birlikte, mevcut istinat duvarının sismik performansını değerlendirmek ve iç kuvvetler açısından yeterliliğini araştırmak amacıyla, yönetmeliğin zaman tanım alanında analiz için öngördüğü metodoloji referans alınmış ve en az 11 adet farklı deprem kaydı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir (KDYY, 2026). Bu yönetmelik maddesi, zemin–yapı etkileşiminin dinamik koşullar altındaki sismik davranışını daha hassas modellemeyi hedeflese de mühendislik pratiğinde analiz sürelerini, hesaplama zorluklarını ve donanım maliyetlerini ciddi ölçüde artırmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, doğrusal olmayan dinamik analizler ile pseudo-statik analizlerden elde edilen iç kuvvet sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla iki yöntemin farklılıklarını incelemektir. Bu doğrultuda, mevcut istinat duvarı ve kazıklı temel sistemi PLAXIS 2D (Bentley, 2025) sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiş ve sistem pseudo-statik ve dinamik yüklere maruz bırakılmıştır. İki farklı analiz türünden elde edilen istinat duvarı iç kuvvetleri grafikleri karşılaştırıldığında, 11 deprem kaydı ile gerçekleştirilen dinamik analizlerin pseudo-statik analize kıyasla sistematik olarak daha yüksek iç kuvvet değerleri verdiği belirlenmiş ve bu durum sayısal verilerle ortaya konmuştur.

2. MODELLERE AİT PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Çalışma sahasından elde edilen verilere göre, inceleme alanında yüzeyden itibaren yaklaşık 9 metre kalınlığında bir dolgu tabakası bulunmakta olup istinat duvarları ve temel sistemi bu tabakanın altındaki ayrışmış kaya birimine oturmaktadır. Oluşturulan zemin modeline ait profil ve malzeme parametreleri Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Zemin Modeli ve Tabaka Parametreleri

Zemin ve kaya birimlerinde küçük gerinim seviyelerinde oluşabilecek deformasyonların daha gerçekçi şekilde temsil edilebilmesi amacıyla analizlerde Hardening Soil Small Strain (HSsmall) bünye modeli kullanılmıştır. Bu model, küçük gerinim seviyelerinde zeminin yüksek başlangıç rijitliğini ve gerinim arttıkça rijitliğin kademeli olarak azalmasını dikkate alarak gerilme–şekil değiştirme davranışını daha doğru şekilde temsil etmektedir (Benz, 2007).

HSsmall modelinde boşaltma ve yeniden yükleme davranışı Masing kuralı (Masing, 1926) esas alınarak tanımlanmakta olup, yeniden yükleme eğrileri ana yükleme eğrisinin ölçeklendirilmesi ile elde edilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde özellikle küçük gerinim seviyelerinde elastik davranışın daha rijit şekilde temsil edilmesi sağlanmakta ve hem zemin hem de kaya birimlerinin küçük gerinimli deformasyon davranışı analizlerde daha güvenilir biçimde modellenebilmektedir.

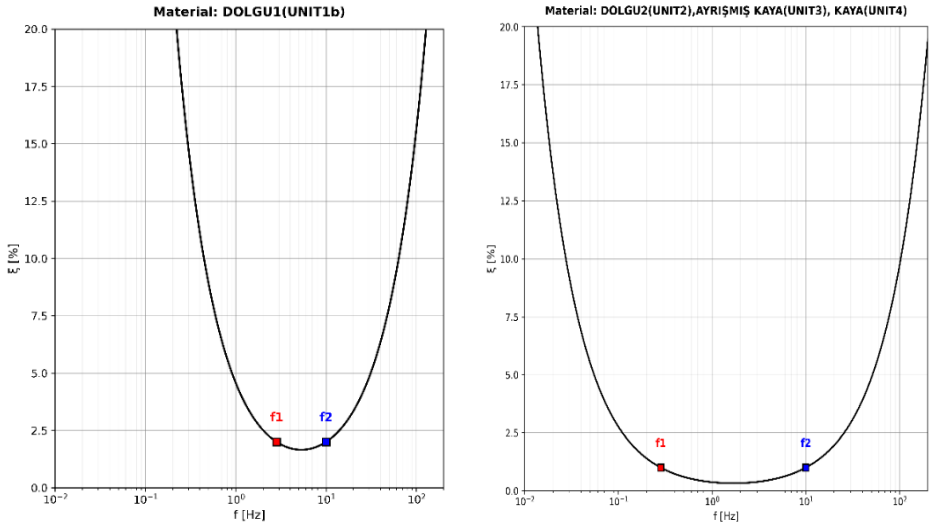
Dinamik analizlerde zeminin davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri olan başlangıç kayma modülü (G_0), Denklem (1)'de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$G_0 = Gdyn = Gmax = \rho \cdot Vs^2 \quad (1)$$

