4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

BENZER V_{s30} DEĞERLERİNE SAHİP FARKLI ZEMİNLERİN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE OF DIFFERENT SOIL PROFILES WITH SIMILAR V_{s30} VALUES

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

ÖZET

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY) zemin sınıflandırması ile tasarım spektrumlarının belirlenmesinde temel ölçüt olarak ilk 30 metrelik zemin profilinin ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}) kullanılmaktadır. Bununla birlikte, V_{s30} parametresi yalnızca profilin ortalama bir özelliğini temsil ettiğinden, zemin tabakalarının dizilimi, rijitlik değişimleri ve derinlik boyunca oluşan empedans farklılıklarını tam olarak yansıtamamaktadır. Bu çalışmada, aynı V_{s30} değerine sahip olmasına karşın tabakalaşma düzeni ve mühendislik özellikleri farklı iki zemin profilinin dinamik davranışı, bir boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) analizler aracılığıyla incelenmiştir. Elde edilen bulgular, zemin profillerine ait spektral ivme değerlerinde ve büyütme davranışlarında belirgin farklılıklar sergilediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, V_{s30} tabanlı zemin sınıflandırmasının ötesinde sahaya özel zemin davranışı analizlerinin tasarım aşamasındaki önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kayma dalgası hızı, Zemin sınıflandırması, Tasarım spektrumu, Dinamik zemin davranış analizi, Vs30.

ABSTRACT

In the Turkish Building Earthquake Code (TBEC 2018), the time-averaged shear wave velocity of the upper 30 m of the soil profile (V_{s30}) is adopted as the primary parameter for site classification and the determination of the design response spectrum. However, since V_{s30} represents only the average property of the soil profile, it cannot adequately capture the effects of soil layering, stiffness variations, and impedance contrasts throughout the profile. In this study, the dynamic responses of two soil profiles having identical V_{s30} values but different stratification patterns and engineering properties were investigated using one-dimensional (1D), two-dimensional (2D), and three-dimensional (3D) dynamic analyses. The results demonstrated that, despite having the same V_{s30} value, soil profiles with different stratification patterns exhibit significant differences in spectral acceleration and amplification characteristics. These findings highlight the importance of site-specific ground response analyses beyond V_{s30}-based site classification during the design process.

Keywords: Shear wave velocity, Site classification, Design response spectrum, Dynamic site response analysis, V_{s30}

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

1. GİRİŞ

Deprem mühendisliği uygulamalarında, yerel zemin koşullarının yapıların sismik davranışı üzerindeki etkisi büyük önem taşımaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında zeminlerin sınıflandırılması, Bölüm 16: Zemin ve Temel Tasarımı içerisinde yer alan 16.4. Yerel Zemin Sınıfları başlığı altında, zemin profilinin üst 30 metresine ilişkin kayma dalgası hızı V_{s30}, standart penetrasyon deneyi darbe sayısı $(N_{60})_{30}$ ve drenajsız kayma dayanımı $(c_u)_{30}$ gibi geoteknik parametreler esas alınarak yapılmaktadır. Bununla birlikte, özellikle dinamik zemin davranışının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olan V_{s30}, zeminin üst 30 metresindeki kayma dalgası hızlarının zamana göre ortalamasını temsil ettiğinden, tabakaların derinlik boyunca dağılımını, rijitlik değişimlerini ve tabakalar arasındaki empedans kontrastlarını tek başına yeterince yansıtamayabilmektedir. Bu nedenle, aynı veya benzer V_{s30} değerlerine sahip farklı zemin profilleri, deprem etkisi altında farklı zemin büyütmesi ve rezonans davranışları gösterebilmektedir (Kegyes-Brassai vd., 2018; Pitilakis vd., 2013). Nitekim literatürde, benzer V_{s30} değerine sahip ancak farklı tabakalaşma özellikleri gösteren zemin profillerinin dinamik tepkilerinde ve spektral büyütme karakteristiklerinde belirgin farklılıklar gözlenebildiği raporlanmıştır (Ghanbari vd., 2018; Papaspiliou vd., 2012).

Bu çalışma kapsamında, aynı ortalama kayma dalgası hızına sahip zemin profillerinin dinamik davranışlarındaki farklılıkların incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, 30 metre kalınlığa ve rijit ana kaya üzerinde yer alan iki farklı zemin profili modellenmiştir: ilk modelde onbeşer metre kalınlığında iki tabaka (üst tabaka V_s=200 m/s, alt tabaka V_s=600 m/s) bulunurken, ikinci modelde 30 metre kalınlığında tek bir tabaka (V_s =300 m/s) tanımlanmıştır.

Söz konusu zemin profillerinin dinamik davranışlarını kapsamlı bir şekilde karşılaştırabilmek adına analizler gerçekleştirilmiştir. 1D dinamik zemin davranış analizleri için eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan çözümleme yapabilen DEEPSOIL (Hashash, 2024) ve GEOWAVE (GEOWAVE, 2026) yazılımları kullanılmıştır. 2D analizler sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Plaxis 2D (Bentley Systems, 2026) ile, 3D analizler ise sonlu farklar yöntemi kullanan FLAC3D (Itasca, 2019) yazılımı ile modellenmiştir.

