



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2025
Kabul Tarihi : 04.02.2025

Received Date : 03.01.2025
Accepted Date : 04.02.2025

DEPREM KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN ZEMİN ÇİVİLİ DUVARLARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ: 3 BOYUTLU SAYISAL ANALİZ

THE INFLUENCE OF EARTHQUAKE CHARACTERISTICS ON THE BEHAVIOUR OF NAILED WALLS: 3D NUMERICAL ANALYSES

Burcu DIŞKAYA^{1*} (ORCID: 0000-0002-6170-3856)
Akın GÖKGÖZ¹ (ORCID: 0000-0001-6777-5351)
Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU² (ORCID: 0000-0003-1721-7946)

¹ İstanbul Beykent Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi, İstanbul, Türkiye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Burcu DIŞKAYA, burcuozbasaran@gmail.com

ÖZET

Zemin çivili duvarlar deprem yükleri altında önemli deformasyonları karşılayabilmektedir. Bu sistemlerin tasarımında, limit denge yöntemlerine dayanan Mononobe-Okabe yöntemi gibi pseudo-statik yaklaşımlar tercih edilmektedir. Ancak, bu yöntemlerin sınırlamaları bulunmakta; zemin-çivi etkileşimi ve yapı elemanlarının etkileri tam olarak incelenememektedir. Dinamik koşullar altında zemin çivili sistemlerin davranışının derinlemesine anlaşılması için sayısal analizlerin önemi büyüktür. Bu bağlamda, mevcut çalışmaların çoğu pseudo-statik limit denge analizlerine dayanmakta olup, gerçek zaman tanımlı sismik etkiler altında yapılan sayısal çalışmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, zemin çivileriyle güçlendirilmiş şev modellerinin dinamik analizi FLAC3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On ayrı deprem hareketi altında incelenen şev sisteminin dinamik davranışı, çeşitli deprem karakteristiklerinin etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle, pik yer ivmesinin, düşük deformasyon seviyelerinde belirleyici olduğu, ancak yüksek deformasyon koşullarında Arias Şiddetinin önemli bir etken haline geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çivilerde meydana gelen maksimum kuvvetlerin alt sıra çivilerde meydana geldiği, üst sıralardaki çivilerin sisteme katkısının sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, sismik tasarım ve analiz disiplinlerine katkı sağlayacak nitelikte olup, zemin çivili sistemlerin dinamik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına yönelik önemli veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin çivili duvarlar, şev stabilitesi, dinamik analiz, sonlu farklar yöntemi

ABSTRACT

Soil-nail walls can endure significant deformations during earthquakes. Their design often relies on pseudo-static methods like the Mononobe-Okabe approach, based on limit equilibrium principles. However, these methods have limitations, as they cannot fully capture soil-nail interactions or the influence of structural elements. Numerical analyses are essential for a deeper understanding of soil-nail behavior under dynamic conditions. Most studies focus on pseudo-static analyses, with limited research on real-time seismic effects. This study used FLAC3D software to analyze the dynamic behavior of soil-nail reinforced slopes under ten different earthquake motions. The results showed that peak ground acceleration influenced low deformation levels, while Arias Intensity became significant at high deformation levels. Under dynamic loads, maximum nail forces were concentrated in the lower nail rows, with minimal contribution from upper nail rows. These findings enhance understanding of soil-nail system dynamics and support advancements in seismic design and analysis.

Keywords: Soil nailed walls, slope stability, dynamic analysis, finite difference method

ToCite: DIŞKAYA, B., GÖKGÖZ, A., & KELEŞOĞLU, M. K., (2025). DEPREM KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN ZEMİN ÇİVİLİ DUVARLARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ: 3 BOYUTLU SAYISAL ANALİZ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 763-784.

GİRİŞ

Zemin çivisi uygulaması ile şevlerde ve kazılarda duraylılığın artırılması, zemin ve kaya ortamlarda sıklıkla uygulanan bir destekleme yöntemidir. Bu tür dayanma yapılarının çalışma prensibi, duvarda bir deplasman mobilize olduğunda, zemin içine yerleştirilen çivi elemanın çekme yükleri altında çalışması ve zemin yüzeyine uygulanan kaplamanın da sınırlayıcı etkisiyle deplasmanların azaltılması olarak açıklanabilir. Çivi elemanlar sistemde deformasyon meydana gelene kadar aktif olmadığı için, zemin çivileri pasif destek elemanları olarak da bilinmektedir. Sistem deforme olmaya başladığında meydana gelen gerilmeler, zemin çivileri ile enjeksiyon harcı tarafından karşılanmaktadır (FHWA, 2015). Zemin çivili duvarların, esneklikleri sayesinde, özellikle deprem yükleri altında büyük deformasyonları karşıladıkları bilinmektedir. Barar vd. (1990), Loma Prieta (1989), Kobe (1995) ve Nisqually (2001) depremleri sonrasında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde bu tür duvarların deprem sırasında ve sonrasında olumlu bir davranış gösterdiğini belirtmiştir.

Zemin çivili şevlerin, dinamik koşullar altındaki davranışının incelenmesinde, en yaygın kullanılan yöntem, bir pseudo-statik analiz tekniği olan Mononobe-Okabe metodudur (FHWA, 2015). Bu yöntemde deprem nedeniyle oluşacak sarsıntı etkisi, depremin pik yer ivmesine bağlı olarak hesaplanan sismik katsayının (k_h), kayma düzlemi içinde kalan zeminin ağırlığı ile çarpımından elde edilen pseudo-statik kuvvetler ile temsil edilir. Bu yöntem limit denge prensibine dayandığı için sistemin genel stabilitesi ve iç stabilitesi hakkında fikir sahibi olmak mümkün olsa da zemin-çivi etkileşimi, çivi imalat yöntemleri, çivi kaplama bağlantısı, başlık plakalarının etkisi gibi durumların incelenmesi mümkün değildir (Panah ve Majidian, 2013). Ayrıca, bu yöntemde, depremin karakteristik davranışını temsil etmede faydalanılan tek parametre kuvvetli yer hareketinin pik ivmesidir. Depremin hasar potansiyelini öngörmeye pik ivme oldukça etkin bir parametre olsa da depreme ait diğer karakteristik özelliklerin bu tip yapıların davranışına etkisinin araştırılması gerekmektedir.

Depremler yer hareketinin genliği, frekans içeriği ve süresi gibi parametrelerle tanımlanmaktadır (Kramer, 1996). Kuvvetli yer hareketlerinin karakteristik özelliklerinin tamamını doğru bir şekilde tanımlayan tek bir parametrenin geliştirilmesinin mümkün olmadığı literatürde belirtilmiştir (Jennings, 1985; Joyner ve Boore, 1988; Kramer, 1996). Bu bağlamda, depremlerin yapılar üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi için birden fazla parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Bu yaklaşım, deprem mühendisliği ve yapıların sismik tasarımı açısından daha güvenilir ve etkili çözümlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Deprem hareketleri çoğunlukla, hareket esnasında zamana bağlı ölçülen ivme, hız ve yer değiştirme değerleri ile ifade edilir. Bir yer hareketinin genliğini ifade etmede en yaygın olarak kullanılan kriter depremin (mutlak) en büyük yatay yer ivmesidir (PHA). Kramer, (1996) pik ivmelerin yüksek frekanslarda meydana gelmesi, depremin süresinin kısa olması nedeniyle pik ivme değeri 0.5g'den büyük olan birçok depremin yapısal hasara sebebiyet vermeyecek nitelikte olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde nispeten daha küçük pik ivmeli fakat uzun süreli bir deprem hareketi daha yıkıcı bir hasar potansiyeli davranışı gösterebilir. Dolayısıyla, pik ivme yer hareketlerinin değerlendirilmesinde en çok kullanılan parametre olmasına rağmen, hareketin frekans içeriği ve süresi hakkında bilgi sunmaması nedeniyle, depremi karakterize etmek için ek bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır (Kramer, 1996). Bu nedenle, deprem davranışının doğru bir şekilde ifade edilmesi için birden çok özelliği yansıtan kuvvetli yer hareketi parametrelerinin de göz önüne alınması büyük önem taşımaktadır. Depremin Arias Şiddeti (I_a) ve Kümülatif Mutlak Hız (CAV) değerleri bu kapsamda değerlendirilen ve bu çalışmada zemin çivili duvarların sismik davranışına etkisi incelenen deprem parametreleridir. Arias Şiddeti, depremin hareketi boyunca enerji boşalımını temsil eder. Bu ifade, deprem hareketinin frekans içeriği ile sarsıntı süresini birlikte değerlendirmektedir (Arias, 1979). Bir diğer ifadeyle, Arias Şiddeti depremin ivme zaman geçmişinin tamamını, dolayısıyla pik ivme değerini ve frekans içeriğini, aynı zamanda deprem hareketi boyunca depremin yatay ve düşey bileşenlerini kapsamaktadır (Kayen ve Mitchell, 1997). Bu değer, toprak kaymalarını tetiklemek için gerekli olan deprem sarsıntısını tanımlamada güvenilir bir parametre olduğu kabul edilmektedir.

Literatürde, deprem karakteristiklerinin, takviye elemanlarla güçlendirilen dayanım duvarları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Liu vd. (2018) geosentetiklerle güçlendirilmiş bir duvar modeli üzerinde dinamik koşullar altında gerçekleştirdikleri sonlu elemanlar analizleri neticesinde, girdi hareketi parametrelerinin takviye yükleri ve kaplamada oluşan kalıcı deplasman üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yazarlar, dayanım yapısında meydana gelen maksimum takviye yükünün, yapının titreşim özellikleri ile girdi hareketinin yoğunluğundan etkilendiğini belirtmişlerdir. Maksimum takviye yükü ile Arias Şiddetinin iyi bir korelasyon gösterdiği, duvar yüzünde meydana gelen kalıcı deplasmanların, yapının ve girdi hareketinin frekans içeriğinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Fan vd. (2020), düşey yer ivmesinin, geosentetikler ile güçlendirilmiş duvarların sismik davranışındaki etkisini araştırmak amacıyla bir grup sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Yazarlar düşey yer

ivmesinin, kayma dalgası yayılımını etkilediğini, Arias Şiddeti değerinin bu tür yapılarda maksimum takviye yükü ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Başbuğ vd. (2021) geosentetiklerle güçlendirilen duvarlarda takviye elemanlarda meydana gelen deformasyonlarda, I_a ile doğrusal bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Zemin çivileri ile desteklenen duvarlarda ise deprem karakteristiklerinin etkilerini inceleyen sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Yazdandoust (2018), zemin çivileriyle desteklenen duvarların sismik performansını değerlendirmek için farklı çivi uzunluklarına sahip duvar modelleri üzerinde bir grup 1g sarsma tablası deneyi gerçekleştirmiştir. Çalışmada yazar, girdi hareket parametrelerinin (süre ve pik ivme) etkilerini araştırmak için, değişken genlikli harmonik bir uyarım kullanmıştır. Duvarların sismik deformasyon davranışının, çivi uzunluğu ve giriş hareketi parametrelerine yüksek derecede bağlı olduğu bulunmuştur. Mokhtari vd. (2020) yakın alan ve uzak alan fay hareketinin zemin çivileriyle desteklenen duvarlar üzerindeki davranışlarını gözlemlemek amacıyla aynı pik ivme değerine sahip 10 ayrı deprem hareketi altında gerçekleştirdikleri sayısal analizlerde, duvarda meydana gelen deformasyon davranışında pik yatay hızın önemli olduğunu belirtmişlerdir. Mesrabadi vd. (2023) yakın fay durumunda darbe içeren hareketlerde, zemin çivilerin eksenel kuvvetleri ve yer değiştirmeleri ile pik hız arasında iyi bir korelasyon olduğunu, darbe içermeyen hareketlerde ise çivilerde oluşan eksenel kuvvetlerin Arias Şiddeti ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Zemin çivili sistemlerin, hem statik hem de dinamik koşullar altındaki davranışının sayısal olarak modellenerek gözlemlenmesi gereklidir. Sayısal analizlerle, dinamik hareketler neticesinde, bir zemin çivili sistemi oluşturan her yapısal elemanın deformasyon davranışı, çivilerde meydana gelen çekme kuvvetleri, sistemde oluşan kalıcı deplasmanlar da tahmin edilebilir. Fakat zemin çivili duvarların, dinamik koşullar altındaki davranışının değerlendirilmesinde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı pseudo-statik limit denge analiz yöntemlerine dayanmaktadır ve gerçek zaman tanımlı sismik etkiler altında yapılmış sayısal çalışmalar oldukça kısıtlıdır (Sheikhabaei vd., 2010). Zemin çivili duvarların sismik davranışının sayısal davranışının değerlendirilmesinde Giri ve Sengupta (2009, 2010b, 2010a) 0.1g ivmeye sahip sinüs dalgası etkisi altında gerçekleştirdikleri küçük ölçekli sarsma tablası deneylerini bir sonlu farklar yöntemi kullanarak FLAC yazılımında iki boyutlu olarak modellemişlerdir. Şevin taş bölgesinde meydana gelen deplasman ile duvar arkasında oluşan oturmanın deneysel çalışma ve sayısal analizlerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Panah ve Majidian (2013) akademik bir sonlu farklar yazılımı olan CA2 kullanarak zemin çivili duvarların dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada, zemin çivili sistemlerin sismik koşullar altında yenilme mekanizmasını gözlemleyebilmek adına pseudo-statik analizler ile zamana bağlı dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, gözlemledikleri kayma düzlemlerinde; alt çivilerin sistemde ankraj olarak görevi yaptığını, en alt çivilerin boyundaki artışın, zemin çivili yapıların sismik stabilitesini artırmada en etkili yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Sheikhabaei vd. (2010) zemin çivileri ile desteklenen bir duvarın, dinamik koşullar altında davranışını araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla yazarlar, sonlu farklar yazılımı olan FLAC3D kullanarak üç boyutlu bir model geliştirmişler ve sisteme yarı sismik harmonik bir hareket uygulayarak girdi hareketinin frekansı, çivi eğimi ve uzunluğunun değişimi, zemin dayanım kriterleri gibi parametrik özelliklerin etkilerini incelemişlerdir. Halabian vd. (2010) oluşturdukları üç boyutlu şev modelini üç farklı depreme ait ivme-zaman kaydı altında, yüklemenin frekans içeriği, zeminin dayanım özellikleri gibi kriterleri göz önüne alarak incelemişlerdir. Zamiran vd. (2012) gerçek deprem ivme-zaman girdisi ile zemin çivili bir duvar modeli için FLAC3D programında sayısal simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonuçlarını statik analiz bulguları ile kıyaslamışlardır. Sahoo vd. (2015) zemin çivili dik şevlerin sismik koşullar altındaki davranışını gözlemlemek için bir sonlu elemanlar yazılımı olan MIDAS GTS kullanarak, üç boyutlu modeller geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, zaman tanımlı dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Çivi eğimi, çivi uzunluğu, frekans, amplifikasyon faktörü ve şev açıları gibi çeşitli parametrelerin, zemin çivili duvarların sismik dayanıklılığı ve yenilme mekanizması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Maleki vd. (2023) bir sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS'te gerçekleştirdikleri sayısal analizlerinde, çivilerin mekanik ve geometrik özelliklerinin, iki boyutlu zemin çivili bir duvarın hem gevşek hem de sıkı zemin koşullarında dinamik davranışı ve amplifikasyon özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Bu makalede, deprem girdi hareketlerine ait farklı özelliklerin zemin çivili şevlerin sismik davranışına etkisi araştırılmaktadır. Gerçekçi bir zemin çivili şev modeli oluşturabilmek için üç boyutlu bir sonlu farklar modeli hazırlanarak zemin özelliklerinin ve yapısal elemanların (plaka, çivi ve kaplama) birbirleri ile etkileşimleri modellenmiştir. Bu amaçla, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri ile incelenen küçük ölçekli iki farklı deney verisinden faydalanılmıştır. Sonlu farklar yaklaşımından faydalanılarak doğrulama analizleri yapılan modellerden gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ardından ivme, hız, frekans içeriği, Arias Şiddeti, CAV ve süre gibi farklı karakteristik özelliklere sahip 10 deprem hareketi altında tipik bir çivili duvar davranışının incelenmesi aşamasında geçilmiştir. 12 metre yüksekliğinde ve 60° şev eğimine sahip referans bir model hazırlanarak analizler yürütülmüştür. Analizler sonucunda özellikle pik ivme, Arias Şiddeti ve CAV değerlerinin dayanma yapısı deplasmanları üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Deprem hareketleri içinde pik ivme değeri 0.43g'den, CAV değeri