HSsmall modelinde küçük gerinim davranışını tanımlayan referans kayma birim deformasyonu ($\gamma_{0.7}$), kayma modülünün Hardin & Drnevich (1972) eğrisine göre başlangıç değerinin %70'ine düştüğü noktaya karşılık gelmektedir. Bu parametre, kaya ve ayrışmış kaya birimleri için Darendeli (2001) ile Seed & Idriss (1970), dolgu birimleri için ise Vucetic & Dobry (1991) tarafından önerilen modül azalımı ve sönüm oranı eğrileriyle uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. Böylece deprem etkisi altında malzemelerin rijitlik azalımı ve sönüm davranışı daha gerçekçi biçimde modellenmiştir:

$$\gamma_{0.7} \approx [2c' \cdot (1 + \cos(2\varphi')) + \sigma_1' \cdot (1 + K_0) \cdot \sin(2\varphi')] / (9 \cdot G_0) \quad (2)$$

HSsmall modelinin sağladığı histeretik sönüme ek olarak, düşük gerinim seviyelerindeki sönümü temsil etmek ve sayısal salınımları sınırlamak amacıyla Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Rayleigh katsayıları, sistemin hâkim frekans aralığı ve deprem girdisinin etkin frekans içeriği dikkate alınarak seçilen iki referans frekansta hedef sönüm oranını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Dolgu birimi için %2, diğer zemin ve kaya birimleri için %1 Rayleigh sönümü tanımlanmış; ilgili frekans aralığında ek sönümün sınırlı kaldığı kontrol edilerek aşırı toplam sönümden kaçınılmıştır.



Şekil 2. Zemin ve Kaya Birimleri için Histeretik Modül Azalımı ve Sönüm Eğrileri

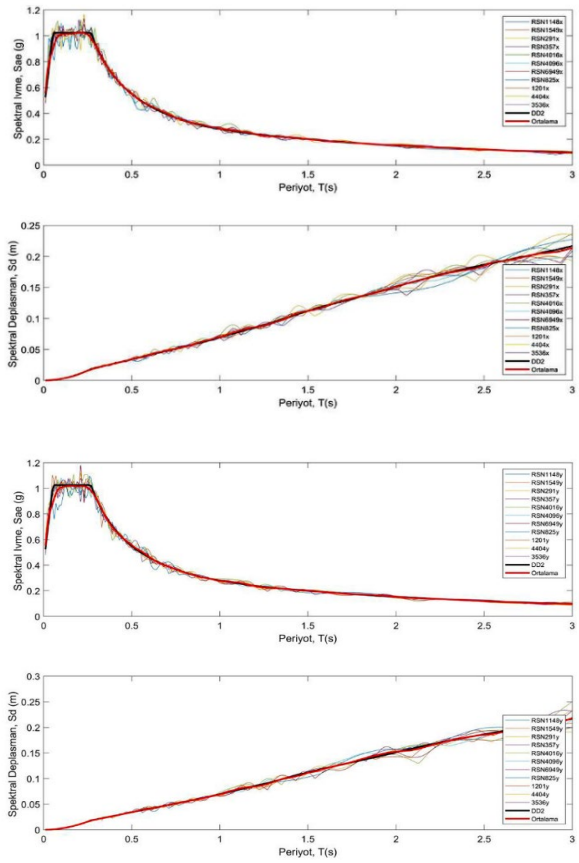
Yukarıdaki formüller dikkate alınarak hesaplarda kullanılan dinamik zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Dinamik Zemin Parametreleri

Birim	c' (kPa)	$\gamma_{0.7}$	G_0 (kPa)	Φ' (°)	E_{50} (kPa)
Dolgu 1	2	0.2000×10^{-3}	72.000	29	15.000
Dolgu 2	5	0.0959×10^{-3}	220.500	30	30.000
Ayrışmış kaya	71	0.0702×10^{-3}	793.800	19	231.000
Kaya	246	0.1154×10^{-3}	1.205.000	24	837.000