Sayısal modellemelerde zaman tanım alanında analiz yapılabilmesi adına farklı frekans içeriğine ve genliklere sahip 11 adet deprem yer hareketi ivme kaydı takımı kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deprem Kayıtlarının Seçimi ve Ölçeklenmesi

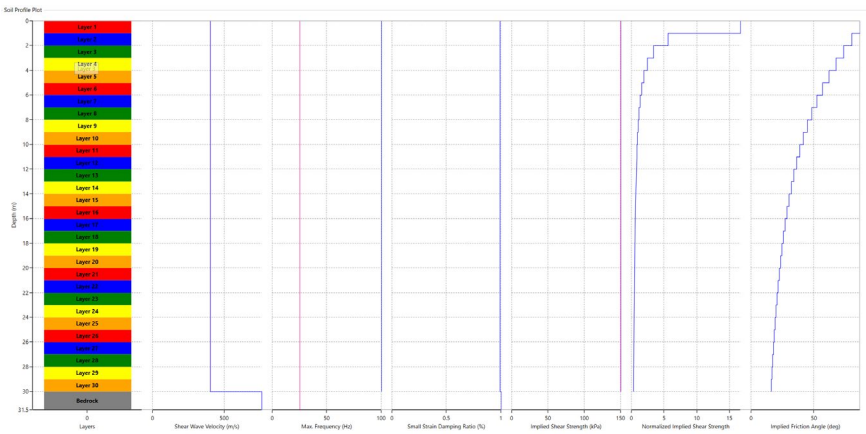
Dinamik analizlerde kullanılacak deprem yer hareketi kayıtları SelectEQ yazılımı (SelectEQ, 2026) kullanılarak seçilmiş; seçilen 11 adet kayıt, GMPS yazılımı (GMPS, 2026) platformunda 0,1–3,0 saniye periyot aralığında ana kaya koşullarını temsil eden ortak hedef tasarım spektrumuyla uyum sağlayacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Seçilen kayıtlar ana kaya outcrop hareketleri olarak değerlendirilmiş ve tüm sayısal modellere aynı kayıt seti uygulanmıştır.DD-2 deprem düzeyi için kısa periyot harita spektral ivme katsayısı S_S = 1.025 ve 1 saniye periyot harita spektral ivme katsayısı S_1 = 0.275 olarak belirlenmiştir. Yerel zemin sınıfı ZC olarak kabul edilerek bu sınıfa ait tasarım spektral büyüklükleri S_{DS} = 1.230 ve S_{D1} = 0.413 olarak elde edilmiştir. Toplam 11 adet deprem kaydı seçilmiş olup bu kayıtlara ait bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları

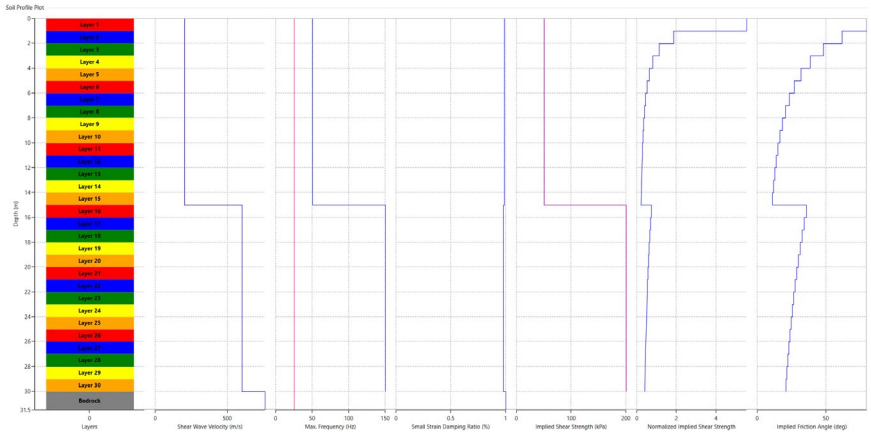
Kayıt No	Deprem Adı	İstasyon	Mw	Fay Mek.	En Kısa Mesafe (km)	Vs30 (m/s)	FreqLU (Hz)	Ölçek Katsayısı (DD-2)
825	Cape Mendocino	Cape Mendocino	7.01	2	6.96	567.78	0.07	0.46
1549	Chi-Chi, Taiwan	TCU129	7.62	3	1.83	511.18	0.04	0.61
1148	Kocaeli, Turkey	Arcelik	7.51	0	13.49	523	0.09	2.66
20030501 002708	Bingöl Depremi	1201	6.3	0	5.8	528	0.01	1.04
20200124 175511	Elazığ 2020	4404	6.8	0	18.6	1382	0.01	1.87
20201030 115124	Samos 2020	3536	6.6	1	45.76	1141	0.01	3
357	Coalinga-01	Parkfield-Stone Corral 3E	6.36	2	34	565.08	0.15	3.25
6949	Darfield, New Zealand	PEEC	7	0	53.75	551.3	0.17	3.19
4096	Parkfield-02, CA	Bear Valley Ranch, Parkfield, CA, USA	6	0	4.32	527.95	0.13	3
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	6.9	1	30.07	574.88	0.38	3.03