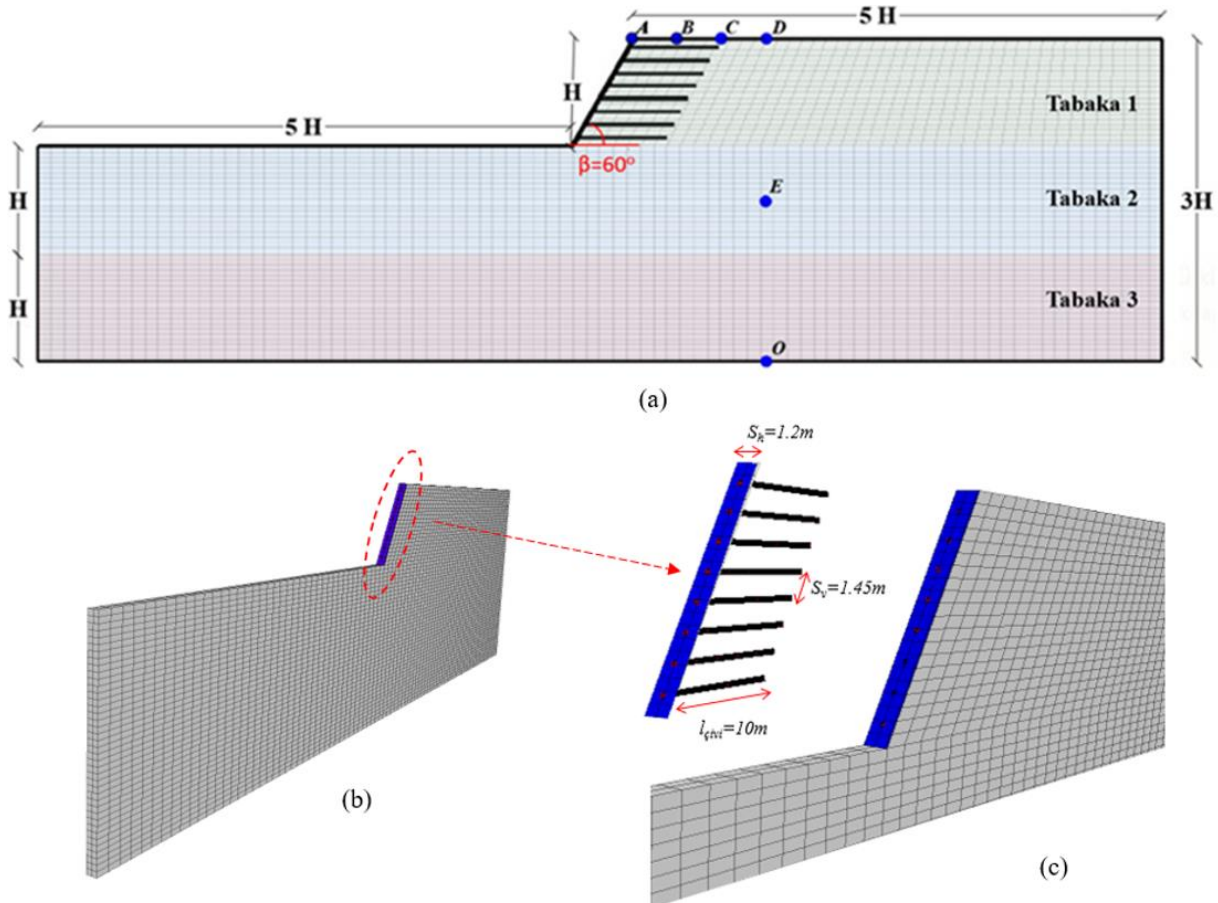
yaklaşık 1300 cm/s'den ve I_a değeri 2.70 m/s'den küçük depremlerde kaplama yüzünde duvar yüksekliğinin %5-9'u arasında deplasman meydana geldiği ve kaplamada oluşan maksimum deplasmanın pik ivmeyle birlikte arttığı görülmüştür. Pik ivme değerinin 0.43g'den büyük olduğu depremlerde ise deplasmanların yaklaşık 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 0.43g'den daha düşük pik ivme değerine sahip ancak yüksek CAV ve I_a değerleri olan deprem hareketinde ise oldukça yüksek, duvarı yüksekliğinin %20'si mertebesinde deplasman tespit edilmiştir. Buradan, pik ivme değerinin deformasyon davranışını değerlendirmede yeterli bir gösterge olmadığı anlaşılmaktadır. Günümüz literatüründe sıklıkla kullanılan yönetmeliklerde, deprem karakteristiğinin etkisini dikkate alan bir yöntem bulunmadığı ve tüm dinamik tasarımın maksimum ivme değerinin bir oranı olarak alındığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçların literatüre ve tasarıma önemli katkıları olacağı sonucu çıkarılmaktadır.

SAYISAL MODEL VE DOĞRULAMA ANALİZLERİ

3 Boyutlu Zemin Çivili Şev Modeli

Bu çalışmada, deprem hareketlerinin karakteristik özelliklerinin, zemin çivili duvarların sismik davranışına etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla bir sonlu farklar yazılımı olan FLAC3D.v6 (Itasca, 2019) programında, zemin çivili duvarın dinamik koşullar altındaki davranışını analiz etmek üzere üç boyutlu sayısal bir model oluşturulmuştur.

Dinamik analizler için oluşturulan referans sayısal model, 60° eğime sahip 12 m yüksekliğinde bir zemin çivili şevdir. Model, her biri 10 m uzunluğunda olan sekiz adet zemin çivisiyle güçlendirilmiştir. Sonlu fark ağ yapısı, zemin ortamını temsil eden sürekli elemanlardan oluşmaktadır. Modeldeki her bölge (zone) tetrahedral elemanlara ayrılmıştır. Verimli CPU kullanımı ve tekrarlanabilir bir sayısal model sağlamak amacıyla, bu çalışmada, zemin çivili duvar sisteminin ortasında bulunan iki düşey düzlem arasındaki zemin kütesinin bir diliminin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için geliştirilen üç boyutlu sonlu farklar modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Daha gerçekçi dalga yayılımı elde edilebilmesi amacıyla, model sınırları, sismik dalgaların modelin içinde yayıldıktan sonra geri dönmesini önleyecek şekilde yeterince büyük tanımlanmıştır. Şev yüzeyinin tabanından başlayarak, sayısal modelin yatay sınırları her yönde şev yüksekliğinin (H) 5.0 katı olacak şekilde uzatılmıştır.



Şekil 1. (a) Model Geometrisi (b-c) Üç Boyutlu Sonlu Farklar Ağı, Çivi ve Başlık Plakası Detayı

Sayısal model, her biri 12 m derinliğinde bağıl yoğunluğu ve kayma dalgası hızı model tabanından yüzeye doğru azalan üç ayrı kum tabakasından oluşmaktadır. Böylelikle, modelde, zemin bağıl yoğunluğunun artışına bağlı olarak zemin parametrelerinin değişimi göz önüne alınmıştır. Statik yükleme koşulları altında zemin davranışını tanımlayabilmek için bu tür yapıların sayısal analizlerinde literatürde sıklıkla tercih edilen elastik-tam plastik Mohr-Coulomb bünye modeli kullanılmıştır (Giri ve Sengupta, 2009; Halabian vd., 2012; Sahoo vd., 2016; Zamiran vd., 2012). Tablo 1’de zemin tabakalarının mekanik ve fiziksel özellikleri listelenmiştir.

Tablo 1. Şev Modeline Ait Zemin Özellikleri

	Tabaka 1	Tabaka 2	Tabaka 3
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m ³)	16	17	18
Young Modülü, E (MPa)	95	150	230
Kohezyon, c (Pa)	5000	5000	5000
Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ (°)	36	38	40
Bağıl Yoğunluk, D_r (%)	0.60	0.75	0.80
Kayma Dalgası Hızı, V_s (m/s)	280	345	390

Sismik koşullar altında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, modelleme koşullarının bir sonucu olarak yayılan dalga hareketinde sayısal bozulmalar meydana gelebilir. Giriş hareketinin frekans içeriği ve sistemin dalga hızı özellikleri, dalganın model içinde yayılımını etkileyebilir. Sayısal modelde, dalga yayılımının doğru bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu farklar ağının sıklığı büyük önem taşımaktadır. Dalganın zemin ortamında düzgün bir şekilde iletilmesini sağlamak amacıyla, bu ağın yeterince sıkı olması gerekmektedir. Bu durum aynı zamanda, modelin doğruluğunu artırarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Kuhlemeyer ve Lysmer (1973), bu koşulun yalnızca, dalga yayılım yönündeki minimum birim eleman boyutunun dalga boyunun 1/10 ile 1/8’i arasında veya daha az olduğu durumlarda sağlandığını belirtmişlerdir. Bu nedenle birim eleman boyutu, Denklem 2.1’e dayanarak, en uzun dalga boyunun onda birinden daha az olacak şekilde 1.20 m x 0.60 m x 0.60 m olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} \quad (2.1)$$

Burada, λ , dalga boyu olmak üzere, kayma dalgası hızı (v_s) ve deprem kaydının en yüksek frekans içeriğine ($f_{\max}$) bağlı olarak Denklem 2.2’ye göre hesaplanabilir.

$$\lambda = \frac{v_s}{f_{\max}} \quad (2.2)$$

FLAC3D’de gerçekleştirilen dinamik analizlerde, zemin modeli olarak Mohr-Coulomb bünye modeli tercih edilmiş olup bu model Histeretik sönüm yaklaşımı ile birleştirilmiştir. Dinamik yükler altındaki zeminlerin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı genellikle kayma modülü bozulma eğrileri ($G/G_{\max}$) ile karakterize edilir. Bu yaklaşım, kayma gerilmesi modülünün azaltma eğrilerine dayanarak, akma gerilmesine kadar, doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini modellemeyi mümkün kılar. Bu nedenle, zemin tabakalarının maksimum kayma modülü değerleri ($G_{\max}$), Seed ve Idriss (1970), tarafından sağlanan Denklem 2.3’te verilmiş denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$G_{\max} = 21.7(K_2)_{\max} p_a \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{0.5} \quad (2.3)$$

Eşitlikteki $(K_2)_{\max}$ değeri, kumun bağıl yoğunluğuna göre belirlenen bir modül değeridir (Seed ve Idriss, 1970); burada p_a atmosferik basıncı ve σ'_m ise ortama efektif gerilmeyi temsil etmektedir. Bulk modülü (K) ve Young Modülü (E), elastik teoriye dayanarak, Kayma Modülü (G) ve Poisson oranı (ν) kullanarak hesaplanmıştır. Poisson oranının tüm zemin tabakaları için 0.30 olduğu kabul edilmiştir.

FLAC3D, modül ve sönüm azalım eğrilerini asimptotik fonksiyonlarla birleştirerek tüm deformasyon seviyelerinde rijitlik ve sönüm değerlerini hesaplar ve böylece sonlu fark ağındaki elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tanımlar. Bu çalışmada, FLAC3D’de mevcut olan Sigmoidal-3 modeli seçilmiştir. Sigmoidal-3 modele ait fonksiyon, Denklem 2.4’te verilmiştir.

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{L - x_0}{b}\right)} \quad (2.4)$$

Burada, M_s , normalize edilmiş sekant kayma modülüdür ve L , logaritmik gerinim değeridir. Sigmoidal-3 fonksiyonun parametreleri, Darendeli (2001) modül azaltma ve sönüm oranı eğrilerine göre değerlendirilmiştir. Darendeli (2001) için kumlu zeminlerin eğrileri için Sigmoidal-3 fonksiyonunun katsayıları Tablo 2’de verilmiştir; burada α , b ve x_0 fonksiyonun parametreleridir (Alver, 2023). Deprem yüklemesi sırasında yüksek frekanslı gürültüleri azaltmak için modele çok düşük bir Rayleigh sönümü (%0.20) uygulanmıştır.