3. ANALİZLERDE KULLANILAN DEPREM KAYITLARI

Çalışmada deprem etkisi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında tanımlanan ve standart tasarım depremi olarak kabul edilen DD-2 deprem yer hareketi düzeyi esas alınarak değerlendirilmiştir. TBDY (2018) hükümlerine göre zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerde, birbirine dik iki yatay bileşenden oluşan en az 11 deprem yer hareketi kaydının kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, 475 yıllık yinelenme periyoduna karşılık gelen DD-2 deprem düzeyi için gerekli yer hareketi kayıtları SelectEQ yazılımı (SelectEQ, 2026) kullanılarak seçilmiş; seçilen 11 adet kayıt, GMPS yazılımı ile (GMPS, 2026) 0,1–3,0 saniye periyot aralığında hedef tasarım spektrumuyla uyum sağlayacak şekilde RspMatch2009 yönteminin (Al Atik & Abrahamson, 2010; Hancock vd., 2006) esas alındığı spektral eşleştirme yöntemiyle ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işleminde kullanılan deprem kayıtları Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca H1 ve H2 doğrultularına ait spektral ivme ve spektral deplasman eğrileri sırasıyla Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. DD-2 Deprem Düzeyi H1 ve H2 Bileşeni Spektral İvme ve Spektral Deplasman Eğrileri

Tablo 2. Kullanılan Deprem Kayıtları (DD-2)

Kayıt No	Deprem Adı	İstasyon	Mw	Fay Mek.*	Rjb (km)	Vs30 (m/s)	FreqLU (Hz)	Ölçek Kats.
825	Cape Mendocino	Cape Mendocino	7.01	2	6.96	567.8	0.07	0.46
1549	Chi-Chi, Taiwan	TCU129	7.62	3	1.83	511.2	0.04	0.61
1148	Kocaeli, Türkiye	Arcelik	7.51	0	13.49	523.0	0.09	2.66
2003-01	Bingöl Depremi	1201	6.30	0	5.80	528.0	0.01	1.04
2020-01	Elazığ 2020	4404	6.80	0	18.60	1382.0	0.01	1.87
2020-02	Samos 2020	3536	6.60	1	45.76	1141.0	0.01	3.00
357	Coalinga-01	Parkfield-Stone C.	6.36	2	34.00	565.1	0.15	3.25
6949	Darfield, New Zealand	PEEC	7.00	0	53.75	551.3	0.17	3.19
4096	Parkfield-02, CA	Bear Valley Ranch	6.00	0	4.32	528.0	0.13	3.00
4016	San Simeon, CA	San Luis Obispo	6.52	2	31.39	493.5	0.01	3.01
291	Irpinia, Italy-01	Rionero In Vulture	6.90	1	30.07	574.9	0.38	3.03

** Fay Mekanizması: 0: Doğrultu Atımlı (Strike-Slip), 1: Normal, 2: Ters / Bindirme (Reverse/Thrust), 3: Eğik / Kombine (Oblique). FreqLU: Düşük geçiş kesme frekansı (Lowest Usable Frequency).*

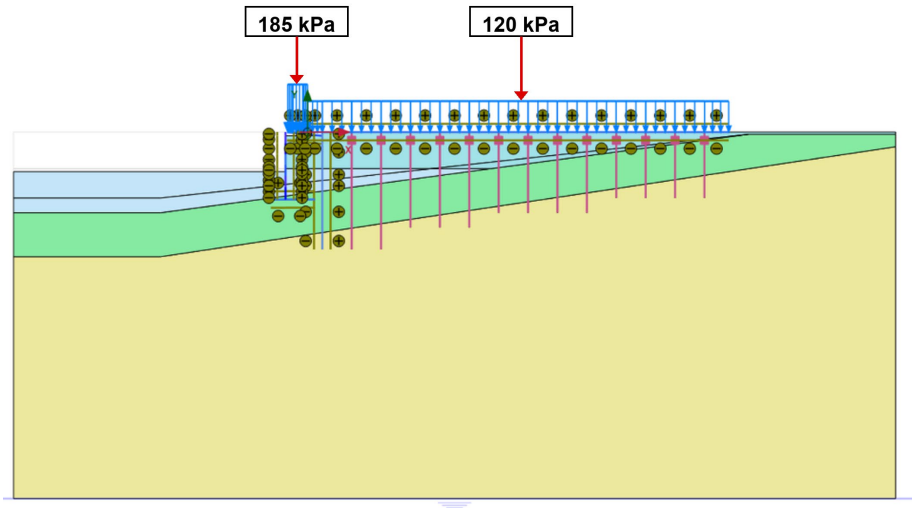
4. SAYISAL ANALİZ YAKLAŞIMLARI VE MODELLEME