2.2. 1D Analiz — DEEPSOIL ve GEOWAVE

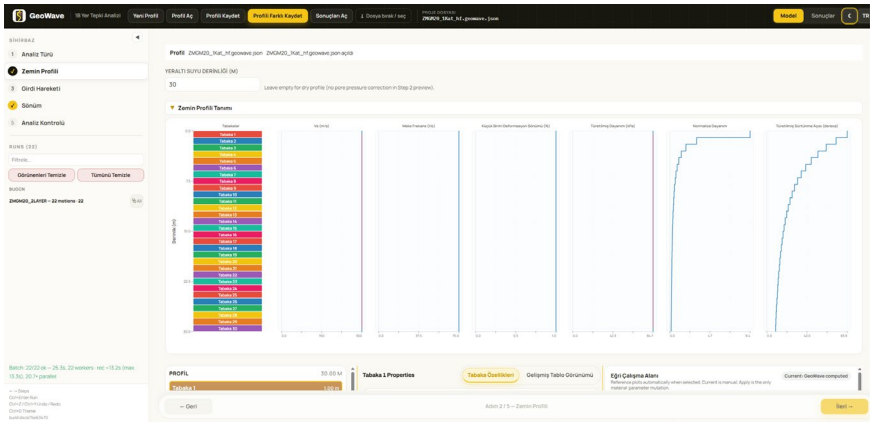
1D dinamik zemin davranışı analizlerinde DEEPSOIL (Hashash, 2024) ve GEOWAVE (GEOWAVE, 2026) yazılımları kullanılmış; doğrusal olmayan (nonlineer) yöntem tercih edilmiştir. Zemin davranışı için referans eğrisi olarak Vucetic and Dobry (1991) tarafından önerilen dinamik eğriler kullanılmış ve plastisite indeksi PI = 30 olarak belirlenmiştir. Tek katmanlı modelde zemin profili her biri 1 m kalınlığında 30 tabakaya bölünerek modellenmiştir. Çift katmanlı modelde ise üst tabaka (V_s = 200 m/s, 15 m) ve alt tabaka (V_s = 600 m/s, 15 m) ayrı ayrı tanımlanmıştır. Ana kaya yüzeyi rijit sınır olarak kabul edilmiş ve kayma dalgası hızı 760 m/s olarak atanmıştır. Oluşturulan DEEPSOIL modellemeleri Şekil 1 ve 2'de, GEOWAVE modellemeleri ise Şekil 3 ve 4'te sunulmuştur.



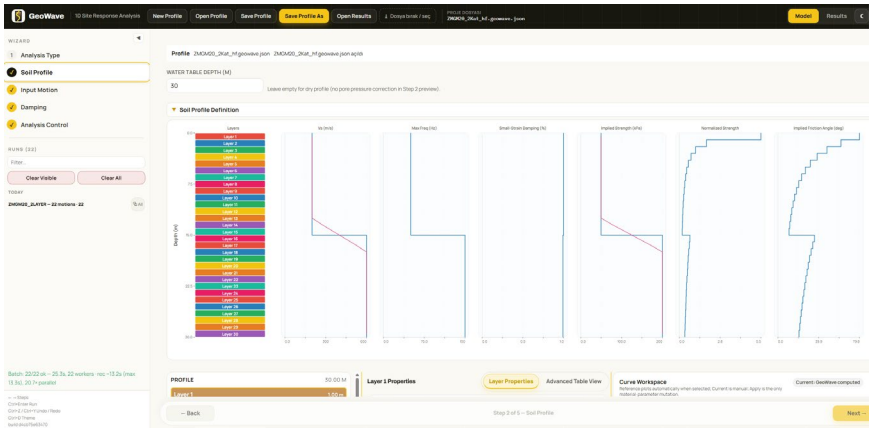
Şekil 1. DEEPSOIL yazılımında tek katmanlı zemin profili modeli



Şekil 2. DEEPSOIL yazılımında çift katmanlı zemin profili modeli



Şekil 3. GEOWAVE yazılımında tek katmanlı zemin profili modeli



Şekil 4. GEOWAVE yazılımında çift katmanlı zemin profili modeli

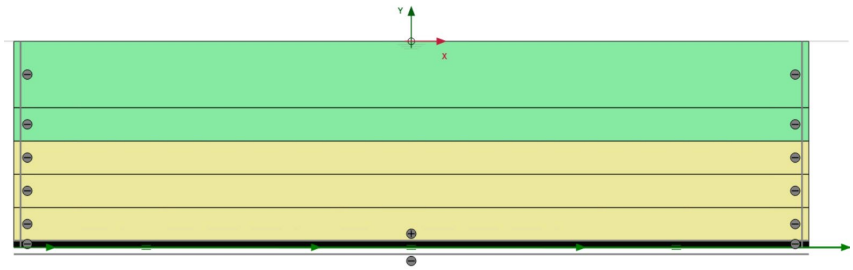
2.3. 2D Analiz — Plaxis 2D

Plaxis 2D ile oluşturulan modellere ait boyutlar 120 m genişlik ve 31 m derinlik (30 m zemin tabakası + 1 m rijit ana kaya) olarak belirlenmiştir. Zemin davranışı, küçük birim deformasyon rijitliğini ve histeretik sönümü dikkate alan HS small (Hardening Soil with Small-Strain Stiffness) bünye modeli ile, ana kaya tabakası ise Doğrusal Elastik (Linear Elastic) model ile temsil edilmiştir. Deprem yer hareketi gibi dinamik sarsıntılarda

kohezyonlu zemin tabakalarında aşırı boşluk suyu basıncının tahliye olamaması nedeniyle dinamik drenajsız davranışı temsil etmek üzere Undrained (B) yöntemi tercih edilmiş ve drenajsız kayma dayanımı (su) doğrudan tanımlanmıştır (V_{s200} için su = 50 kPa, V_{s300} için su = 85 kPa, V_{s600} için su = 200 kPa). Malzeme sönümü Rayleigh sönümü yöntemi ile modellenmiş olup sönüm oranı zemin tabakalarında ξ = %2, ana kaya tabakasında ξ = %1, hedef frekans aralığı ise f1 = 0.3 Hz ve f2 = 10 Hz olarak belirlenmiştir. Sınır koşulları olarak modelin yan yüzeylerinde serbest alan (Free-Field), tabanında ise uyumlu (Compliant) sınır koşulları tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 2'de ve sonlu elemanlar modeli Şekil 5'te sunulmuştur.