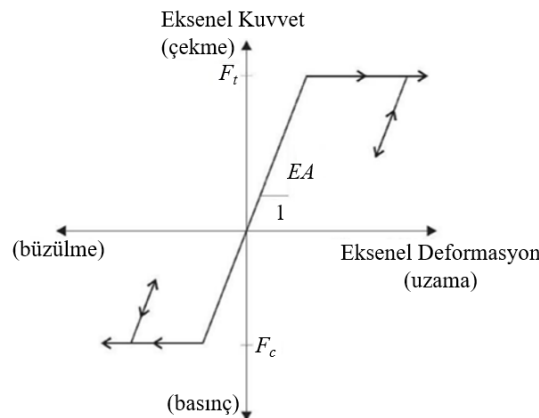
Tablo 2. Darendeli (2001) Eğrileri İçin Kumlar Üzerindeki Sigmoidal-3 Fonksiyonun Katsayıları (Alver, 2023)

L	α	b	x_0
$\text{Log}(\gamma)$	1	-0.4726	$-1.45 + 0.15 \ln\left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)$

Hazırlanan zemin çivili duvar modeli, limit denge yaklaşımıyla (LEM) hem statik hem de dinamik olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çivi aralıklarının $S_v=S_h= 2.0$ m olarak belirlendiği durumda, en yüksek sismik katsayı ile tarif edilen deprem koşulu için statik ve dinamik güvenlik sayısı değerleri sırasıyla 1.7 ve 1.2 olarak hesaplanmıştır. Deprem koşullarında güvenli kabul edilen çivi aralıkları için gerçekleştirilen FLAC3D analizlerinde, dinamik durumlardaki göçmeler sebebiyle LEM ile sağlanan çivi aralıkları için sayısal analiz yapılamamıştır. Bu nedenle, çivi aralıkları kademeli olarak azaltılmıştır. Sonuç olarak, mevcut model, FLAC3D sonlu farklar yöntemiyle gerçekleştirilen zaman tanım alanı analizleri doğrultusunda, en uygun deplasman sonuçlarının elde edildiği geometri üzerinden devam ettirilmiştir. Şev modeli, düşeyde $S_v=1.45$ m ve yatayda $S_h=1.20$ m aralıklarla yerleştirilmiş sekiz adet, on metre uzunluğunda zemin çivisi içermektedir. İlk çivi, model yüzeyinden 1.0 m aşağıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Son çivi ise şev topuğundan 1.0 m yukarıdadır. Zemin çivileri oldukça narin elemanlar olduğu için eğilmeye karşı çok az direnç sağlar (FHWA, 2015; Jones, 1999; Zamiran vd., 2012b). Bu sebeple, zemin çivilerinin bir boyutlu aksenal çekme kuvveti altında çalıştığı varsayılır ve zemin çivileri modellenirken bir boyutlu kablo elemanlarından faydalanılır. Kablolar hem çekme hem de basınç altında elastik-mükemmel plastik davranış sergileyen yapısal elemanlardır. FLAC3D’de zemin çivilerini tanımlarken kablounun aksenal davranışını, enjeksiyon halkasının kayma özelliklerini ve harcın arayüz performansını dikkate almak önemlidir.

Bir kablo elemanın aksenal rijitliği, çivi elemanlarının çivi çubuğu kesit alanı A , Young Modülü E ve çivi uzunluğu $L_{çivi}$ ’ye dayanan bir boyutlu yapısal eleman modeline dayandığını varsayarak, Denklem 2.5 ile ifade edilebilir. Ayrıca, kablo elemanlarının elastik-mükemmel plastik bir malzeme olarak tanımlanabilmesi için, bu limitlerin üzerinde gelişmeyecek şekilde bir çekme ve basınç dayanımı atanabilir; bu durum Şekil 2’de gösterilmiştir (Itasca, 2019).

$$K = \frac{AE}{L_{çivi}} \quad (2.5)$$



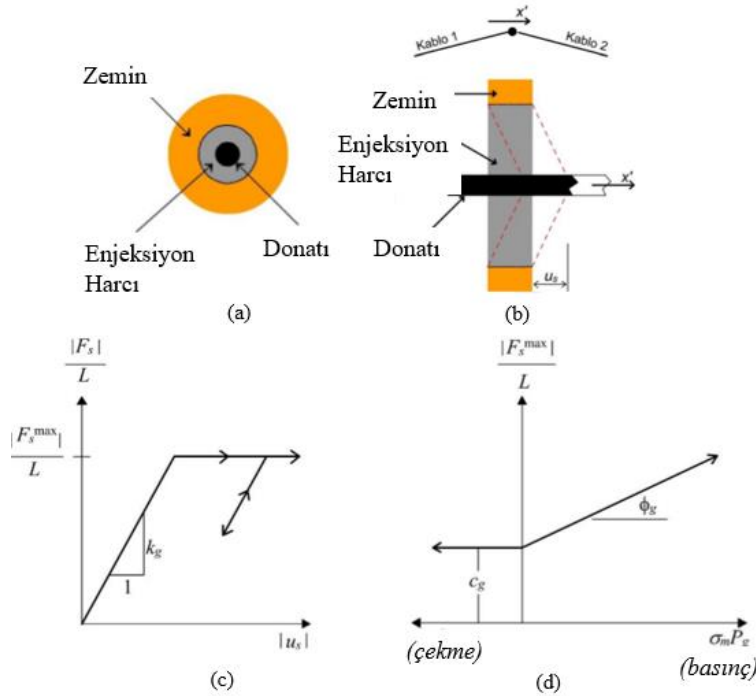
Şekil 2. Kablo Yapısal Elemanın Çekme Basınç Yükleri Altında Malzeme Davranışı (Itasca, 2019)

Zemin çivileri ve zemin arasındaki halka biçimde bulunan boşluk genellikle çimento harcı ile doldurulur; böylelikle zemin kütleğinde oluşan gerilmeler bu arayüz ile zemin çivilerine aktarılır. Zemin-çivi arayüzünün kayma davranışı sürtünmeli ve kohezif olarak kabul edilmektedir. Şekil 3 (a), (b)'de bir çiviye ait tipik enjeksiyon harcı ve kablo etkileşimi verilmiştir (Itasca, 2019). Sonlu farklar simülasyonunda enjeksiyon davranışını modellemek için kablo elemanına atanan düğüm noktalarında kayıcı bir yay sistemi olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, yay elemanları, enjeksiyonun kayma davranışını temsil ederken; kayıcı elemanlar zemin ile çivi arasındaki kohezif davranıştan sorumludur. Enjeksiyon bölgesinin kayma davranışını FLAC3D'de modellemek için gerekli parametreler (Şekil 3 (c), (d)) kayma rijitliği k_g , enjeksiyon kohezif dayanımı c_g , enjeksiyon sürtünme açısı ϕ_g , enjeksiyon çevresi p_g ve efektif çevre gerilmesi σ_m 'dir (Gokgoz ve Kelesoglu, 2024; Itasca, 2019).

Kesme bölgesinin, yani enjeksiyon harcının, rijitliği, k_g , Denklem 2.6 ile hesaplanabilir. Denklemde G , enjeksiyon harcının kayma modülü olup zemin kayma modülüne eşit olduğu varsayılmaktadır (Zamiran vd., 2012); D , takviye eleman çapı ve t kesme bölgesi halkası kalınlığıdır. Kesme bölgesi kohezyon dayanımını birim uzunluk başına tahmin edebilmek için Denklem 2.7 kullanılabilir. Burada c , zeminin kohezyon değeridir ve kesme bölgesi kayma mukavemeti açısının, zeminin kaymam mukavemeti açısına benzer olduğu kabul edilmektedir (Zamiran vd., 2012). Çivilerin çapı 32 mm olarak belirlenmiş olup, zemin çivilerini sayısal modelde tanımlamak için gerekli olan tüm parametreler Şekil 4'te verilmiştir.

$$k_g = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + 2t / D)} \quad (2.6)$$

$$c_g = \pi c(D + 2t) \quad (2.7)$$

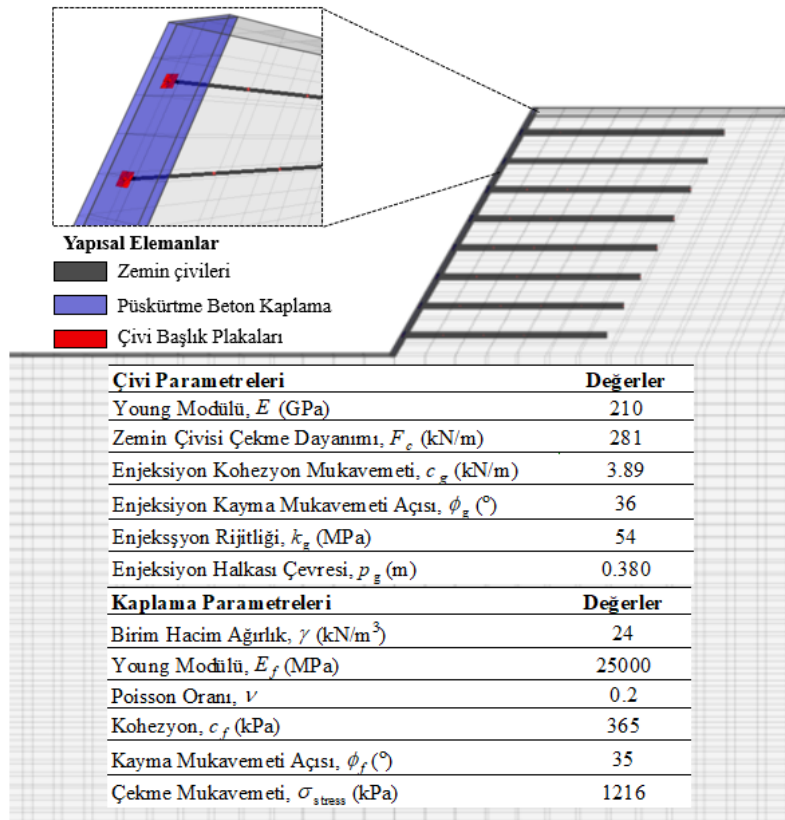


Şekil 3. (a-b) İdealize Edilmiş Kablo-Enjeksiyon Etkileşimi, (c-d) Harcın Mekanik Davranışı (Itasca, 2019)

Püskürtme beton kaplama, zemin çivili duvar modeli için gerekli yapısal bir unsurdur. Zemin çivili sistemlerde, tendonlar eğimli şev yüzeyine ya da kazı yüzündeki bir kaplama elemanına bağlanır. Kaplama, kazı ve montaj esnasında çiviler arasındaki zemini desteklemek ve kazı yüzeyinde erozyonu önlemek için hizmet eder (FHWA, 2015). Kaplama elemanlar genellikle, eğilme ve eksenel rijitlik ile karakterize edilen püskürtme beton veya yerinde güçlendirilmiş beton ile imal edilir. Bu nedenle sayısal analizlerde kaplama elemanlar çoğunlukla kabuk (*shell*) veya plaka (*plate*) elemanı olarak modellenir. Ancak, Ardiaca (2009), plaka elemanlarının kullanımının mümkün olmadığı karmaşık yapılarda, Mohr-Coulomb malzeme modelinin ve hacimsel elemanların ince duvarlar, plakalar veya kabuk elemanlar için gerçekçi sonuç verdiğini belirtmiştir. Gokgoz ve Kelesoglu (2024) ve Gökğöz (2021)'de FLAC3D'de zemin çivileri ile desteklenen duvarlar için gerçekleştirmiş oldukları analizlerde püskürtme beton kaplamasını hacimsel bir eleman olarak ve Mohr-Coulomb parametreleri ile tanımlamışlar ve bu tür bir modellemenin gerçek ile

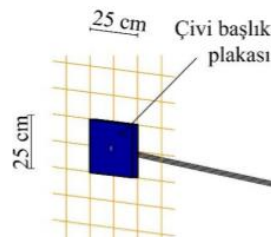
uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da püskürtme beton kaplaması hacimsel bir eleman olarak tanımlanmıştır. Kaplama elemana ait parametreler Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca, püskürtme beton kaplama ile zemin arasındaki etkileşimi modelleyebilmek için zeminin kayma mukavemeti açısına dayalı bir arayüz elemanı tanımlanmıştır. Arayüzdeki sürtünme açısı $2/3\phi$ olarak belirlenmiştir (Lin vd., 2017; Marzionna vd., 1998); burada ϕ , zeminin kayma mukavemeti açısıdır. Zemin ile kaplama arasındaki arayüz özellikleri, Kesme Rijitliği Modülü (K_s) ve Normal Rijitlik Modülü (K_n) hesaplanarak uygulanmış ve rijitlik değerleri Itasca, (2019)'da bulunan Denklem 2.8'e göre hesaplanmıştır. Burada K ve G zeminin Bulk ve Kayma modülüdür ve Δz_{min} , arayüz elemanının normal yönündeki bitişik bir elemanın en küçük birim genişliğidir.

$$K_n = K_s = 10 \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right] \quad (2.8)$$



Şekil 4. Şevin, Kaplamanın ve Çivilerin Üç Boyutlu Görünümü ve Malzeme Özellikleri

Çivi çubukları, çivi ucuna gelen kuvveti kaplama yüzeyine ve ardından arkasındaki zemine ileten başlık plakaları ile kaplama yüzeyine bağlanır. Bu çalışmada çivi başlık plakaları, FLAC3D ağ yüzeyine bağlı ızgara ile plaka arasındaki sürtünme etkileşimini dikkate alan plaka (*plate*) elemanlar olarak modellenmiştir. Modelde, başlık plakaları, 25 cm genişliğinde ve 2.0 cm kalınlığında kare plakalar olarak modellenmiştir (Şekil 5). Başlık plakalarının malzeme özellikleri şu şekildedir: Young Modülü, $E_p = 15$ GPa; Poisson Oranı, $\nu = 0.2$ ve birim hacim ağırlık, $\gamma = 23.0$ kN/m³.



