

## Çoklu Fay Kırılmalarının Sıvılaşabilen Kum Davranışındaki Etkisi

Selda ATAROD<sup>1</sup>, Ayfer ERKEN<sup>2</sup>

### ÖZET

Deprem güvenli tasarımında, zemin hareketinin özellikleri ve zemin koşulları oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Zemin sıvılaşması, deprem mühendisliğinde önemli bir problem olmakta ve bu durum, zemin deformasyonları, yanal yayılmalar ve oturmalar gibi ciddi sorunlara yol açabilir. Özellikle, çoklu fay kırılmalarının neden olduğu depremler, daha büyük ivmelere ve uzun süreli yer hareketlerine neden olur, bu da zeminde daha karmaşık davranışların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Bu çalışma, Open Source Earthquake Engineering System (OpenSees) platformu kullanılarak, iki boyutlu doğrusal olmayan efektif stres analizleri ile farklı depremlere maruz kalan sıvılaşabilir zeminin (orta-sıkı kum,  $D_r=50\%$ ) dinamik davranışını incelemektedir. Suyu doymun kumlu zeminlerin sismik davranışı, Pressure Dependent Multi Yield 02 (PDMY02) modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Şubat 2023 Kahramanmaraş depremine ait Antakya ve Arsuz kayıtları kullanılarak ivmeler, oturmalar, yanal yayılmalar ve boşluk suyu basınçları değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, çoklu fay kırılmalarının zeminin dinamik tepkilerini tekil kırılmalara göre daha karmaşık ve şiddetli hale getirdiğini açıkça göstermektedir.

*Anahtar Kelimeler: Çoklu Fay Kırılması, Sıvılaşma, Opensees*

### ABSTRACT

In earthquake-resistant design, the characteristics of ground motion and soil conditions play a critical role. Soil liquefaction is a significant issue in earthquake engineering, leading to serious problems such as ground deformations, lateral spreading, and settlements. Earthquakes caused by multiple fault ruptures tend to generate higher accelerations and prolonged ground shaking, which can result in more complex soil behavior. This study investigates the dynamic behavior of liquefiable soil (medium-dense sand,  $D_r=50\%$ ) subjected to different earthquakes using two-dimensional (2D) nonlinear effective stress analyses on the Open Source Earthquake Engineering System (OpenSees) platform. The seismic behavior of water-saturated sandy soils was simulated using the Pressure Dependent Multi Yield 02 (PDMY02) model. The settlement, lateral spreading, and pore water pressures were evaluated using records from the 2023 Kahramanmaraş earthquake, specifically from Antakya and Arsuz. The results demonstrate that multiple fault ruptures lead to more complex and severe soil responses compared to single ruptures.

*Keywords: Multiple-Fault Ruptures, Liquefaction, Opensees*

<sup>1</sup> Ph D adayı, İstanbul Teknik Üniversitesi, [atarod24@itu.edu.tr](mailto:atarod24@itu.edu.tr) (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Prof. Dr., Doğu Üniversitesi, [aerken@dogus.edu.tr](mailto:aerken@dogus.edu.tr)



## 1. GİRİŞ

Depremler, en yıkıcı doğal afetler arasında yer almakta olup, genellikle yeraltı yapılarında önemli hasarlara yol açmakta ve insan hayatı için büyük bir risk oluşturmaktadır. Depremin büyüklüğü, ivmesi, süresi ve frekansı gibi çeşitli faktörler bu süreçte kritik bir rol oynar. Depremin büyüklüğü ve yerel zemin koşulları, zemin ivmelerini artırabilir ve depremin süresini uzatabilir. Bu durum, özellikle kumlu zeminlerde sıvılaşmaya ve taşıma gücü kaybına neden olur. Sıvılaşma, oturmalar, yanal yayılmalar ve zeminin kayma direnci azalma gibi sonuçlara yol açar. Bu durum, 1944 Tonankai depremi ([Shengcong ve Tatsuoka 1984](#)), 1964 Niigata depremi ([Lee ve Albaisa 1974](#)) ve yakın zamanda meydana gelen 2023 Kahramanmaraş depremi ([Ozkula 2023](#)) gibi tarihsel depremlerde gözlemlenmiştir. Bu olaylar, zemin davranışının sismik yükleme altında anlaşılmasının önemini ortaya koymaktadır.

Sıvılaşma genellikle hem deneysel hem de sayısal çalışmalarla analiz edilir. Deneysel çalışmalar, deprem koşullarını simüle etmek ve zemin davranışını gözlemlemek için genellikle dinamik deneylerin uygulandığı üç eksenli basınç, basit kayma ve sarsma tablası deneyleri gibi laboratuvar deneylerini içerir. Sayısal yöntemler, sismik yükleme altındaki zemin davranışının detaylı simülasyonlarını yaparak deneysel çalışmaları tamamlar. [Elgamal et. al. \(1998\)](#) ile [Boulanger ve Ziotopoulou \(2015\)](#) tarafından geliştirilen ileri zemin davranış modelleri, doymuş kumlu zeminlerin dinamik yükleme altındaki tepkisinin simülasyonunda önemli rol oynamıştır. Bu modeller, karmaşık zemin davranışını sismik gerilme koşulları altında dahil ederek sıvılaşmaya bağlı deformasyonların doğru tahmin edilmesini sağlar.