PLAXIS 2D yazılımında 130 m genişlik ve 30 m derinlik boyutlarında oluşturulan modellerde sınır koşullarının seçimi, özellikle gerilme dalgalarının davranışı ve enerjinin model dışına aktarımı açısından doğrudan sonuçları etkilemektedir.

Bu kapsamda modelin yanal sınırları olan x-min ve x-max sınırlarına, model içerisinde oluşan gerilme dalgalarının sınır yüzeylerinde yansıyıp yapay rijitlik etkisi oluşturmaması için free-field (serbest alan) sınır koşulları tanımlanmıştır. Böylece dalga yayılımının doğal zemindeki davranışına daha yakın bir şekilde modellenmesi sağlanmıştır.

Modelin taban sınırı olan y-min bölgesinde ise, zemin ortamının derin tabakalardaki yarı-sonsuz davranışını temsil edebilmek amacıyla compliant base (uyumlu taban) sınır koşulu (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) uygulanmıştır. Bu sayede tabandan kaynaklanabilecek yapay yansımalar minimize edilerek sistemin dinamik tepkisi daha gerçekçi hale getirilmiştir.

Bununla birlikte modelde üst yapı yükleri (185 kPa ve 120 kPa sürşarj yükleri) ile tasarım kapsamında oluşturulan kazık sistemi modele tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Böylece zemin–yapı etkileşiminin bütüncül bir sistem olarak ele alınması amaçlanmıştır. İlgili modelleme düzeni Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. PLAXIS 2D Sayısal Analiz Modeli ve Sürşarj Yükleri Düzeni

Pseudo-statik analiz yaklaşımı kapsamında, deprem etkilerinin modele eşdeğer yatay ivme olarak tanımlanabilmesi için AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası verileri (AFAD, 2018) kullanılmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın yürütüldüğü lokasyon için spektral parametreler S_S = 1.025 ve S_1 = 0.275 olarak belirlenmiş, buradan hareketle tasarım spektral büyüklükleri S_{DS} = 1.230 ve S_{D1} = 0.413 olarak elde edilmiştir.

Elde edilen bu parametreler, Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları Yönetmeliği'nde (KDYY, 2026) tanımlanan yaklaşım doğrultusunda yatay deprem katsayısının belirlenmesinde kullanılmıştır. Yönetmelikte verilen $kh = (0.4 \cdot S_{DS}) / R$ bağıntısı esas alınmış, burada yer alan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) değeri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) esas alınarak en fazla $120S_{DS}(mm)$ yerdeğiştirmeye izin verilen ağırlık tipi duvarlar için tanımlanan R = 2 olarak seçilmiştir. Bu yaklaşımla yapılan değerlendirme sonucunda eşdeğer yatay deprem katsayısı kh = 0.246 (eşdeğer yatay deprem ivmesi ah = 0.246g) olarak hesaplanmış ve pseudo-statik analizlerde bu değer kullanılarak model yüklemeleri gerçekleştirilmiştir.