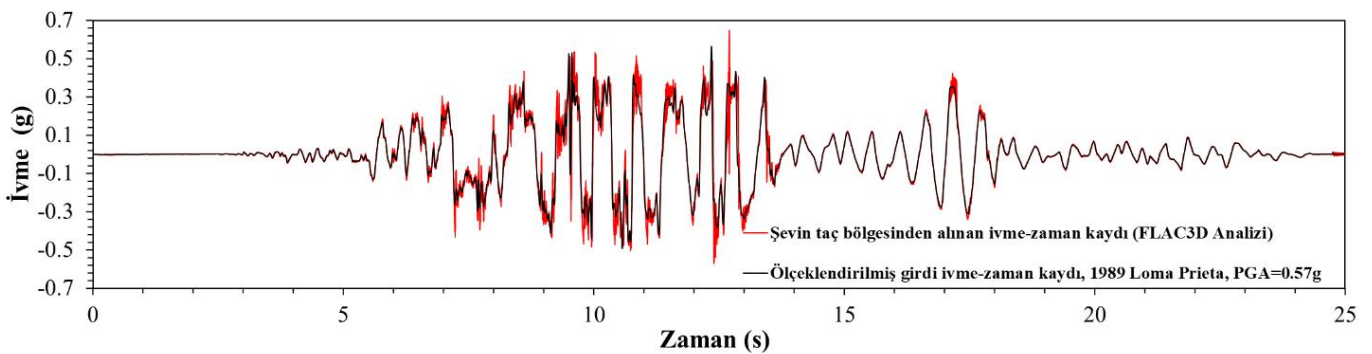
Şekil 5. 25x25 cm Kare Plaka ile Çivi-Şev Bağlantısı Görseli (Gokgoz ve Kelesoglu, 2024)

DOĞRULAMA ANALİZLERİ

Bu çalışmada, farklı karakteristik özelliklere sahip deprem hareketlerinin zemin çivileri ile güçlendirilmiş bir şev üzerindeki etkisini araştırmak için FLAC3D sonlu farklar yazılımı kullanılarak üç boyutlu sayısal bir model oluşturulmuştur. Dinamik analizler için geliştirilen sayısal modelin doğruluğu ve uygulanabilirliğini kanıtlamak amacıyla, farklı deneysel çalışmalara dayanan iki ayrı sayısal doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Sahoo vd. (2021, 2016) tarafından zemin çivili dolgu modelleri üzerinde gerçekleştirilen sarsma tablası deneyleri modellenmiştir. Ardından, Ghadamgahi vd. (2019) ve Baziar vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen santrifüj deneyleri modellenmiştir. Her iki doğrulama analizi neticesinde, bu çalışma kapsamında geliştirilen sayısal modelin dinamik analizler için uygun olduğu kararlaştırılmıştır.

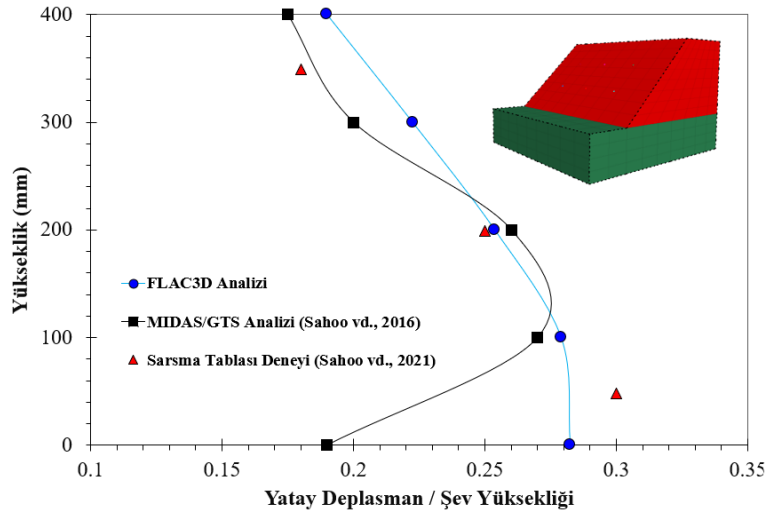
Bir Boyutlu Sarsma Tablası Deneyinin Sonlu Farklar Yöntemiyle Modellenmesi

Çalışmanın bu aşamasında, Sahoo vd. (2021, 2016) tarafından zemin çivili bir duvar modeli için gerçekleştirilen sarsma tablası deneyleri FLAC3D’de modellenmiştir. Sonlu farklar analizinden elde edilen sonuçlar, hem sarsma tablası deney sonuçları ile hem de aynı zemin çivili duvar modeli üzerinde Sahoo vd. (2016)’nin bir sonlu elemanlar yazılımı olan MIDAS/GTS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Model, 45° eğim açısına sahip 0.40 m yüksekliğinde bir şevdir ve yatayla 0° açı yapan 0.30 m uzunluğunda zemin çivileriyle güçlendirilmiştir. Her bir çivi arasındaki yatay mesafe 225 mm ve düşey mesafe 130 mm’dir. Sonlu farklar modelinde, zemin Yamuna kumu olarak modellenmiş zemine ait özellikler Sahoo vd. (2021, 2016)’de verildiği şekilde tanımlanmıştır. Zeminin yapısal modeli tanımlanırken, Sahoo vd. (2016) tarafından aynı şev modeli üzerinde gerçekleştirilen sonlu elemanlar modelinde olduğu gibi Mohr-Coulomb bünye modeli tercih edilmiştir. Çiviler, bir boyutlu kablo (*cable*) yapısal elemanlar olarak modellenmiş ve kaplama yüzeyi kabuk (*shell*) yapısal elemanı olarak tanımlanmıştır. Çivilerin ve alüminyum kaplama plakasının boyutları ve mekanik özellikleri Sahoo vd. (2021, 2016)’de belirtildiği gibi uygulanmıştır. Bu noktada, FLAC3D’de sadece şevin ve yapısal elemanların modellendiğini belirtmek gerekmektedir; sarsma tablası sistemi ve konteyner modellenmemiştir. Şev modelinin öncelikle statik koşullar altındaki denge durumu sağlandıktan sonra, dinamik koşullar altında analizi gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde uygulanan deprem hareketi Los Gatos istasyonundan alınan N00E bileşenli pık yer ivmesi PGA=0.57g olan 1989 Loma Prieta depremidir (Sahoo vd., 2016, 2021). Depremin ivme-zaman kaydı, sarsma tablası deneyi için yazarlar tarafından belirtildiği gibi filtrelenmiş ve ölçeklendirilmiştir. Girdi hareketinin ivme-zaman kaydı Şekil 6’da verilmiştir. Dinamik koşullar altındaki doğrusal olmayan zemin davranışı, FLAC3D’de mevcut olan Sigmoidal-3 histeretik sönüm modeli ile tanımlanmıştır (Itasca, 2019). Ayrıca, deprem yüklemesi sırasında yüksek frekans gürültülerini azaltmak için modele çok düşük bir miktar Rayleigh sönümü (%0.20) uygulanmıştır. Sismik analizde, modelin sınır koşulları anti-simetrik sınır koşulları olarak seçilmiştir (Halabian vd., 2010; Sheikhabaei vd., 2010). Model tabanı yatay yönde serbest bırakılırken, dalgaların uzak alana yayılmasını sağlamak için modelin sağ ve sol taraflarına serbest alan sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 6. Deprem Girdi İvme Zaman Kaydı ve Şevin Taç Bölgesi Yakından Alınan İvme Zaman Kaydı

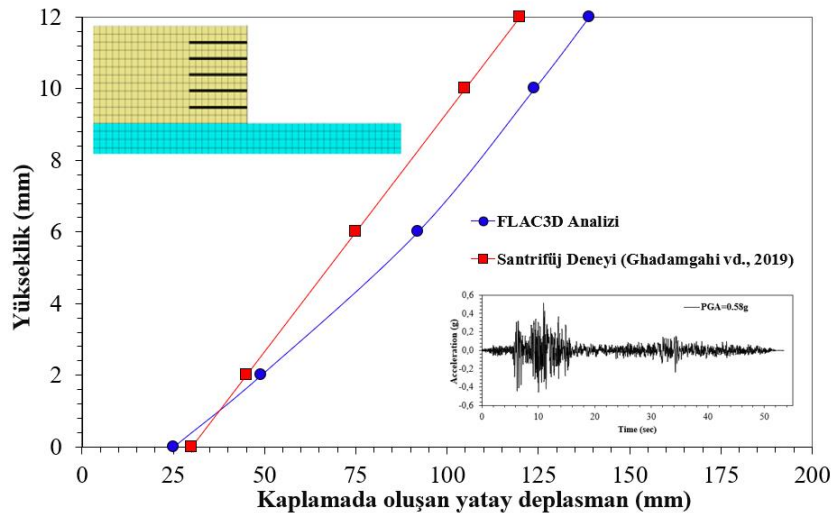
Şekil 7’de sarsma tablası deneylerinden (Sahoo vd., 2021) ve sonlu elemanlar analizlerinden (Sahoo vd., 2016) elde edilen yatay deplasman değerleri, bu çalışmada gerçekleştirilen sonlu farklar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekilde yatay deplasman değerlerinin üç çalışma için de tutarlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, yazarlar sarsma tablası deneyleri sonucunda şev tepesinde amplifikasyon faktörünü 1.110 olarak hesapladıklarını belirtmiş ve bu sonucun sonlu elemanlar analizleri ile tutarlı olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılan analizde, şevin tepe noktasındaki amplifikasyon faktörü 1.10 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Bu tutarlılık, doğrulama analizinde kullanılan sayısal modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Dinamik Analiz Sonucunda Kaplamada Oluşan Yatay Deplasman

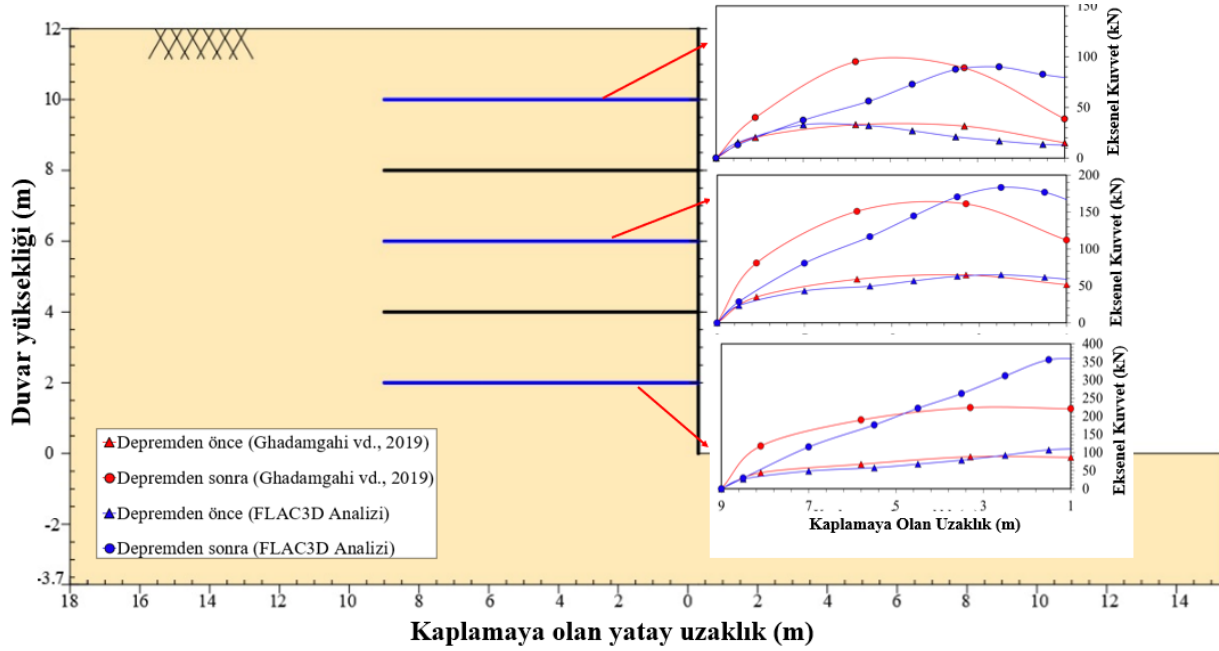
Santrifüj Deneyinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Modellenmesi

Santrifüj deneyi yöntemleri, gerçekçi gerilme seviyeleri altında daha küçük ölçekli modelleri detaylı bir şekilde inceleme fırsatı sunar. Bu nedenle, bu çalışmada geliştirilen sayısal modelin dinamik analizdeki kullanılabilirliğini doğrulamak için Ghadamgahi vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen santrifüj deneyleri modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yazarlar, 12 m yüksekliğindeki bir prototip duvarı temsil eden bir model duvar üzerinde 2.0 m yatay ve düşey aralıklı, 9 m uzunluğunda 5 sıra çivi ile santrifüj deneyleri gerçekleştirmiştir (Baziar vd., 2021; Ghadamgahi vd., 2019). Model zemini kum olup zemin ve yapısal elemanların tüm mühendislik ve malzeme özellikleri, prototip model için yazarlar tarafından belirtildiği gibi tanımlanmıştır. Zemin bünye modeli sarsma tablası deneyleri için gerçekleştirilen doğrulama analizinde olduğu gibi Mohr-Coulomb olarak tanımlanmıştır. Çivi yapısal elemanları, bir boyutlu kablo yapısal elemanları olarak seçilmiştir. Püskürtme beton kaplama, kabuk yapısal elemanı olarak oluşturulmuştur. 3D modellemede, yalnızca şev ve yapısal elemanların tanımlandığı, santrifüj test sistemi ve test ekipmanlarının modellenmediği önemle belirtilmelidir. Deprem hareketi (Şekil 8) olarak 1990 Rudbar-Manjil yer hareketi seçilmiştir; bu hareket Ab-bar istasyonunda 0.58g'lık bir pik yer ivmesi kaydetmiştir. Deprem ivme-zaman geçmişi 0.8-8 Hz aralığında bant geçişli filtrelenmiştir; bu, prototip ölçeği için verilen frekans aralığıdır. Statik denge sağlandıktan sonra, dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama analizinde de sarsma tablası deneyi için gerçekleştirilen dinamik analizlerde modele uygulanan sınır koşulları uygulanmıştır. Dinamik koşullar altında doğrusal olmayan histeretik zemin modeli, Itasca'da (2019) mevcut olan Sigmoidal-3 sönüm modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Bu analizde de yüksek frekanslı gürültüleri azaltmak için çok düşük bir miktarda Rayleigh sönümü (%0.2) uygulanmıştır. Santrifüj deneyinin ve sayısal analizin sonuçları olarak kaplamada ölçülen yatay deplasman değerleri Şekil 8'de sunulmuştur. Doğrulama analizinden elde edilen yatay hareket değerlerinin deneysel sonuçlarla oldukça tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Girdi Hareketi İvme Zaman Kaydı ve Kaplamada Oluşan Yatay Deplasman

Şekil 9'da, ise çivilerde depremden önce ve sonra ölçülen eksenel kuvvet değerleri sunulmaktadır. Her iki durumda da çivilerde gelişen eksenel kuvvetlerin santrifüj testinin sonuçlarıyla tutarlı olduğu açıktır.