Tablo 2. Plaxis 2D analizlerinde kullanılan zemin parametreleri

Parametre	**Birim**	V_{s200}	V_{s300}	V_{s600}	**Ana Kaya (V_{s760})**
Model	—	HS small	HS small	HS small	Linear Elastic
Drenaj	—	Undrained (B)	Undrained (B)	Drenajlı	Drenajlı
γ	kN/m³	18	18	18	23
E_{50}^{ref}	kPa	15000	45000	110000	3250000
G_0^{ref}	kPa	72000	162000	648000	1354000
$\gamma_{0.7}$	—	0.0002938	0.0002570	0.0001121	—
s_u	kPa	50	85	200	—
c'_{ref}	kPa	5	8	50	—
φ'	°	30	30	25	—
Rayleigh ξ	%	2	2	2	1
Rayleigh f	Hz	0.3, 10	0.3, 10	0.3, 10	0.3, 10
V_s	m/s	200	300	600	760



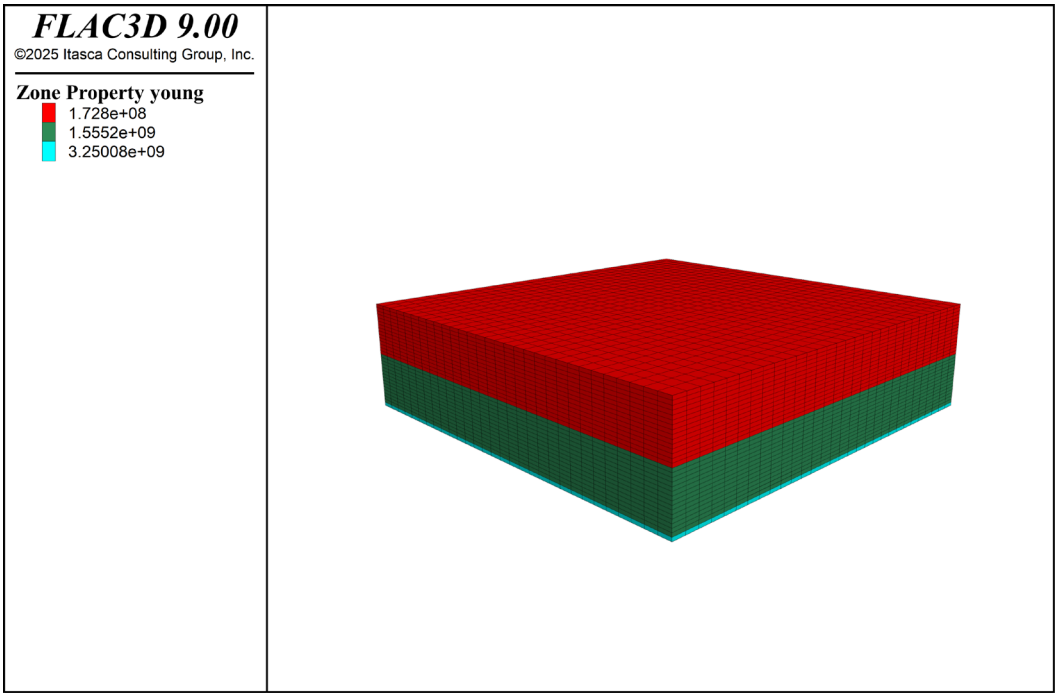
Şekil 5. Plaxis 2D sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları

2.4. 3D Analiz — FLAC3D

Üç boyutlu dinamik analizler FLAC3D sonlu farklar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal model; 120 m × 120 m yatay boyutlara ve 31 m derinliğe (30 m zemin tabakası + 1 m rijit ana kaya) sahip olacak şekilde, 4 m × 4 m × 1 m zon boyutlarında toplam 27.900 eleman ile oluşturulmuştur. Zemin davranışı, dinamik yükler altında zeminlerin drenajsız davranışını temsil edebilmek amacıyla toplam gerilme yaklaşımı esas alınarak drenajsız kayma dayanımı (su) ve φ = 0° ile tanımlanan Mohr-Coulomb bünye modeli ile modellenmiştir. Başlangıç küçük gerinim rijitliği (Gmax = ρ Vs^2) üzerinden tanımlanan modelde, doğrusal olmayan dinamik davranışı ve modül azalımını temsil etmek üzere Sigmoidal-3 histeretik sönüm modeli (reduction-minimum 0.1) ile minimum Rayleigh sönümü (ξ = %0.2 @ 2.0 Hz) uygulanmıştır. Modelin yan yüzeylerinde serbest alan (Free-Field), tabanında ise uyumlu sönümleyici (Compliant) sınır koşulları tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 3'te ve model geometrisi Şekil 6'te sunulmuştur.

Tablo 3. FLAC3D analizlerinde kullanılan Mohr-Coulomb zemin parametreleri

Parametre	**Kaynak / Formül**	**Vs = 200 m/s**	**Vs = 300 m/s**	**Vs = 600 m/s**	**Ana Kaya (760 m/s)**
Bünye Modeli	—	Mohr-Coulomb (su)	Mohr-Coulomb (su)	Mohr-Coulomb (su)	Linear Elastic
Yoğunluk, ρ (kg/m³)	ρ	1800	1800	1800	2344
Kayma Modülü, G (Pa)	ρVs^2	7.20×10^{7}	1.62×10^{8}	6.48×10^{8}	1.354×10^{9}
Sıkışmazlık Modülü, K (Pa)	$1.333 \cdot G$ $(\nu=0.20)$	9.60×10^{7}	2.16×10^{8}	8.64×10^{8}	1.806×10^{9}
Drenajsız Dayanım, su (Pa)	su (φ=0)	5.0×10^{4}	8.5×10^{4}	2.0×10^{5}	—
Histeretik Sönüm (Sig-3: a, b, x0)	G/Gmax	1.0, −0.4507, −1.2407	1.0, −0.4507, −1.2407	1.0, −0.4507, −1.2407	—
Modül Azalım Alt Sınırı	reduction-minimum	0.1	0.1	0.1	—
Vs doğrulama (m/s)	√(G/ρ)	200	300	600	760