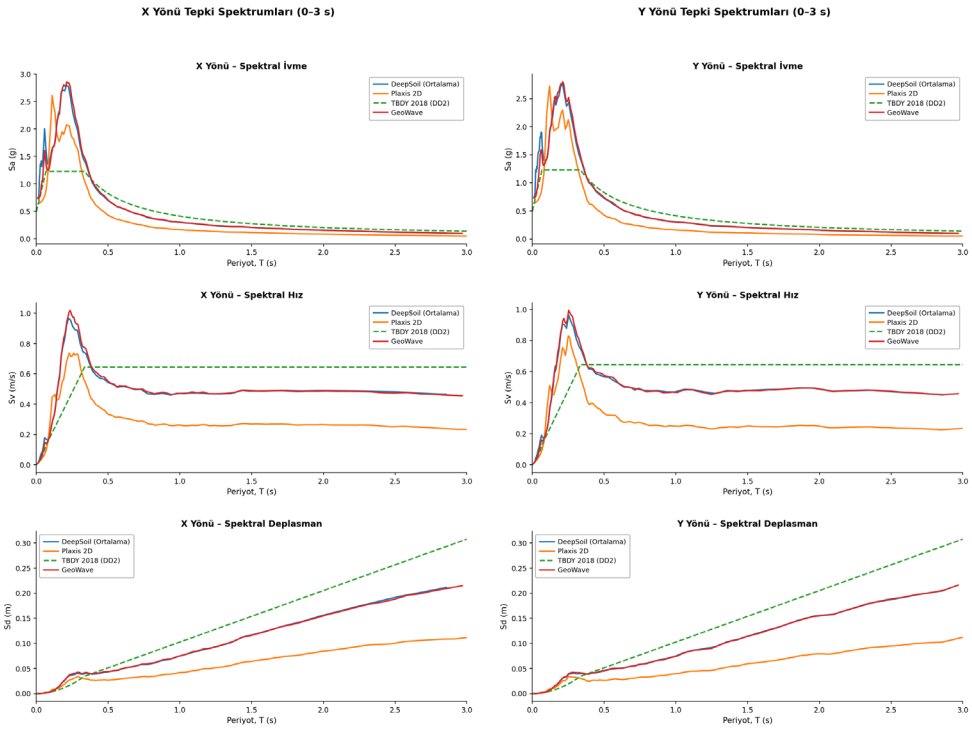
4.1. Bir-Boyutlu Serbest-Alan Saha Tepkisinin Doğrulanması

İki boyutlu modelde tanımlanan serbest-alan (free-field) yanal sınırları ve uyumlu taban (compliant base), fiziksel olarak zemin profilinin bir-boyutlu (1B) serbest-alan tepkisini temsil etmektedir. Bu kapsamda profilin 1B doğrusal olmayan saha tepkisi öncelikle DEEPSOIL yazılımıyla (Hashash vd., 2016), ek olarak ise hızlı bir 1B toplam-gerilme saha tepki çözücüsü olan Geowave (Geowave, 2026) ile değerlendirilmiştir.

Geowave ve DEEPSOILv7, dayanım kontrollü genelleştirilmiş hiperbolik (GQH) ana eğrisini Phillips–Hashash MRDF sönüm düzeltmesiyle (Phillips & Hashash, 2009) birleştiren, örtük Newmark-β zaman entegrasyonu ve elastik yarı-uzay (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969) uyumlu taban sınırı kullanan çözücülerdir; modül azalımı ve sönüm eğrileri, bu çalışmada HSsmall modeli için benimsenen Darendeli (2001), Seed & Idriss (1970) ve Vucetic & Dobry (1991) eğri aileleriyle uyumlu olarak tanımlanmıştır.

Seçilen 11 adet DD-2 yer hareketi kaydının iki yatay bileşeni (toplam 22 hareket) için elde edilen yüzey tepki spektrumları iki çözücüde de birbiriyle yüksek uyum göstermiştir: 0,1–3,0 s tasarım periyot bandında ortalama spektral NRMSE %6, yüzey en büyük ivmesinde (PGA) ortalama fark yaklaşık %8 ve spektral tepe ivmesinde ortalama fark %3 mertebesinde kalmıştır. Bu uyum, dinamik analizde kullanılan saha büyütmesinin ve taban yer hareketinin yazılımdan bağımsız biçimde tutarlı olduğunu göstermektedir.