Şekil 9. Statik ve Sismik Yükleme Sonunda Eksenel Kuvvet Dağılımın Kıyaslanması

ZEMİN ÇİVİLİ DUVARLARIN ÜÇ BOYUTLU SİSMİK ANALİZİ

Zemin çivili duvarların sismik tasarımında, deprem hareketinin davranışını temsil etmede göz önünde bulundurulacak tek deprem karakteristiği depremin pik yer ivmesidir. Oysaki deprem hareketinin diğer karakteristik özelliklerinin zemin çivili duvarların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemek, bu tür yapıların sismik tasarımı için oldukça gereklidir. Bu nedenle, aynı şev modeli için farklı özelliklere sahip on deprem kaydı altında bir dizi sismik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu özellikler arasında kuvvetli yer hareketinin pik yer ivmesi (PGA), Kümülatif Mutlak Hız değeri (CAV), Arias Şiddeti (I_a), depremin 5-95 saniye arasındaki önemli süresi (D_{5-95}) ve istasyon kayma dalgası hızı bulunmaktadır.

Tablo 3. Analizlerde Uygulanan Deprem Hareketlerinin Karakteristik Özellikleri

No	RSN	İsim	D_{5-95} (s)	I_a (m/s)	V_s (m/s)	M_w	PGA (g)	PGV (cm/s)	CAV (cm/s)	Süre (s)
1	4097	Parkfield	6.40	1.48	648.09	6.00	0.35	53.17	704.12	21.19
2	71	San Fernando	12.00	0.90	602.10	6.60	0.38	16.37	697.80	36.67
3	4843	Chuetsu-oki	19.90	0.71	640.14	6.80	0.19	11.46	845.60	59.99
4	1787	Hector-Mine	11.70	0.83	726.00	7.10	0.27	26.01	796.21	45.30
5	1012	Northridge	8.00	1.07	706.22	6.70	0.38	37.94	779.55	60.01
6	231	Mammoth Lake	10.90	1.33	537.16	6.10	0.43	23.74	907.87	29.99
7	164	Imperial Valley	36.40	1.33	471.53	6.50	0.15	19.28	1589.70	63.81
8	810	Loma Prieta	9.70	2.70	713.59	6.90	0.46	22.75	1314.91	39.99
9	1111	Kobe	11.20	3.35	609.00	6.90	0.48	46.82	1432.84	40.95
10	1512	Chi-Chi	26.10	3.66	443.04	7.60	0.31	39.09	2369.12	90.00

FLAC yazılımında dinamik analizler gerçekleştirilirken dinamik yüklerin belirlenmesi, sınır koşulları, mekanik sönümler ve model üzerinde deprem dalgası iletiminin tanımlanması gerekir (Zhang vd., 2012). Model sınır koşullarının gerçeğe en uygun saha koşullarını yansıtmaları, hem statik koşullar hem de dinamik koşullar için gereklidir. Özellikle dinamik koşullarda, sınır koşulları doğru tanımlanmadığı takdirde, deprem dalgaları model içine geri yansıyarak model tepkisinde hatalara sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada, modelin öncelikle kendi ağırlığı etkisi altında statik denge koşulunu sağlaması amaçlanmıştır. Statik yükleme altında gerçekleştirilen analizlerde, model yan sınırlarının normali doğrultusunda hareket sınırlanırken, düşey doğrultuda hareketine izin verilmiştir. Modelin taban sınırı yatay ve düşeyde sabittir. Dinamik yükleme durumunda bu tür sınır koşulları dışa doğru yayılan

dalgaların modele geri yansımaya neden olur. Daha büyük boyutlarda model tercih edilmesi, bu sorunu azaltabilir; zira daha uzak sınırlarından yansıyan dalgaların enerjisi, malzeme sönümü sayesinde emilir. Ancak, bu çözüm yüksek hesaplama süresine yol açmaktadır (Itasca, 2019). Bu nedenle, viskoz sınırların (*quiet boundry*) kullanımı çok etkili bir alternatif olarak görülmektedir. Modelin taban sınırında, Lysmer ve Kuhlemeyer tarafından geliştirilen viskoz taban sınır koşulu uygulanmıştır (1969). Viskoz sınırlar model tabanından aşağıya doğru giden dalgaların model içine geri dönmesini engeller. Itasca'ya (2019) göre, viskoz sınır koşulları kullanıldığında, bu sınır koşulunun etkisini geçersiz kılmamak için sismik kayıt, gerilme-zaman kaydına dönüştürülmektedir. Model tabanına uygulanan giriş gerilme-zaman kaydı, Denklem 3.1'de verilen formül kullanılarak bir hız- zaman geçmişinden gerilme-zaman geçmişine dönüştürülmüştür (Mejia ve Dawson, 2006).

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (3.1)$$

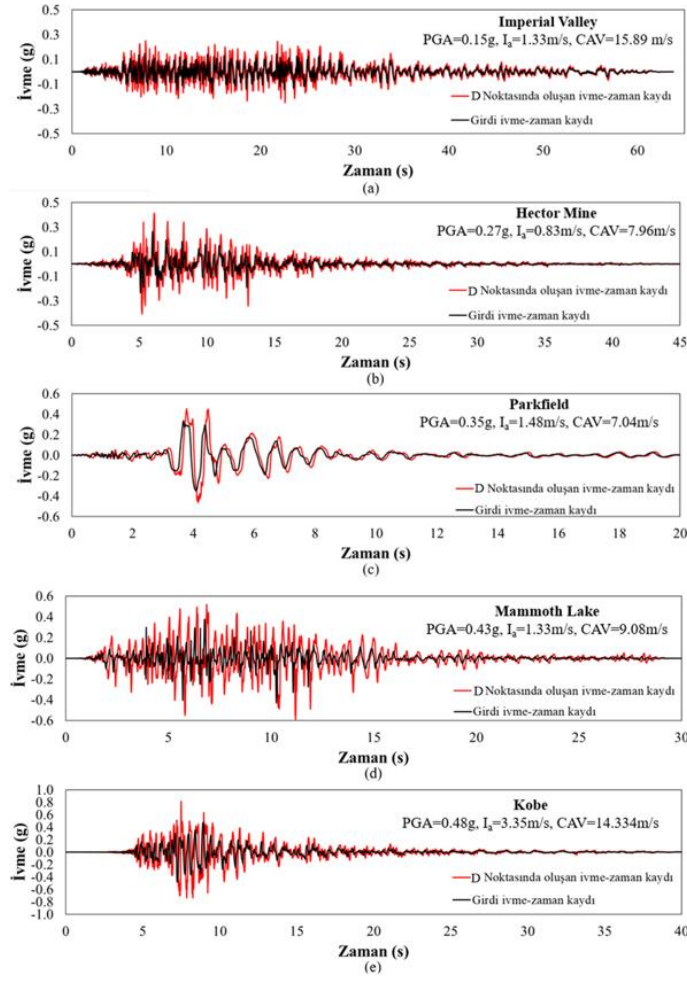
Denklemden, σ_s uygulanan kayma gerilimini, ρ zemin yoğunluğunu, C_s ortamda s-dalga yayılma hızını, v_s ise depremin giriş hızı-zaman kaydını temsil etmektedir. Formasyondaki 2.0 katsayısı kesin bir değer değildir ve dinamik analizler gerçekleşmeden önce serbest alan analizleri ile kontrol edilmelidir. Bu nedenle, FLAC3D kullanıcı kılavuzunu (Itasca, 2019) ve Kiran (2021)'i dikkate alarak, Denklem 3.1 ile dönüştürülen kayma gerilimi kaydı önce viskoz sınıra uygulanmış ve analiz tamamlandıktan sonra model tabanından elde edilen ivme kaydı gerçek ivme kaydı ile karşılaştırılmıştır. Bu kontroller, bu çalışmada incelenen on farklı deprem kaydı için gerçekleştirilmiş ve her biri için bir katsayı belirlemesi yapılmıştır. Ayrıca, sismik dalganın sınır yansıma etkisini önlemek ve model etrafında sonsuzluğu tanımlayabilmek için modelin tüm yan yüzeylerinde serbest alan (*free field*) sınırı kullanılmıştır.

BULGULAR

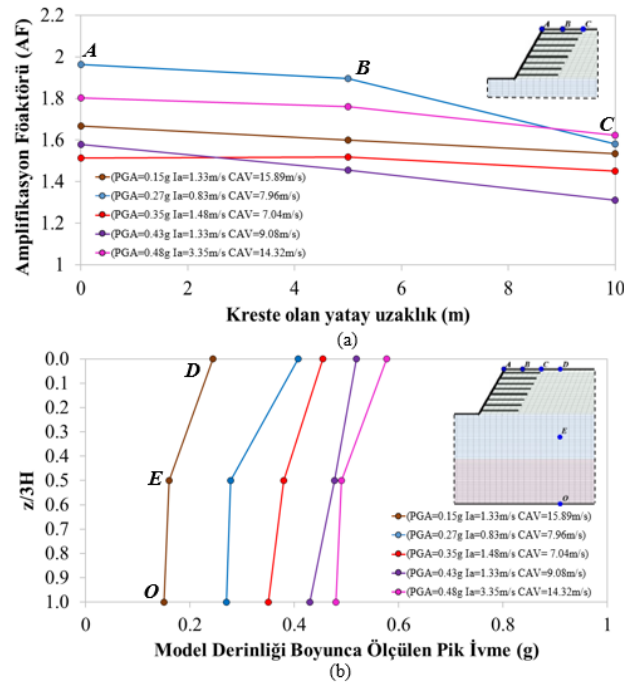
Pik İvmeye Meydana Gelen Amplifikasyonun Değerlendirilmesi

Depremler, yer kabuğundaki fay hatları boyunca meydana gelen ani hareketlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan sismik dalgalardır. Sismik dalgaların yüzeye yayılması sırasında, zemin özellikleri, yapısal özellikler ve yer hareketinin frekans içeriği gibi faktörler, depremin etkisini önemli ölçüde artırabilir. Bu artış, model yüzeyindeki ölçüm noktalarında belirlenen pik ivme değerlerinin ($PGA_{yüzey}$), model tabanından etkilenen girdi hareketine ait pik ivme değerlerine (PGA_{girdi}) bölünmesiyle elde edilen amplifikasyon faktörü (AF) ile ifade edilir. Bu çalışmada, zemin yüzeyinde beş metre aralıklarla alınan üç noktada (A, B, C) ve model derinliği boyunca eşit aralıklarla belirlenen üç farklı noktada (D, E, O) amplifikasyon faktörü değerleri incelenmiştir (Şekil 1 (a)). Şekil 10'da beş farklı deprem hareketi için model yüzeyinden (Nokta D) elde edilen ivme-zaman geçmişleri ile giriş ivme kayıtları (Nokta O) sunulmuştur. Aynı zamanda Şekil 11 (a)'de aynı beş deprem hareketi için model derinliği boyunca belirlenen üç farklı noktadan elde edilmiş amplifikasyon değerleri sunulmuştur. Buradan model tabanından üst zemin tabakalarına çıkıldıkça, deprem pik ivmesinde artış olduğu görülmektedir. Pik ivme değerlerindeki bu artışın nedeni, yüzeydeki zemin tabakasının malzeme özellikleri ile kayma dalgası hızının, altta bulunan zemin tabakalarından daha düşük olması ile açıklanabilir. Elastik dalga enerjisinin korunumu nedeniyle, enerji akışının da sabit kalması gerekmektedir; bu nedenle kayma dalgası hızındaki azalış hareketin genliğinde bir artışa yol açmaktadır. Ayrıca sismik dalgalar yüzeye ulaştığında enerjilerinin çoğu geri yansımaktadır. Bunun sonucunda, yüzeydeki zemin tabakaları aynı anda hem yukarıdan hem de aşağıdan gelen dalgaların etkisi altında olacaktır (Tavakoli vd., 2019). Bu durum yüzeydeki ivme artışını açıklamaktadır.

Amplifikasyon faktöründeki değişim, model yüzeyinde alınan noktalarda da incelenmiştir (Şekil 11 (b)). Burada görüldüğü üzere, en yüksek amplifikasyon faktörü değeri A noktasında (şevin taş bölgesi) meydana gelmektedir. A noktasından uzaklaştıkça amplifikasyon faktörü değerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum da elastik dalga enerjisinin korunumu ve şevin geometrisiyle açıklanabilir (Maleki vd., 2023). Elastik dalga enerjisinin korunumu gereği, dalga ilerledikçe enerji akışı sabit kalır; bu nedenle, sismik dalga serbest alan koşullarından duvar yüzeyine girdiğinde, dalga hareketinin akışı A noktasında yoğunlaşmaktadır. Bu durum maksimum amplifikasyonun şevin taş bölgesinde meydana gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca yatay düzlemde şevin taş bölgesinden uzaklaştıkça amplifikasyon faktörü değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, model yüzeyinde geometrik etkinin enerjinin yoğunlaştığı A noktasından uzaklaştıkça azaldığını göstermektedir (Tavakoli vd., 2019).