Şekil 6. FLAC3D sonlu farklar modeli

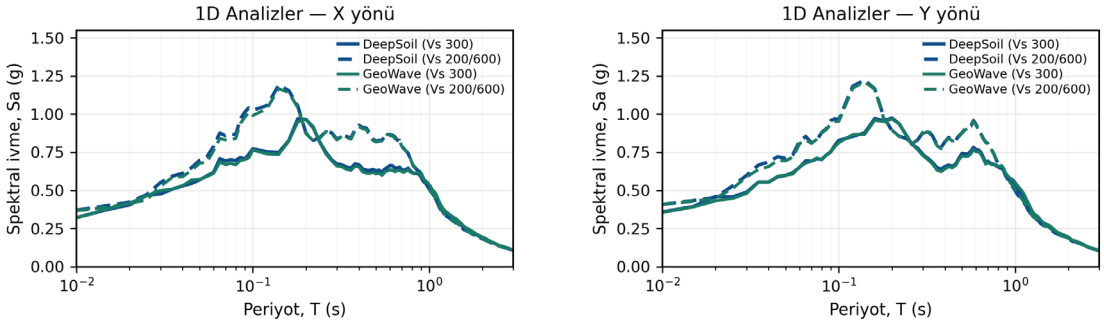
3. BULGULAR

Bu bölümde, iki farklı zemin profili için üç farklı boyut üzerinden gerçekleştirilen dinamik analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Sonuçlar, 11 deprem kaydının her iki yatay bileşeni (X ve Y yönü) için ayrı ayrı elde edilen ortalama spektral ivme değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. İlk olarak her yazılım kendi içinde tek katmanlı ve çift katmanlı model sonuçları açısından karşılaştırılmış, ardından tüm yazılımların sonuçları bir arada değerlendirilmiştir.

3.1. Yazılım Bazında Karşılaştırma

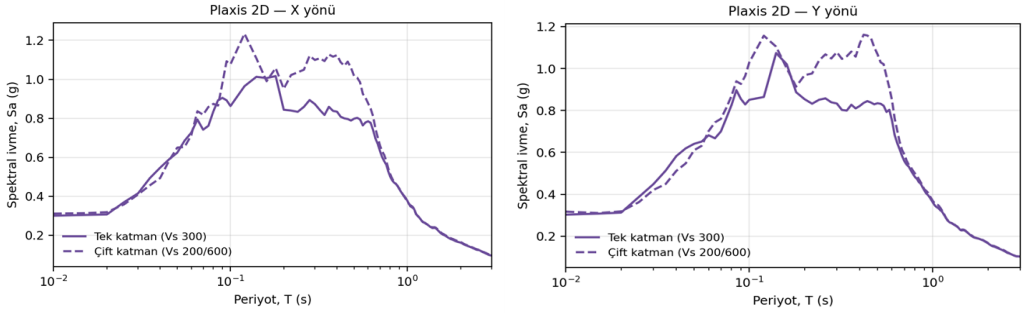
Şekil 7'de 1D dinamik analiz yazılımları olan DEEPSOIL ve GEOWAVE ile elde edilen ortalama spektral ivme sonuçları sunulmaktadır. Her iki 1D analiz yazılımının sonuçlarının

hem tek katmanlı (V_s = 300 m/s) hem de çift katmanlı (V_s = 200/600 m/s) zemin profillerinde gerek X gerekse Y yönünde birbiriyle neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir. Çift katmanlı zemin profiline ait spektral ivme değerlerinin, tek katmanlı profile kıyasla özellikle $T \approx 0.05$–0.90 s periyot aralığında belirgin şekilde daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Çift katmanlı modelde maksimum S_a değeri $T \approx 0.14$–0.16 s periyodunda yaklaşık 1.18–1.22 g seviyesine ulaşırken, tek katmanlı modelde maksimum S_a değeri $T \approx 0.20$ s civarında yaklaşık 0.97 g olarak elde edilmiştir. Ayrıca çift katmanlı modelde tabakalar arası empedans kontrastına bağlı olarak orta periyot bölgesinde (özellikle Y yönünde $T \approx 0.60$ s civarında) ikincil spektral büyütmeler dikkat çekmektedir. Uzun periyotlarda ($T > 1.0$ s) ise her iki yazılım ve zemin profiline ait spektral ivme eğrileri birbirine yakın değerler sunmuştur.