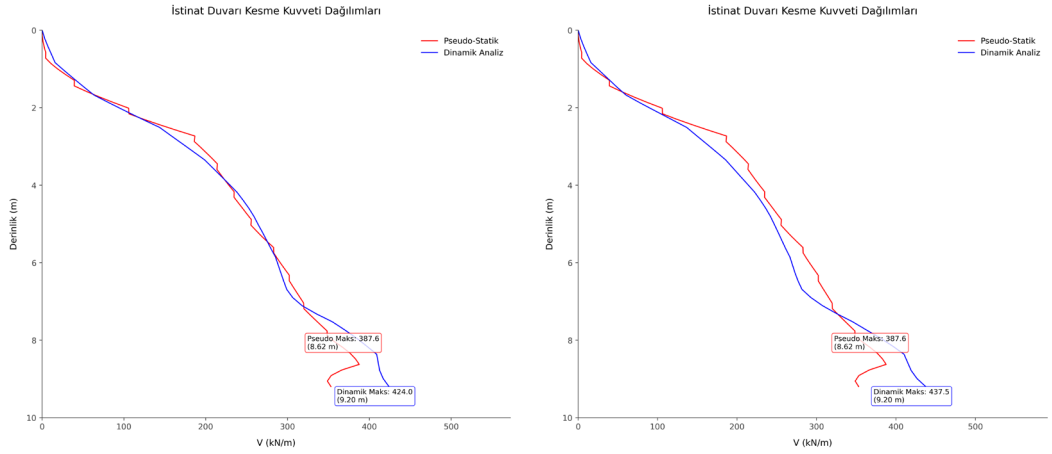
Geowave'in doğrusal olmayan saha tepkisi, ayrıca DEEPSOIL ve PLAXIS HSsmall ile yapılan bağımsız karşılaştırmalarla da sınanmıştır (Geowave, 2026). Derlenmiş çözüm çekirdeği sayesinde tek bir yer hareketinin saniyeler mertebesinde çözülebilmesi, yönetmeliğin gerektirdiği çok kayıtlı (11 × 2) saha tepki kümesinin pratik bir hesap ile elde edilmesini sağlamıştır. İlgili grafikler Şekil 5'te sunulmuştur.



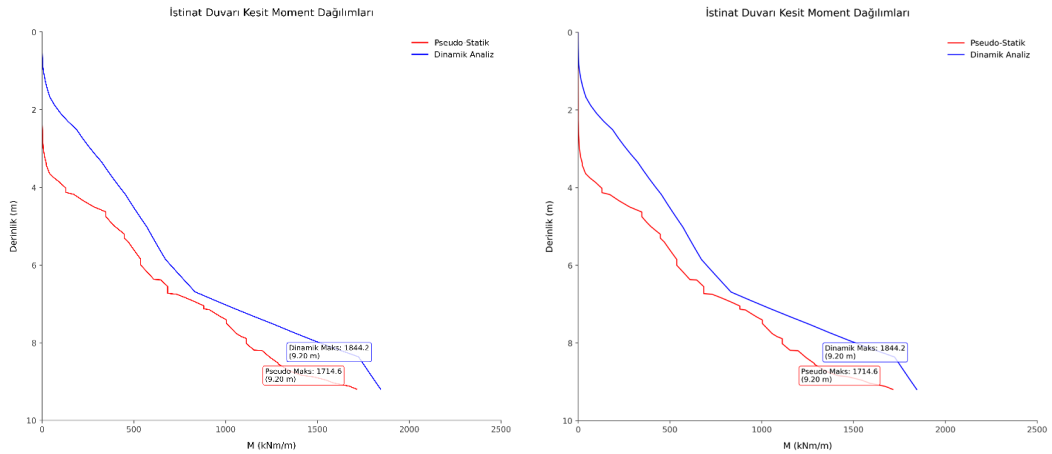
Şekil 5. X ve Y Yönü Yüzey Tepki Spektrumları (DEEPSOIL ve Geowave Karşılaştırması)

5. BULGULAR

İstinat duvarında oluşan kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri, hem pseudo-statik hem de dinamik analiz sonuçlarına dayalı olarak derinlik boyunca incelenmiştir. Her iki yöntem için elde edilen iç kuvvet zarfları, yapıda oluşan en büyük tesirlerin büyüklüğü ve konumu bakımından karşılaştırılmıştır. Dinamik analizlerden elde edilen bu zarflar, TBDY (2018) yönetmelik esasları dikkate alınarak, kullanılan 11 farklı deprem kaydından elde edilen mutlak maksimum değerlerin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Elde edilen değerler Şekil 6 ve Şekil 7'de irdelenmiştir.



Şekil 6. Dinamik ve Pseudo-Statik Kesme Kuvveti- Derinlik Dağılımı (X ve Y Yönü)



Şekil 7. Dinamik ve Pseudo-Statik Eğilme Momenti- Derinlik Dağılımı (X ve Y Yönü)

Şekil 6'da sunulan kesme kuvveti dağılımları incelendiğinde, her iki analiz yönteminin duvar boyunca benzer bir eğilim sergilediği, ancak büyüklük olarak belirgin farklar ortaya koyduğu görülmektedir. X yönünde en büyük kesme kuvveti pseudo-statik analizde 387,6 kN/m (8,73 m derinlikte) iken dinamik analizde bu değer 424,0 kN/m'ye (9,20 m derinlikte) ulaşmıştır. Y yönünde ise pseudo-statik analizde yine 387,6 kN/m elde edilirken dinamik analizde en büyük kesme kuvveti 437,5 kN/m olarak belirlenmiştir. Dinamik analizden elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin, pseudo-statik sonuçlara kıyasla X yönünde yaklaşık %9, Y yönünde ise yaklaşık %13 daha büyük olduğu görülmüştür.