Şekil 10. Farklı Deprem Hareketleri Neticesinde Model Tabanından (O Noktası) ve Model Yüzeyinden (D Noktası) Alınan İvme-Zaman Kayıtları: (a) Imperial Valley, 1979 (b) Hector Mine, 1999 (c) Parkfield, 2004 (d) Mammoth Lake, 1980 (e) Kobe, 1975

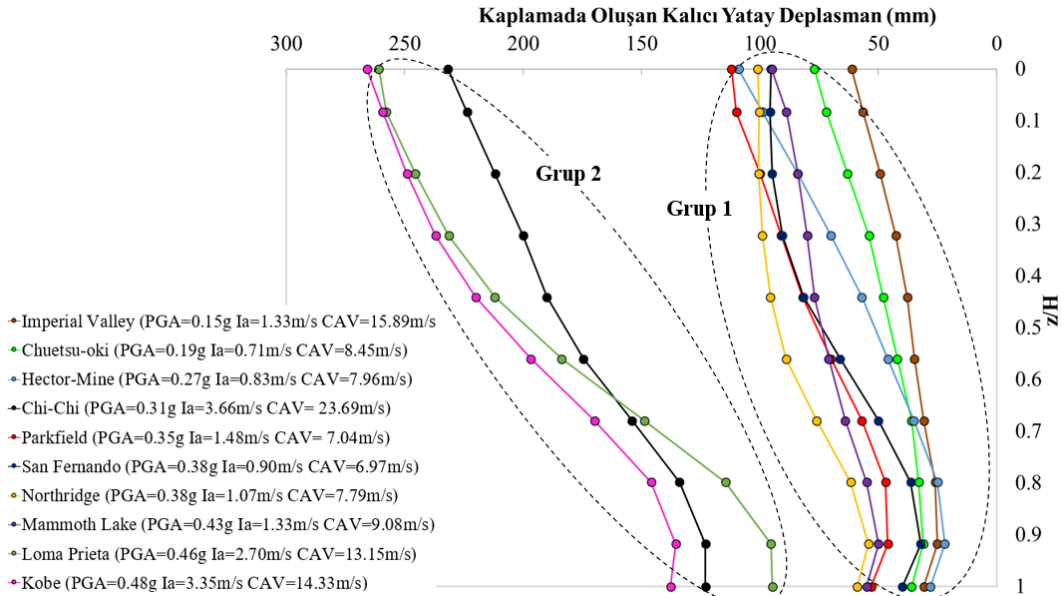


Şekil 11. Model Üzerinde Alınan Belirli Noktalarda Pik İvmeye Meydana Gelen Değişim: (a) Model Yüzeyinde (A, B, C Noktaları), (b) Model Derinliği Boyunca (O, E, D Noktaları)

Kaplamada Meydana Gelen Yatay Deplasman

Şev modeline uygulanan on deprem hareketinin sonucunda kaplamada oluşan yatay kalıcı deplasman değerleri Şekil 12’de verilmiştir. Grafikten sismik hareketler neticesinde oluşan deplasman değerlerinin iki ayrı grupta toplandığı gözlemlenmektedir. Bu gruplardan ilki (Grup 1), Imperial Valley (PGA=0.15g), Chuetsu-oki (PGA=0.19g), Hector Mine (PGA=0.27g), Parkfield (PGA=0.35g), San Fernando (PGA=0.38g), Northridge (PGA=0.38g) ve Mammoth Lake (PGA=0.43g) depremlerinden kaydedilen, deplasman değerlerini içermektedir. Diğer grup (Grup 2) ise Chi-Chi (PGA=0.31g), Loma Prieta (PGA=0.46g) ve Kobe (PGA=0.48g) depremlerinin neden olduğu Grup 1’e göre nispeten daha büyük deplasman değerlerinin elde edildiği analiz sonuçlarını kapsamaktadır.

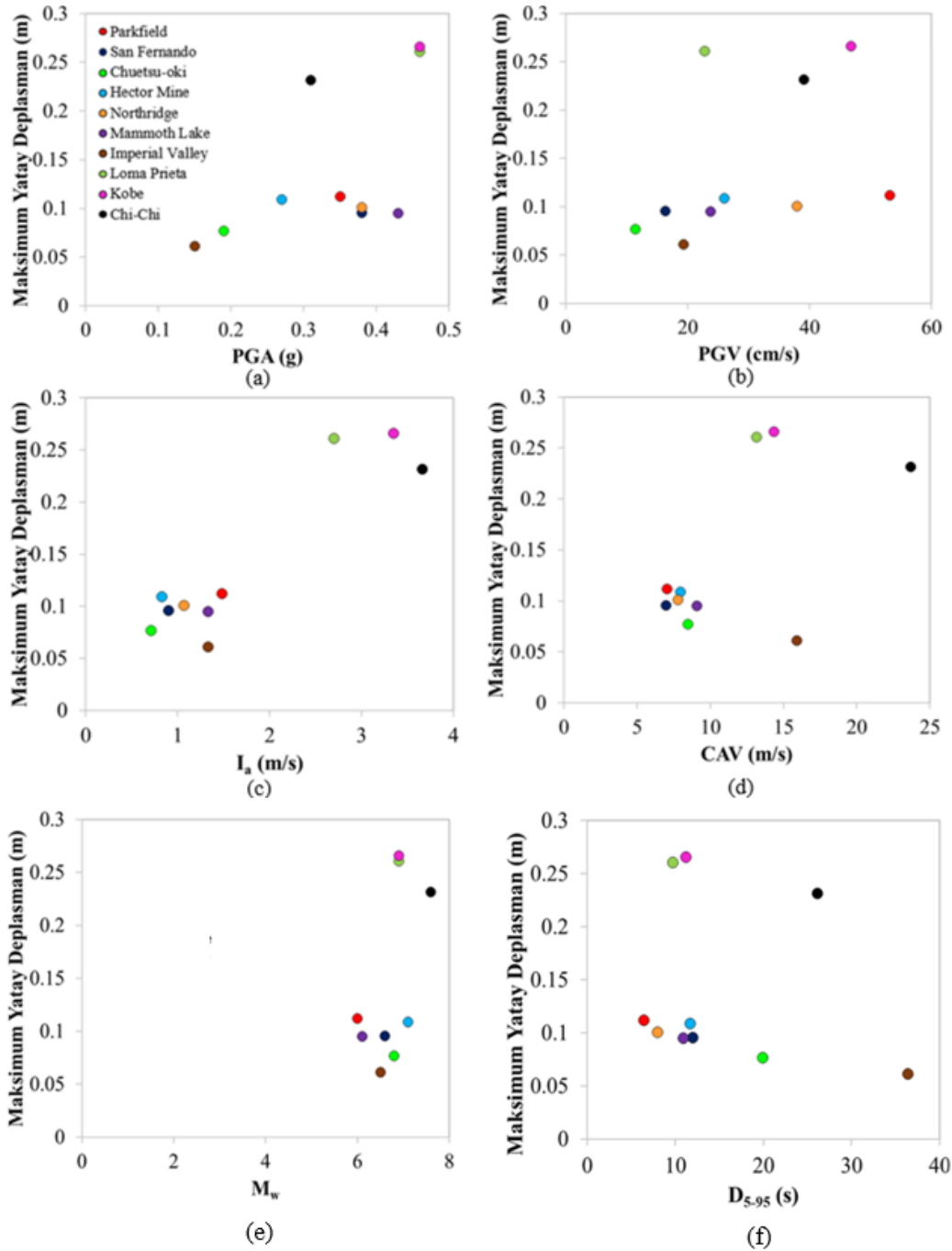
Grup 1’de meydana gelen deplasman değerlerinin, duvar yüksekliğinin yaklaşık olarak %5-9’u arasında meydana geldiği ve pik ivme değeri arttıkça kaplamada meydana gelen maksimum deplasman değerinin de arttığı görülmektedir. Aynı pik ivme değerine sahip (0.38g) San Fernando ve Northridge depremlerinde, daha uzun süreli olan ve daha büyük Arias Şiddeti değerine sahip Northridge depreminde daha yüksek deplasman meydana geldiği görülmektedir. Grup 2’deki deformasyonlara neden olan üç depremin özellikle çok yüksek pik yer ivmesi (PGA), Arias Şiddeti (I_a) ve Kümülatif Mutlak Hız (CAV) gibi deprem karakteristiklerine sahip olmasına atfedilebilir. Burada hangi deprem karakteristiğinin, zemin çivili duvarların yatay deformasyon davranışında baskın olduğunu netleştirmek için, duvar yüzeyinde gözlemlenen maksimum yer değiştirme değerleri, Şekil 13 ve Şekil 14’te verilen, PGA: Pik yer ivmesi (g), PGV: Pik yer hızı (cm/s), D_{5-95} : T=5-95 s için önemli süre, I_a : Arias Şiddeti (m/s), CAV: Kümülatif Mutlak Hız (m/s) ve M_w : Magnitüd gibi çeşitli deprem parametreleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Farklı deprem özelliklerine göre yatay deplasman değerleri incelendiğinde, Şekil 12’ye benzer bir gruplaşma olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 13 (a)’te, pik yer ivmesi ve maksimum yatay deplasman değerleri verilmiştir. Şekilde, PGA değerlerinden elde edilen deformasyon değerlerinin yaklaşık 0.4g’ye kadar iki belirgin kümeye gruplandığı görülmektedir. Buradan, tahmin edildiği üzere yüksek pik yer ivmesine sahip deprem hareketleri neticesinde yüksek deplasman değerlerini gözlemlenebileceği sonucunu çıkarmak mümkündür. Ancak, dikkati çeken önemli bir husus, 0.31g PGA değerine sahip Chi-Chi depremi neticesinde oluşan maksimum deplasman değerinin, büyük yer değiştirmelerin gerçekleştiği Grup 2’de yer almasıdır. Bu durumun nedeni, Chi-Chi yer hareketinin, analizlerde uygulanan on deprem hareketi içinde en yüksek Arias Şiddeti ve CAV değerine sahip olması olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, zemin çivili duvarların sismik tasarımında kullanılan tek deprem karakteristiği olan pik yer ivmesinin (FHWA, 2015) yanı sıra diğer deprem özelliklerinin de (I_a , CAV, PGV, vb.) duvarın deformasyon davranışında önemli bir rol oynadığını kanıtlamaktadır.



Şekil 12. Deprem Hareketleri Neticesinde Kaplamada Meydana Gelen Yatay Deplasman

Bir deprem karakteristiği olarak Arias Şiddeti, enerji salınımını temsil eden çok önemli bir parametredir; bu değer, ivme kaydının yatay ve düşey bileşenlerinin toplamını içerir; ayrıca depremin sarsıntı süresinin ve frekans içeriğinin zamana bağlı değişimini kapsar (Kayen ve Mitchell, 1997). I_a ve maksimum yatay deplasman değerlerinin dağılımı Şekil 13 (c)’te gösterilmiştir. Buradan, modelde oluşan yatay deplasman davranışında Arias Şiddetinin pik yer ivmesi değerlerinden daha etkili olduğu açıkça görülmektedir. Yüksek deformasyonların meydana geldiği üç deprem

hareketinin Arias Şiddeti değerleri, düşük deformasyonların meydana geldiği deprem hareketlerine ait Arias Şiddeti değerlerinden ortalama 2 kat büyüktür. Daha açık bir şekilde bir karşılaştırma yapmak gerekirse $PGA=0.43g$ ve $I_a=1.33$ m/s sahip Mammoth Lake depreminde duvarda gözlemlenen maksimum yatay deplasman 11 cm iken, $PGA=0.46g$, $I_a=2.70$ m/s olan Loma Prieta depreminde 26 cm maksimum deplasman gerçekleşmiştir. Ayrıca $PGA=0.35g$, $I_a=1.48$ m/s olan Parkfield depreminde 11.2 cm deplasman meydana gelirken, pik yer ivmesi daha düşük olan, $PGA=0.31g$, $I_a=3.66$ m/s değerine sahip Chi-Chi depreminde oluşan maksimum yatay deplasman 23 cm'dir. Dolayısıyla, buradan pik yer ivmesi benzer olan deprem hareketlerinde Arias Şiddeti değerinin deformasyon davranışında belirleyici ve önemli bir faktör olduğu görülmektedir. Pik yer ivmesi değerinden bağımsız olarak, depremin frekans içeriğini ve süresini kapsayan I_a değerleri arttıkça, maksimum deplasman değeri de artmaktadır. Şekil 13(b)'te deprem hareketlerinin pik hız değerleri ile, duvarda oluşan maksimum deformasyon dağılımları verilmiştir. Buradan, pik yer hızı değerleri ile duvarda oluşan deplasman arasında etkili bir ilişki olduğu görülmektedir; deplasman değerleri artan PGV değerleriyle artmaktadır.



Şekil 13. Farklı Deprem Karakteristiklerine Göre Duvarda Oluşan Maksimum Deplasman Dağılımı

Şekil 13 (c)'te dikkati çeken bir diğer hususta, on deprem hareketi içinde en yüksek Arias Şiddeti değerine ($I_a=3.66\text{m/s}$) sahip Chi-Chi depreminden sonra oluşan maksimum deplasman değerinin Grup 2'de bulunan diğer iki deprem hareketinden Loma Prieta ($I_a=2.7\text{m/s}$), Kobe ($I_a=3.35\text{m/s}$) daha düşük olmasıdır. Bu durumun nedeni, bu depremin Grup 2'deki diğer yer hareketlerine kıyasla daha düşük bir PGA değerine sahip olması olarak değerlendirilmektedir.

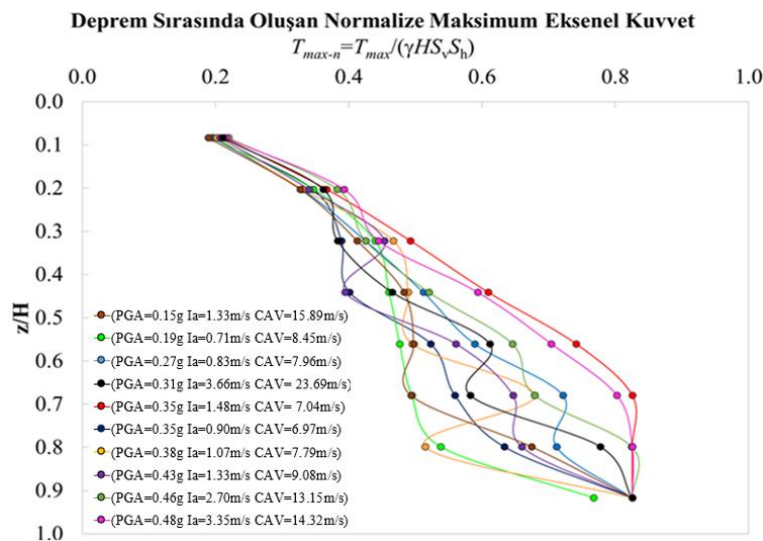
Kümülatif Mutlak Hız değerlerinin, deplasman davranışı üzerindeki etkisi Şekil 13 (d)'te incelenmiştir. Her iki grupta yer alan deplasman değerleri incelendiğinde genellikle CAV değerleri arttıkça deplasman değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca, Grup 1'deki diğer altı depremle karşılaştırıldığında oldukça yüksek kabul edilebilecek CAV değerine sahip olan Imperial Valley depremi sonucunda oluşan en küçük yatay deplasman meydana gelmiştir. Bu durumun, depremin en düşük pik yer ivmesi değerine (0.15g) sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 13 (e) ve (f)'te sırasıyla depremin magnitüdü (M_w) ve $T=5-95\text{s}$ için önemli süre (D_{5-95}) göre deprem sonunda elde edilen maksimum yatay deplasman dağılımı incelenmiştir. Buradan, benzer D_{5-95} , M_w değerlerine sahip deprem hareketlerinin farklı deformasyon davranışları sergileyebileceğini açıkça göstermektedir. Dolayısıyla bu deprem karakteristiklerinin zemin çivili bir duvarın dinamik koşullar altında yatay deformasyon davranışında belirleyici parametreler olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