Şekil 7. 1D dinamik analiz yazılımlarında (DEEPSOIL ve GEOWAVE) tek ve çift katmanlı zemin modellerinin ortalama spektral ivme karşılaştırması (X ve Y yönü)

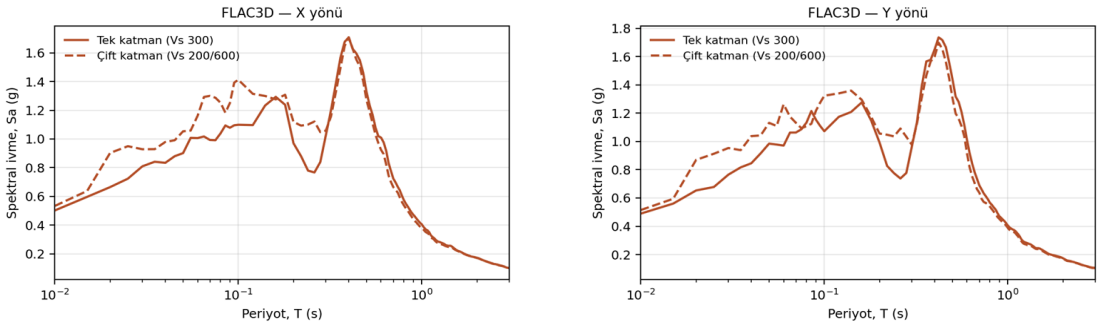
Şekil 8'de Plaxis 2D yazılımı ile elde edilen 2D dinamik analiz sonuçları sunulmaktadır. DEEPSOIL bulgularıyla uyumlu olarak, çift katmanlı (V_s = 200/600 m/s) zemin profili, tek katmanlı (V_s = 300 m/s) profile kıyasla yüksek spektral ivme değerleri üretmiştir. Çift katmanlı modelde maksimum S_a değeri $T \approx 0.12$ s periyodunda X yönünde yaklaşık 1.23 g, Y yönünde ise 1.16 g seviyesine ulaşmıştır. Tek katmanlı modelde ise pik spektral ivme $T \approx$ 0.14–0.18 s aralığında 1.01–1.08 g civarında gerçekleşmiştir. Özellikle orta periyot bölgesinde ($T \approx 0.20$–0.60 s), çift katmanlı zemin profilindeki empedans kontrastının ve 2D dalga yayılımının etkisiyle belirgin ikincil büyütmeler ve geniş bir plato (Y yönünde $T \approx$ 0.45 s civarında $S_a \approx 1.16$ g) gözlenmiştir. Uzun periyot bölgesinde ($T > 0.8$ s) ise her iki zemin profiline ait eğriler birbirine yaklaştığı görülmüştür.



Şekil 8. Plaxis 2D yazılımında tek ve çift katmanlı zemin modellerinin ortalama spektral ivme karşılaştırması (X ve Y yönü)

Şekil 9'da FLAC3D yazılımı ile elde edilen 3D dinamik analiz sonuçları sunulmaktadır. FLAC3D sonuçlarında hem tek katmanlı (V_s = 300 m/s) hem de çift katmanlı (V_s = 200/600 m/s) zemin modelleri, ana pik değerlerine $T \approx 0.40$–0.45 s periyot aralığında ulaşmış ve

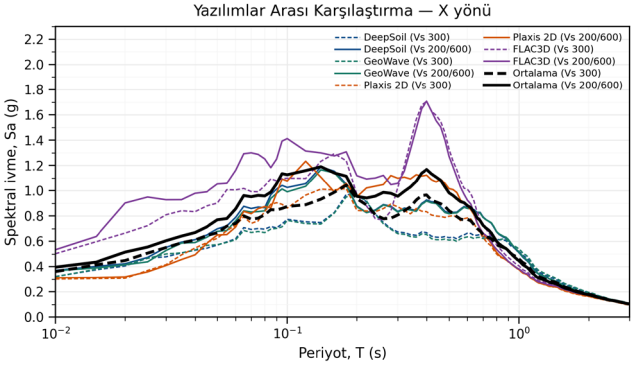
sırasıyla yaklaşık 1.70–1.74 g ve 1.68–1.70 g seviyesinde birbirine yakın maksimum spektral ivmeler üretmiştir. Bununla birlikte, özellikle $T \approx 0.02$–0.30 s kısa periyot bölgesinde çift katmanlı model, zemin tabakaları arasındaki empedans kontrastının etkisiyle tek katmanlı modele kıyasla belirgin şekilde daha yüksek spektral ivme değerleri (X yönünde $T \approx 0.10$ s civarında $S_a \approx 1.41$ g, Y yönünde $T \approx 0.13$ s civarında $S_a \approx 1.36$ g) sergilemiştir. Tek katmanlı model $T \approx 0.20$–0.30 s aralığında $S_a \approx 0.74$–0.78 g seviyesine gerilerken, çift katmanlı model bu aralıkta $S_a \geq 1.05$ g seviyelerinde kalarak büyütme etkisini sürdürmüştür. Uzun periyotlarda ($T > 0.8$ s) ise her iki modele ait ivme eğrileri birbirine tamamen yaklaşarak sönümlenmektedir.



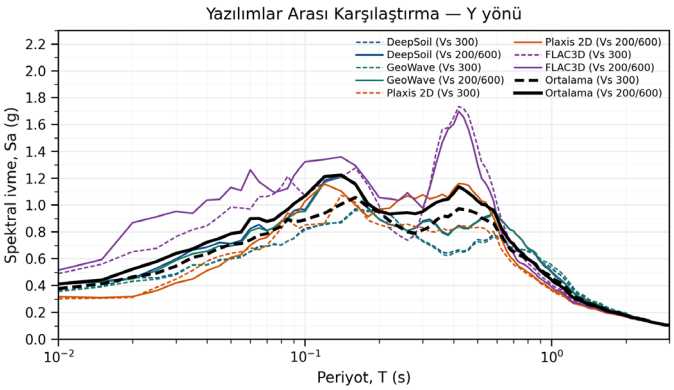
Şekil 9. FLAC3D yazılımında tek ve çift katmanlı zemin modellerinin ortalama spektral ivme karşılaştırması (X ve Y yönü)