Eğilme momenti dağılımlarında (Şekil 7) iki yöntem arasındaki fark daha belirgin hale gelmektedir. Pseudo-statik analizde her iki yön için en büyük moment değeri 1714,6 kNm/m olarak elde edilmiş ve bu değer 9,20 m derinlikte oluşmuştur. Dinamik analizde ise en büyük moment X yönünde 1917,5 kNm/m, Y yönünde 1844,2 kNm/m olarak hesaplanmıştır. Buna göre dinamik analizden elde edilen en büyük eğilme momentleri, pseudo-statik sonuçlara göre X yönünde yaklaşık %12, Y yönünde ise yaklaşık %8 daha yüksek çıkmıştır.

İki yöntem arasındaki farkların temel nedenlerinden biri, pseudo-statik analizin deprem etkisini sabit bir yatay kuvvet olarak idealize etmesine karşın dinamik analizin zamana bağlı gerçek ivme kayıtlarını kullanmasıdır. Dinamik çözümde zemin–yapı etkileşimi, dalga yayılımı ve gerilme dalgalarının yansıması gibi etkiler doğrudan modellenebildiğinden, iç kuvvetlerin hem büyüklüğü hem de dağılım profili daha fazla sayıda mekanizma hesaba katılarak elde edilmektedir (Gazetas vd., 2004).

Öte yandan pseudo-statik analizde kullanılan eşdeğer yatay deprem katsayısının (kh = 0.246), TBDY'den türetilen *SDS* değerine ve yönetmelikteki davranış katsayısına bağlı olarak belirlenmesi nedeniyle, bu yaklaşım deprem etkisinin basitleştirilmiş bir temsilini sunmaktadır. Bu durum özellikle duvar tabanına yakın bölgelerde, dinamik analizle karşılaştırıldığında daha düşük iç kuvvet değerlerinin elde edilmesine yol açmaktadır.

Serbest-alan saha tepkisi doğrulaması kapsamında (Bölüm 4.1), Geowave ve DEEPSOIL yazılımlarından elde edilen yüzey tepki spektrumları birbiriyle yakın sonuçlar sunmuştur. Bu sonuçlar, dinamik analizde kullanılan saha büyütmesinin ve taban yer hareketinin çözücü seçiminden bağımsız olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, istinat duvarı üzerinde oluşan kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri, pseudo-statik ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile oluşturulan iki boyutlu modelde HSsmall bünye modeli, serbest-alan yanal sınırları ve uyumlu taban sınır koşulları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular, incelenen kesit özelinde dinamik analiz yönteminin pseudo-statik yaklaşıma kıyasla sistematik olarak daha yüksek iç kuvvetler öngördüğünü ortaya koymuştur. Dinamik analizlerden elde edilen maksimum kesme kuvvetleri pseudo-statik sonuçlara göre %9–13, maksimum eğilme momentleri ise %8–12 mertebesinde daha büyük çıkmıştır. Bu bulgular, zaman tanım alanında yapılan dinamik analizin incelenen kesit için daha ekonomik bir tasarım sağlamadığını, aksine tasarım iç kuvvetlerinin belirlenmesinde pseudo-statik yönteme göre daha yüksek değerde sonuçlar verdiğini göstermektedir. Buna karşılık, pseudo-statik yöntem ön tasarım aşamalarında veya hızlı mühendislik değerlendirmelerinde pratik bir yaklaşım olarak kullanılabilir.