Maksimum Eksenel Kuvvet

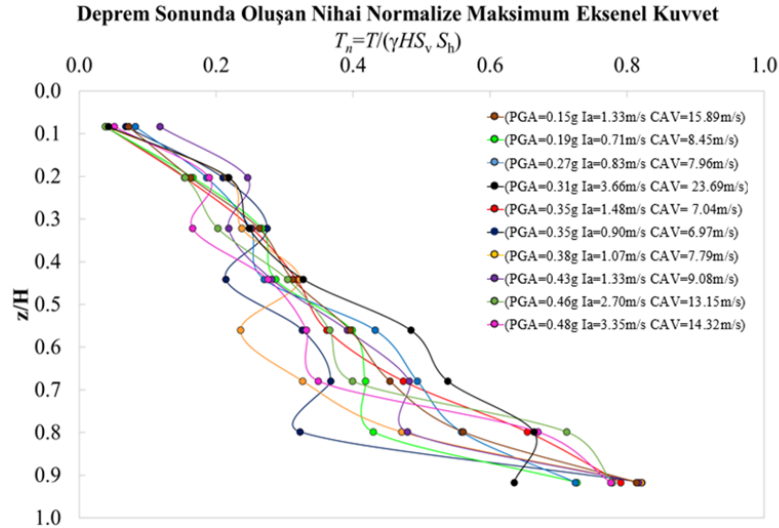
Bu bölümde, on ayrı deprem hareketi altında gerçekleştirilen dinamik analiz sürecinde elde edilen maksimum çivi kuvvetleri ($T_{\max}$) ile ve de deprem hareketi sonucunda çivilerde meydana gelen maksimum çivi çekme kuvvetleri (T) incelenmiştir. Şekil 14'te ve Şekil 15'de sırasıyla deprem esnasında ve deprem sonrasında oluşan çivi kuvvetleri normalize edilerek sunulmuştur. Normalize edilmiş kuvvetler Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır (FHWA, 2015).

$$T_{\max-n} = \frac{T_{\max}}{\gamma HS_v S_H} \quad (4.1)$$

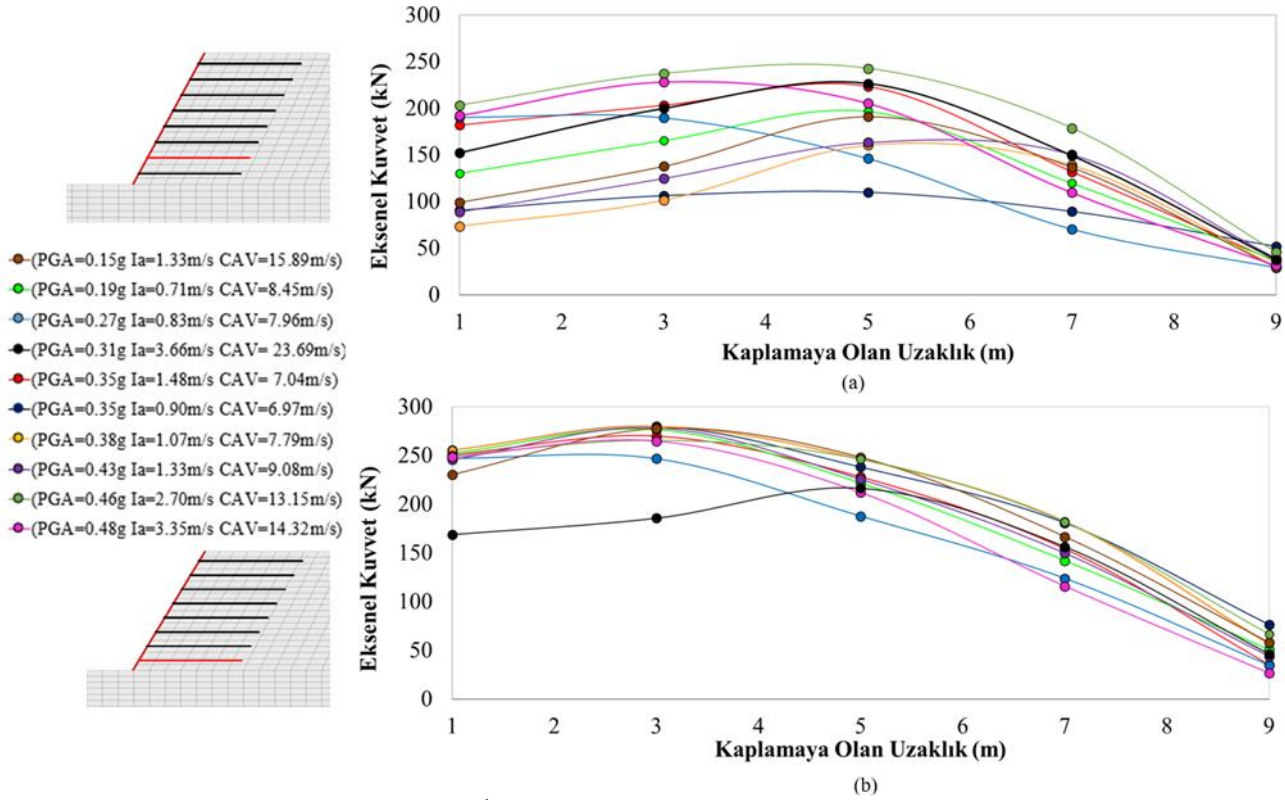
Her iki grafikte de maksimum çivi kuvvetlerinin alt üç sıra çivide meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun nedeninin, üst sırada kalan çivilerin yenilme zarfı içinde kalması dolayısıyla, üzerinde gerilme oluşmadığı için sisteme minimum seviyede katkı sağlaması olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla alt sırada kalan çiviler, yenilme zarfının dışında kalan aktif uzunlukları vasıtasıyla sistemde en yüksek çekme yükünü karşılayarak yenilmeye karşı direnmektedir. Maksimum çivi kuvvetlerinin oluştuğu alt iki sıradaki çivi kuvveti dağılımı ise deprem sonunda elde edilen maksimum çekme yükleri için Şekil 16'da verilmiştir. En alt çivide San Fernando depremi haricinde tüm çivilerde maksimum yükün aynı yerde ve kaplama yakınında meydana geldiği görülmektedir ve çivilerde oluşan nihai maksimum yük değerleri birbirine oldukça yakındır. Alttan ikinci sırada yer alan çivilerde ise büyük deplasmanların oluştuğu üç deprem de en büyük çekme kuvvetlerinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 14. Deprem Esnasında Çivilerde Oluşan Maksimum Kuvvetler



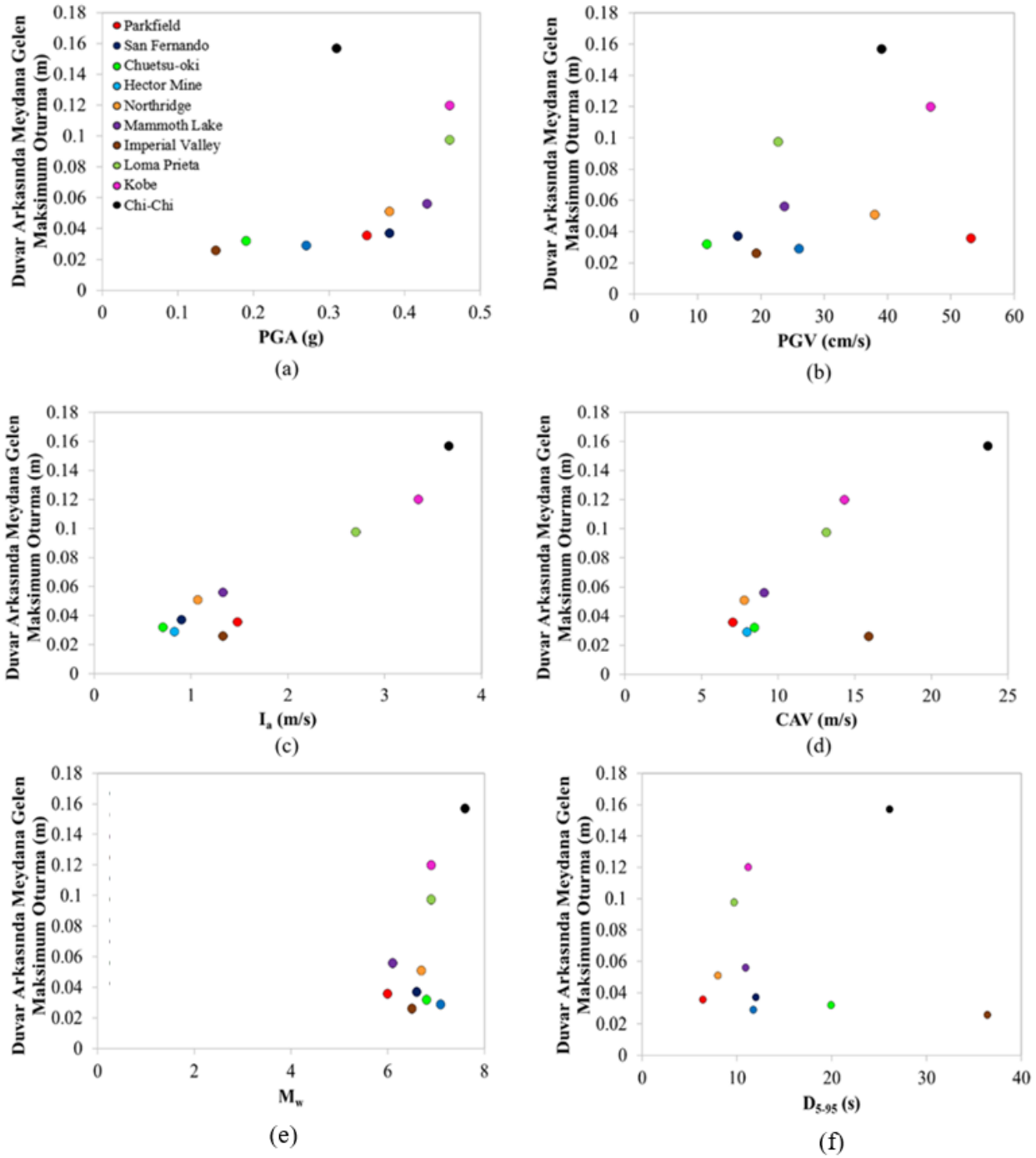
Şekil 15. Deprem Sonunda Çivilerde Oluşan Maksimum Kuvvetler



Şekil 16. Alt İki Çivide Oluşan Eksenel Kuvvet Dağılımı

Duvar Arkasında Oluşan Maksimum Düşey Deplasman

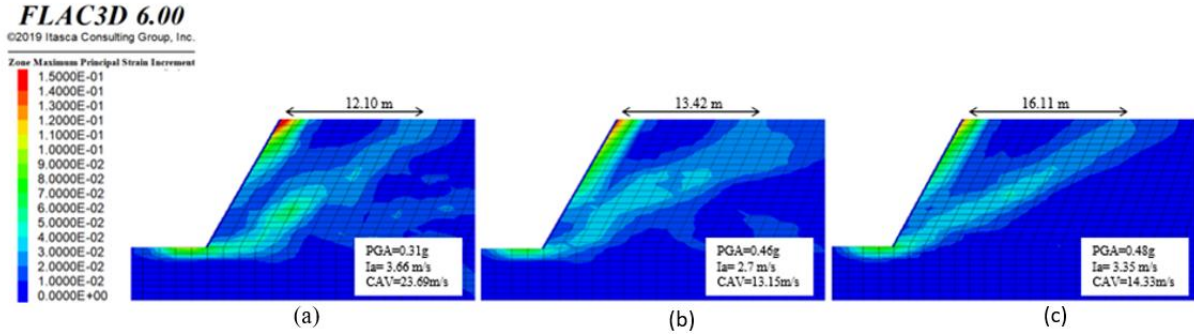
Bu bölümde, dinamik analizler sonucunda duvarın arkasında meydana gelen maksimum oturma değerleri, deprem karakteristikleri göz önüne alınarak incelenmiştir. Şekil 17 (a)'de, pik yer ivmesi değerlerinin oturma davranışını doğrudan etkilediği görülmektedir; oturma belirli bir deformasyon değerine kadar pik yer ivmesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Yüksek oturma değerlerinin gözlemlendiği deprem hareketlerinde pik ivmenin yanında, özellikle yüksek I_a ve CAV değerlerinin de etkisi olduğu görülmektedir (Şekil 17 (c)-(d)). PGV değerlerine göre düşey deplasman dağılımı incelendiğinde, maksimum oturma davranışının bu değerle birlikte arttığı görülmektedir. Ayrıca depremin magnitüdü (M_w) ve $T=5-95s$ için önemli süre (D_{5-95}) göre deprem sonunda duvar arkasında oluşan maksimum düşey deplasman dağılımı incelenmiştir. Buradan, benzer D_{5-95} , M_w değerlerine sahip deprem hareketlerinin farklı düşey deformasyon davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu deprem karakteristiklerinin zemin çivili bir duvarın dinamik koşullar altında şev arkasında oluşan oturma davranışında belirleyici parametreler olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.



Şekil 17. Farklı Deprem Karakteristiklerine Göre Duvar Arkasında Oluşan Maksimum Düşey Deplasman Dağılımı

Kayma Düzlemleri

Gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde, elde edilen kayma düzlemleri Şekil 18’de verilmiştir. Yüksek deformasyonların gerçekleştiği, nispeten yüksek pik yer ivmesi, Arias Şiddeti ve Kümülatif Mutlak Hız değerlerine sahip üç deprem neticesinde oluşan kayma düzlemleri sunulmuştur. Burada, kayma düzlemleri ile şevin tepe noktası arasındaki yatay mesafeler ölçülerek çivi etkin boyları incelenmiştir. Özellikle üst üç sıra çivinin kayma düzleminin içinde kaldığı görülmektedir. Buradan dinamik yüklemenin, üst sıralardaki çivilerin eksenel kuvveti üzerinde bir etkisi olmadığı sonucuna varılabilir. Bu durum alt sıra çivilerde maksimum çivi kuvvetlerinin oluşması durumunu açıklamaktadır.