3.2. Yazılımlar Arası Karşılaştırma

Farklı boyutlardaki sayısal modellerin dinamik tepkilerini karşılaştırmak amacıyla dört yazılıma (DEEPSOIL, GeoWave, Plaxis 2D ve FLAC3D) ait ortalama spektral ivme eğrileri ile profil ortalamaları X ve Y yönleri için sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmaktadır. 1D yazılımlar (DEEPSOIL ve GeoWave) her iki zemin profilinde ve her iki doğrultuda birbiriyle tam bir uyum sergilemiştir. 2D Plaxis analizleri 1D sonuçlarla genel bir uyum sergilerken, orta periyot bölgesinde (T ≈ 0.20–0.60 s) tabaka içi dalga yayılımları nedeniyle ek ivme büyütmeleri üretmiştir. FLAC3D analizlerinde ise pik ivmeler bünye modeli ve histeretik sönümün etkisiyle T ≈ 0.40–0.45 s periyodunda yaklaşık 1.70–1.74 g seviyesine ulaşmıştır. Çift katmanlı zemin profilinde (Vs 200/600, düz çizgiler), tabakalar arası empedans kontrastı sebebiyle kısa periyotlarda (T ≈ 0.14 s, Sa ≈ 1.19–1.22 g) tek katmanlı modele (Vs 300, kesikli çizgiler, T ≈ 0.16–0.18 s, Sa ≈ 1.04–1.06 g) kıyasla belirgin şekilde daha yüksek spektral ivmeler elde edilmiştir. Uzun periyotlarda (T > 1.0 s) ise tüm modeller birbirine yaklaşarak sönümlenmektedir.

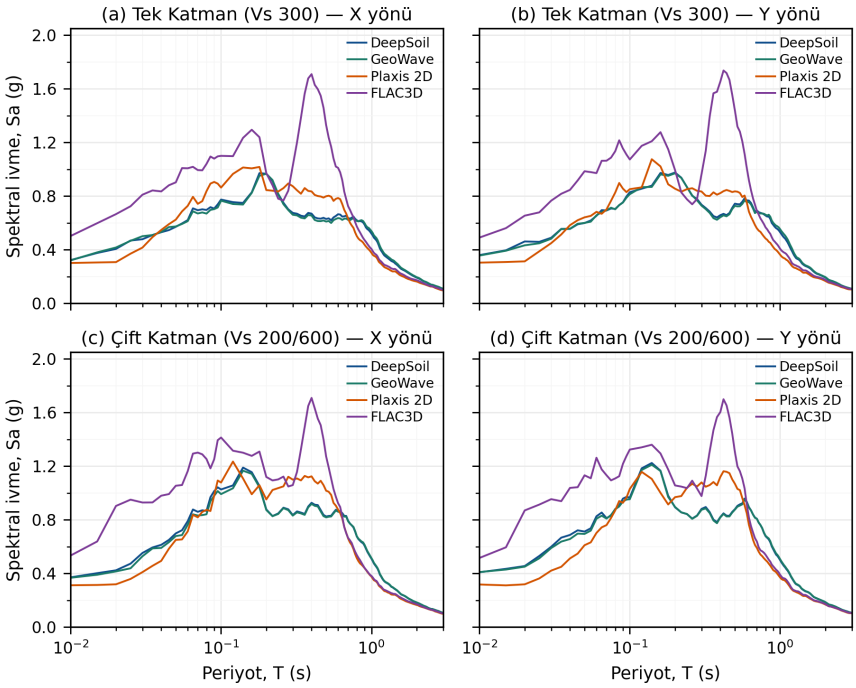


Şekil 10. Farklı sayısal analiz yazılımlarında tek ve çift katmanlı zemin modellerinin ortalama spektral ivme karşılaştırması ve genel ortalaması (X yönü)



Şekil 11. Farklı sayısal analiz yazılımlarında tek ve çift katmanlı zemin modellerinin ortalama spektral ivme karşılaştırması ve genel ortalaması (Y yönü)

Tek ve çift katmanlı zemin modellerinin yazılım bazındaki davranışlarını profil bazında daha ayrıntılı değerlendirebilmek adına, her bir zemin modeli ve doğrultu için dört yazılımın spektral ivme eğrileri Şekil 12'de 2×2 matris düzeninde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 12(a) ve (b)'de tek katmanlı model için 1D analizlerin (DEEPSOIL ve GeoWave) birbiriyle tam bir uyum sergilediği (Sa ≈ 0.97 g), 2D Plaxis analizlerinin T ≈ 0.14–0.18 s periyot aralığında bir miktar daha yüksek ivme ürettiği (Sa ≈ 1.01–1.08 g), 3D FLAC3D analizlerinin ise T ≈ 0.40–0.45 s rezonans bandında maksimum Sa ≈ 1.70–1.74 g ile belirgin bir tepe oluşturduğu görülmektedir. Şekil 12(c) ve (d)'de çift katmanlı model için ise tabakalar arası empedans kontrastının etkisiyle 1D yazılımlarda pik ivmelerin T ≈ 0.14–0.16 s periyoduna kayarak Sa ≈ 1.18–1.22 g seviyesine yükseldiği; 2D Plaxis analizlerinde orta periyot bölgesinde (T ≈ 0.20–0.50 s) Sa ≈ 1.05–1.16 g bandında geniş bir plato oluştuğu; 3D FLAC3D analizlerinde ise hem kısa periyotlarda (T < 0.25 s, Sa ≈ 1.30–1.41 g) hem de ana pik periyodunda (T ≈ 0.40–0.45 s, Sa ≈ 1.68–1.70 g) yüksek spektral ivmelerin korunduğu görülmektedir.