Burada elde edilen sonuçların tek bir kesite, belirli bir zemin profiline ve seçilen yer hareketi kaydı kümesine ait olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Yönetmeliğin zaman tanım alanında analizi öngörmesinin gerekçesi, dinamik çözümün bazı durumlarda pseudo-statik yaklaşıma kıyasla daha düşük iç kuvvetler vererek daha ekonomik tasarıma imkân tanımasıdır. Bu davranışın ortaya çıkması; zemin profilinin hâkim titreşim periyodu ile yer hareketinin baskın periyot içeriği arasındaki ilişkiye, sistemin süneklik kapasitesine ve pseudo-statik yöntemde seçilen davranış katsayısına bağlıdır. İncelenen kesitte dinamik analizin daha yüksek iç kuvvet vermesi, bu koşulların bir sonucudur ve her durum için geçerli bir genelleme olarak yorumlanmamalıdır. Farklı zemin koşulları ve kesit geometrileri için karşılaştırmalı parametrik çalışmalar yürütülmesi, iki yöntem arasındaki farkın hangi durumlarda hangi yönde geliştiğinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) (2018), "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)", Ankara.

Al Atik, L., Abrahamson, N. (2010), "An improved method for non-stationary spectral matching", Earthquake Spectra, Vol 26(3), 601-617.

Bentley Systems (2025), "PLAXIS 2D Reference Manual", Bentley Systems, Incorporated.

Benz, T. (2007), "Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences", Doktora Tezi, Universität Stuttgart, Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞB) (2026), "Kazı Destek Yapıları Tasarım ve Uygulama Esasları Yönetmeliği (KDYY)", Ankara.

Darendeli, M.B. (2001), "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves", Doktora Tezi, University of Texas at Austin.

Gazetas, G., Psarropoulos, P.N., Anastasopoulos, I., Gerolymos, N. (2004), "Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 24, 537-550.

Geowave (2026), "Geowave – Bir-Boyutlu Doğrusal Olmayan Saha Tepki Analizi Yazılımı", https://h-geowave.geoproje.com.tr (Erişim tarihi: 4 Ağustos 2026).

GMPS (2026), "GMPS – Deprem Kayıt İşleme ve Yer Hareketi Parametreleri Yazılımı", https://gmps.geoproje.com.tr (Erişim tarihi: 4 Ağustos 2026).

Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N.A., Bommer, J.J., Markatis, A., McCoy, E., Mendis, R. (2006), "An improved method of matching response spectra of recorded ground motions using wavelets", Journal of Earthquake Engineering, Vol 10(spec01), 67-89.

Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 98, 667-692.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D. (2016), "DEEPSOIL 7.0, User Manual", Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Kramer, S.L. (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, New Jersey.

Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite dynamic model for infinite media", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol 95(4), 859-878.

Masing, G. (1926), "Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing", Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics, Zurich, 332-335.

Phillips, C., Hashash, Y.M.A. (2009), "Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 29(7), 1143-1158.

Seed, H.B., Idriss, I.M. (1970), "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Proje No: EERC 70-10.

SelectEQ (2026), "SelectEQ – Deprem Kaydı Seçim ve Ölçeklendirme Yazılımı", https://selecteq.geoproje.com.tr (Erişim tarihi: 4 Ağustos 2026).

Vucetic, M., Dobry, R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 117, 89-107.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c'	Efektif kohezyon (kPa)	σ_1'	Efektif asal gerilme (kPa)
Φ'	Efektif içsel sürtünme açısı (°)	K_0	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
$\gamma_{0.7}$	Referans kayma birim deformasyonu	Mw	Moment büyüklüğü
G_0 (Gmax)	Başlangıç kayma modülü (kPa)	Rjb	Joyner–Boore fay mesafesi (km)
$Gdyn$	Dinamik kayma modülü (kPa)	$FreqLU$	Düşük geçiş kesme frekansı (Hz)
E_{50}	Sekant elastisite modülü (kPa)	SS	Kısa periyot spektral ivme katsayısı
Vs	Kayma dalgası hızı (m/s)	S_1	1,0 s periyot spektral ivme katsayısı
$Vs30$	Üst 30 m ort. kayma dalgası hızı (m/s)	SDS	Kısa periyot tasarım spektral ivmesi
kh	Yatay eşdeğer deprem katsayısı	$SD1$	1,0 s tasarım spektral ivmesi
ah	Yatay eşdeğer deprem ivmesi (g)	Sa	Spektral ivme (g)
V	Kesme kuvveti (kN/m)	Sd	Spektral deplasman (m)
M	Eğilme momenti (kNm/m)	R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
PGA	En büyük yer ivmesi (g)	ρ	Birim hacim kütlesi (t/m³)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s²)	ξ	Sönüm oranı (%)