Şekil 18. Deprem Hareketi Sonunda Oluşan Kayma Düzlemleri: (a) Chi-Chi (b) Loma Prieta (c) Kobe

SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin çivileriyle güçlendirilmiş şev modeli, bir sonlu farklar yazılımı olan FLAC3D’de modellenerek, farklı karakteristik özelliklere sahip on ayrı deprem hareketi altında dinamik analize tabi tutulmuştur. Zemin çivili duvarların dinamik tasarımında genel olarak pseudo-statik analiz yöntemlerine dayalı metotlardan faydalanılmaktadır. Bu yöntemler, depremin pik ivmesine bağlı olarak belirlenen sismik katsayının tahmin edilmesini ve bu katsayı ile sismik yüklerin duvarın kayma düzlemi içinde kalan kütesine etkilmesine dayanır. Oysa, deprem dalgalarını tek bir parametre ile ifade etmek çoğu koşulda yeterli olmamaktadır. Pik ivmenin yanında diğer deprem karakteristikleri de zemin çivili şev sisteminin dinamik davranışında etkili olmaktadır. Bu amaçla bu çalışma kapsamında oluşturulan şev modelinde diğer deprem karakteristiklerinin etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Öncelikle model tabanından etkililen girdi hareketinin, yüzeye kadar olan yayılımı sırasında meydana gelen amplifikasyon değerleri incelenmiştir. Burada, model tabanından yüzeye çıkarken, pik yer ivmesinde bir atış sözü konusu oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, elastik dalga enerjisinin korunumuna dayanarak açıklanmıştır. Aynı zamanda model tabanından model yüzeyine çıktıkça, üst tabakalarda bulunan zeminlerin rölatif sıklığı ve kayma dalgası hızı azaldığı için dalga genliğinde meydana gelen bir atış beklenen bir durumdur. Benzer şekilde, modelin taç bölgesinde seçilen A noktasından belirli uzaklıklarda tanımlanmış üç noktada da zemin büyütmesi etkisi gözlemlenmiştir. Bu koşulda en büyük amplifikasyon faktörünün A noktasında meydana geldiği görülmüştür. Bu durum da yine elastik dalga enerjinin korunumu ve geometrik etki ile açıklanmıştır.

Bu çalışmada dikkati çeken bir diğer husus, sismik hareketler neticesinde oluşan deplasman değerlerinin iki ayrı grupta toplanmasıdır. Grup 1, pik ivme aralığı 0.15g-0.43g, I_a değeri 0.71m/s-1.33m/s aralığında değişen depremler neticesinde 5-11 cm aralığında gelişen deplasmanları kapsamaktadır. Grup 2 ise pik ivme değerleri 0.31g-0.48g, I_a değerleri 2.70m/s-3.66m/s arasında bulunan ve 23-27cm aralığında deplasmanın gerçekleştiği üç deprem hareketini içermektedir. Özellikle, 0.43g’ye kadar pik ivmeye sahip depremlerin etkisi altında kaplama yüzeyinde duvar yüksekliğinin %5-9’u oranında deplasman meydana gelirken, yatay deplasman davranışında, pik yer ivmesinin belirleyici olduğu belirlenmiştir. Pik ivme değeri arttıkça yatay deformasyon da artmaktadır. Pik yer ivmesi eşit ve 0.38g olan San Fernando ve Northridge depremleri incelendiğinde, Northridge depreminin daha uzun süreli olması ve daha yüksek Arias Şiddeti ve CAV değerine sahip olması nedeniyle, bu depremde meydana gelen deplasmanın San Fernando depremine kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Aynı pik ivmeye sahip depremlerde frekans içeriğinin ve deprem süresinin deplasman davranışını etkilediği görülmektedir. Sırasıyla 0.46g ve 0.48g pik ivmeli Loma Prieta ve Kobe depremleri neticesinde deplasmanların Grup 1’e göre yaklaşık iki kat arttığı gözlemlenmiştir. Dikkate değer bir bulgu ise, PGA=0.31g olan ve çok yüksek CAV=23.69m/s ve I_a =3.66m/s değerlerine sahip Chi-Chi deprem hareketi sonunda yaklaşık 23 cm deplasman meydana gelmesidir. Bu değer daha yüksek pik ivmeli fakat düşük I_a ve CAV değerlerine sahip Parkfield (0.35g), San Fernando (0.38g), Northridge (0.38g), ve Mammoth Lake Parkfield (0.43g) depremleri neticesinde bulunan deplasman değerlerinden daha büyüktür. Bu durum, pik ivme değerinin deformasyon davranışını değerlendirmede yeterli bir gösterge olamayacağını ortaya koymaktadır. Analizler, pik ivmenin yanında Arias Şiddeti ve CAV değerlerinin dayanma yapısı deplasmanları üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Deprem hareketi sırasında ve sonrasında çivilerde gelişen maksimum çivi kuvvetleri incelenmiştir. Burada, maksimum çivi kuvvetlerinin alt iki sıra çivide oluştuğu, üst üç sıra çivilerin ise sisteme katkısının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek deformasyonların gerçekleştiği üç ayrı deprem hareketi neticesinde oluşan kayma düzlemleri incelendiğinde ilk üç sıra çivinin kayma düzlemi içerisinde yer aldığı ve gerilme alamadığı görülmüştür.

Duvar arkasında meydana gelen oturma davranışı incelendiğinde genel olarak pik ivmeye bağlı olarak oturma değerlerinin de arttığı görülmekte olup, Arias Şiddeti değerinin özellikle yüksek deformasyonun görüldüğü nispeten yüksek karakteristik özelliklere sahip depremlerde oturma davranışını yöneten parametre olduğu belirlenmiştir. CAV değerinin artmasıyla düşey deformasyonun arttığı; fakat oldukça yüksek Kümülatif Mutlak Hız ve Arias Şiddeti değerine sahip olmasına rağmen en küçük yatay ve düşey deformasyon davranışı gösteren Imperial Valley depreminin sismik davranışında en önemli faktörün en düşük pik yer ivmesine sahip olması sonucu çıkarılmıştır. Pik yer hızı değerlerine göre, düşey deplasman değerleri incelendiğinde bu değer artışıyla deplasman değerlerinin arttığı; fakat diğer deprem parametrelerinin (PGA, I_a ve CAV) daha etkili olduğu görülmüştür. Deprem magnitud ve $T=5-95$ sn için önemli süresinin deformasyon davranışı etkisinde önemli bir etkisi olduğu görülmemiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre, pik ivme değerinin deformasyon davranışını değerlendirmede yeterli bir parametre olmadığı ortaya konmuştur. Zemin çivili duvarların sismik tasarımı için başvuru yönetmeliklerde, depremin süresini ve frekans içeriğini yansıtan deprem karakteristiklerinin etkisini dikkate alan bir yöntem bulunmamaktadır. Dinamik tasarımın, maksimum ivme değerine bağlı belirlenen sismik bir katsayıya dayandırılması göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın sonuçlarının literatüre ve zemin çivili duvarların tasarım uygulamalarına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Alver, O. (2023). *Development Of Lateral Load Resistance-Deflection Curves For Piles In Cohesionless Soils Under Earthquake Excitation*. Istanbul Technical University.
- Ardiaca, D. . (2009). Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. İçinde *Plaxis Bulletin* (s. No. Spring, ss. 12–15).
- Arias, A. (1979). A Measure of Earthquake Intensity. İçinde *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, (R.J. Hansen, ed.) (R.J. Hanse, ss. 483–83). MIT Press.
- Barar, O., Felio, G. Y., Vucetic, M., & Chapman, R. (1990). Performance of soil nailed walls during the October 17, 1989, Loma Prieta earthquake. *Proceedings of the forty-third Canadian geotechnical conference*, 73–165.
- Başbuğ, E., Cengiz, C., & Güler, E. (2021). 1-g Shaking table tests to determine the behavior of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loads. *Transportation Geotechnics*, 30(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100597>
- Baziar, M. H., Ghadamgahi, A., & Brennan, A. J. (2021). Centrifuge study of seismic response of soil-nailed walls supporting a footing on the ground surface. *Geotechnique*. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00157>
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. The university of Texas at Austin.
- Fan, C., Liu, H., Cao, J., & Ling, H. I. (2020). Responses of reinforced soil retaining walls subjected to horizontal and vertical seismic loadings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129(May 2019), 105969. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105969>
- FHWA. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual. *Soil Nail Walls Reference Manual*. FHWA-NHI-14-007: No. 132085, 132085, 425. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi14007.pdf>
- Ghadamgahi, A., Baziar, M. H., & Brennan, A. J. (2019). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, 536–537. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_174
- Giri, D., & Sengupta, A. (2009). Dynamic behavior of small scale nailed soil slopes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(6), 687–698. <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9268-x>
- Giri, D., & Sengupta, A. (2010a). Dynamic behavior of small-scale model of nailed steep slopes. *Geomechanics and Geoengineering*, 5(2), 99–108. <https://doi.org/10.1080/17486020903497415>
- Giri, D., & Sengupta, A. (2010b). Dynamic behavior of small-scale model slopes in shaking table tests. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.01.1-11>
- Gökgöz, A. (2021). *Zemin Çivisi İle Güçlendirilmiş Şevlerin Gerilme-Deformasyon Esaslı Yöntemler İle Değerlendirilmesi*. Cerrahpaşa, İstanbul Üniversitesi-Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Gokgoz, A., & Kelesoglu, M. K. (2024). Three Dimensional Finite Difference Analysis of Key Parameters. İçinde *KSCE Journal of Civil Engineering*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100027>
- Halabian, A. M., Sheikhabahaei, A. M., & Hashemolhosseini, S. H. (2010). Analysis of soil nailed walls under seismic excitations using finite difference method. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering 2010, Including Papers from the 4th International Tsunami Symposium*, 7(1350), 5745–5754.
- Halabian, A. M., Sheikhabahaei, A. M., & Hashemolhosseini, S. H. (2012). Three dimensional finite difference analysis of soil-nailed walls under static conditions. *Geomechanics and Geoengineering*, 7(3), 183–196. <https://doi.org/10.1080/17486025.2012.661468>
- Itasca. (2019). *FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* (6.0). Itasca Consulting Group, Inc. <http://docs.itascacg.com/flac3d700/contents.html#>
- Jennings, P. (1985). Ground Motion parameters that influence structural damage. İçinde *Scholl RE, King JL (eds) Strong ground motion simulation and engineering applications*. EERI Publication 85-02, Earthquake Engineering Research Institute.
- Jones, A. M. C. (1999). *Soil nailing: an investigation of lifetime performance*. University of Wales.
- Joyner, W., & Boore, D. M. (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proceedings of the Specialty Conference*, 43–102.
- Kayen, R., & Mitchell, R. (1997). Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias Intensity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 123(12), 1162–1174.
- Kiran, A. (2021). *Yüzeysel temelli yapılarda sıvılaşmaya bağlı oturmaların sayısal analizi*. İstanbul University-Cerrahpasa.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Dynamics Division*, 99, 421–427.
- Lin, P., Bathurst, R. J., & Liu, J. (2017). Statistical Evaluation of the FHWA Simplified Method and Modifications for Predicting Soil Nail Loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Liu, H., Hung, C., & Cao, J. (2018). Relationship between Arias intensity and the responses of reinforced soil retaining walls subjected to near-field ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 111(November 2017), 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.022>
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R., L. (1969). Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859–877. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001144>
- Maleki, M., Khezri, A., Nosrati, M., & Hosseini, S. M. M. M. (2023). Seismic amplification factor and dynamic response of soil-nailed walls. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 1181–1198. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01543-y>
- Marzionna, J. D., Maffei, C. E. M., Ferreira, A. A., & Caputo, A. N. (1998). Análise, projeto e execução de escavações e contenções. *Hachich, W., Falconi, FF, Saes, J. L.*
- Mejia, L. H., & Dawson, E. M. (2006). Earthquake deconvolution for FLAC. *4th International FLAC symposium on numerical modeling in geomechanics*.
- Mesrabadi, M., Ardakani, A., & Lashgari, A. (2023). Investigation of seismic displacement of nailed wall under near field earthquakes using hardening soil with small strain behavioral model. *Journal of Science and Engineering Elites*, 12(47), 84–92.
- Mokhtari, M., Barkhordari, K., & Abbasi, S. (2020). A comparative study of the seismic response of soil-nailed walls under the effect of near-fault and far-fault ground motions. *Journal of Engineering Geology*, 13(5), 121–146. <https://www.sid.ir/FileServer/JE/101052020S0503>
- Panah, A. K., & Majidian, S. (2013). 2D numerical modelling of soil-nailed structures for seismic improvement. *Geomechanics and Engineering*, 5(1), 37–55. <https://doi.org/10.12989/gae.2013.5.1.037>

- Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2015). Stability analysis of steep nailed slopes under seismic condition using 3-D finite element method. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(5), 536–540. <https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000084>
- Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2016). Seismic Stability Analysis of Un-Reinforced and Reinforced Soil Slopes. *Geo-China 2016*, 3, 74–81. <https://doi.org/10.1061/9780784480007.009>
- Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2021). Shaking Table Tests to Evaluate the Seismic Performance of Soil Nailing Stabilized Embankments. *International Journal of Geomechanics*, 21(4), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001981](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001981)
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses [Report No. EERC 70-10]. *Earthquake engineering reserach center*, December, 48.
- Sheikhbahaei, A. M., Halabian, A. M., & Hashemolhosseini, S. H. (2010). Analysis of soil nailed walls under harmonic dynamic excitations using finite difference method. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering 2010, Including Papers from the 4th International Tsunami Symposium*, 7, 5745–5754.
- Tavakoli, H., Kutanaei, S. S., & Hosseini, S. H. (2019). Assessment of seismic amplification factor of excavation with support system. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18(3), 555–566. <https://doi.org/10.1007/s11803-019-0521-x>
- Zamiran, S., Ghojavand, H., & Saba, H. (2012). Numerical analysis of soil nail walls under seismic condition in 3D form excavations. *Applied Mechanics and Materials*, 204–208(Iran 1990), 2671–2676. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.2671>
- Zhang, Y., Chen, G., Wu, J., Zheng, L., & Zhuang, X. (2012). Numerical simulation of seismic slope stability analysis based on tension-shear failure mechanism. *Geotechnical Engineering*, 43(2), 18–28.