Şekil 12. Tek ve çift katmanlı zemin modelleri için yazılımlar arası karşılaştırmalı ortalama spektral ivme spektrumları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, aynı eşdeğer V_{s30} değerine (300 m/s) sahip tek katmanlı ve çift katmanlı (200/600 m/s) zemin profillerinin dinamik davranışı; 1D (DEEPSOIL ve GEOWAVE), 2D (Plaxis 2D) ve 3D (FLAC3D) sayısal analiz yöntemleriyle zaman tanım alanında incelenmiştir. Analiz sonuçları, aynı ortalama V_{s30} değerine sahip olunmasına karşın tabakalanma düzeninin dinamik tepki üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Çift katmanlı modeldeki tabakalar arası empedans kontrastı, yumuşak üst tabakanın etkisiyle özellikle kısa ve orta periyot bölgesinde ($T \approx 0.05$–0.60 s) tek katmanlı modele kıyasla belirgin ek büyütmeler, ikincil tepe noktaları ve geniş spektral platolar meydana getirmiştir.

Sayısal yöntemler karşılaştırıldığında; 1D yazılımları (DEEPSOIL ve GEOWAVE) birbiriyle neredeyse birebir örtüşen sonuçlar sergilerken, 2D Plaxis analizleri tabaka içi dalga yansımaları nedeniyle orta periyot bölgesinde ($T \approx 0.20$–0.50 s, $S_a \approx 1.05$–1.16 g) 1D modellere kıyasla daha yüksek ivmeler üretmiştir. FLAC3D modellerinde ise bünye modeli ve histeretik sönüm yaklaşımına bağlı olarak her iki profilde de pik değerler $T \approx 0.40$–0.45 s bandında ($S_a \approx 1.68$–1.74 g) ortaya çıkmıştır. Elde edilen tüm bu bulgular, sismik tasarımda zemin sınıflandırması için yalnızca V_{s30} parametresine dayanmanın tabakalı zeminlerin dinamik davranışını yansıtmakta yetersiz kalabileceğini; sahaya özel dinamik zemin davranışı analizlerinin ve uygun sayısal boyut/yöntem seçiminin yapı güvenliği açısından kritik bir öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Her bir sayısal yöntem kendi içinde değerlendirildiğinde, aynı (V_{s30}=300 m/s) değerine sahip tek ve çift katmanlı idealize zemin profillerinin farklı yüzey tepkileri ürettiği görülmüştür. Bununla birlikte, yöntemler arasında gözlenen farklılıkların yalnızca analiz boyutuna atfedilemeyeceği; bünye modeli, sönüm tanımı, malzeme parametreleri, sınır koşulları ve sayısal ayrıklaştırmanın da sonuçlar üzerinde etkili olduğu dikkate alınmalıdır. Elde edilen bulgular, bu çalışmada ele alınan idealize zemin profilleri, deprem kayıtları ve modelleme kabulleri kapsamında değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Bentley Systems (2026), "PLAXIS 2D Reference Manual", Bentley Systems Inc.

GEOWAVE (2026), “GEOWAVE – Bir-Boyutlu Doğrusal Olmayan Saha Tepki Analizi Yazılımı”, https://GEOWAVE.geoproje.com.tr (Erişim tarihi: 4 Ağustos 2026).

Ghanbari, A., Daghigh, Y., & Hassanvand, F. (2018). Risks of solely relying on VS30 in ground motion response studies. Civil Engineering Journal, 4(12), 2937-2947.

Hashash, Y. M. A. (2024). DEEPSOIL v7.1 user manual: Nonlinear and equivalent linear seismic site response of one-dimensional soil columns (Version 7.1). Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana–Champaign.

Itasca (2019). FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, User's Guide. Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN.

Kegyes-Brassai, O., Kovacs, G., Toth, T., Labar, B., & Wolf, A. (2018). Local site response analyses based on field measurements compared to vs30 site-condition. Szechenyi Istvan University, Gyor, Hungary.

Papaspiliou, M., Kontoe, S., & Bommer, J. J. (2012). An exploration of incorporating site response into PSHA-Part I: Issues related to site response analysis methods. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 42, 302-315.

Pitilakis, K., Riga, E., & Anastasiadis, A. (2013). New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database. Bulletin of Earthquake Engineering, 11(4), 925-966.

SelectEQ (2026), “SelectEQ – Deprem Kaydı Seçim ve Ölçeklendirme Yazılımı”, https://selecteq.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).

TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara.

Vucetic, M. & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), 89-107.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
V_s	Kayma dalgası hızı	V_{s30}	İlk 30 m ortalama kayma dalgası hızı
S_a	Spektral ivme	G_0	Başlangıç kayma modülü
G/G_{max}	Normalize kayma modülü	γ	Birim hacim ağırlık
$\gamma_{0.7}$	Referans kayma deformasyonu	c'	Efektif kohezyon
φ'	Efektif içsel sürtünme açısı	E_{50}^{ref}	Referans rijitlik (yükleme)
G_0^{ref}	Referans küçük gerinim rijitliği	K	Hacim modülü
ρ	Yoğunluk	ξ	Sönüm oranı
f	Frekans	T	Periyot
S_S	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı	S_1	1 s periyot harita spektral ivme katsayısı
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı	S_{D1}	1 s tasarım spektral ivme katsayısı
PI	Plastisite indeksi	M_w	Moment büyüklüğü
v	Poisson oranı	T_A, T_B	Köşe periyotları
a, b, x_0	Histeretik sönüm (Sig-3) eğrisi uyum parametreleri	s_u	Drenajsız kayma dayanımı