Çoklu fay kırılmalarının sıvılaştırılabilir zeminler üzerindeki etkisi, literatürde yeterince ele alınmamıştır. Önceki araştırmalar, [Adampira ve Derakhshandi \(2020\)](#), sismik dalgaların amplifikasyonunda sıvılaştırılabilir alt katmanların rolüne odaklanmıştır. [Mojtahedzadeh ve Siddharthan \(2021\)](#), deprem kaynaklı oturmaların tahmini için yeni bir yöntem önererek, orta sıvılaştırılabilir katmanların önemli rolüne vurgu yapmıştır. Bulguları, bu tür tabakalarının kalınlığının artmasının oturma değerlerini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, [Sadeghi ve ark. \(2021\)](#), deprem sonrası oturmaların tahmininde olasılıksal yaklaşımların önemini vurgulayarak, zemin özelliklerindeki ve sismik girdilerdeki değişkenliğin oturma tahmini konusunda daha incelikli bir anlayış gerektirdiğini öne sürmüştür. Bu katkılara rağmen, karmaşık sismik dalgaları ve süreleri yaratabilen çoklu fay kırılmalarının, sıvılaşmanın başlaması ve artması üzerindeki etkilerini anlamak için araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu araştırma, tekil ve çoklu fay kırılmalarının zemin sıvılaşma potansiyeli üzerindeki farklı etkilerini sistematik olarak analiz ederek bu bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır. Özellikle, araştırma, orta sıkı kumlu zeminlerin çoklu fay kırılmalarının etkisi altında sismik tepkisini incelemektedir. Araştırma, suya doymuş kumlu zeminleri modellemek için OpenSees çerçevesinde iki boyutlu, doğrusal olmayan, efektif gerilme dinamik sonlu eleman analizlerini kullanmakta ve PDMY02 zemin davranış modelini ([Biot, 1962](#)) uygulamaktadır. Sayısal modelin geçerliliği, deneysel dinamik basit kayma deneyleri ile



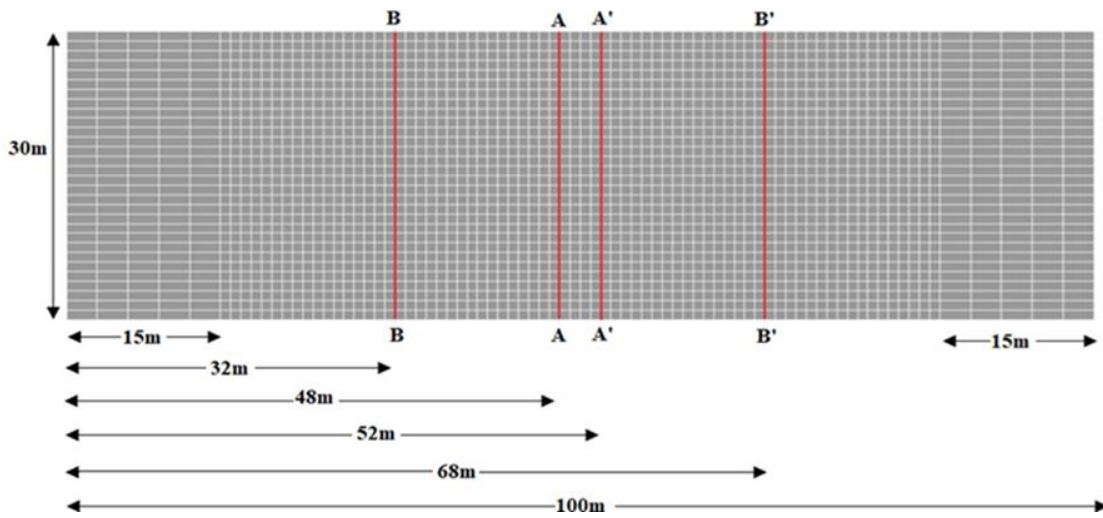
yapılan karşılaştırmalarla doğrulanmıştır. Sismik etkinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, çalışma iki farklı yer hareketini analiz etmektedir: 2023 Kahramanmaraş depreminden Antakya kaydı ve Arsuz kaydı. Çalışma, oturmalar, yanal yayılmalar ve farklı derinliklerdeki boşluk suyu basınç oranı üzerinde odaklanarak fay kırılma türlerinin zemin sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkilerini açıklamayı amaçlamaktadır.

## 2. KULLANILAN YÖNTEM

### 2.1. Sayısal Model ve Zemin Özelliklerinin Tanımı

#### Nümerik model

iki boyutlu, sayısal analiz modeli, OpenSees sonlu elemanlar platformunu kullanarak suya doygun kumlu bir zemin tabakasının dinamik davranışını simüle etmek üzere geliştirilmiştir (McKenna, 2011). OpenSees, plastiklik, döngüsel yumuşama, genişleme, sıvılaşma ve döngüsel hareketlilik gibi temel zemin parametrelerini simüle edebilen çeşitli constitutive modeller sunar. Şekil 1'de gösterildiği gibi, sayısal modelin boyutları 30 m yükseklik ve 100 m genişliğe sahiptir. Yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyinde olduğu ve ana kayanın 30 m derinlikte olduğu varsayılmıştır. Zemin davranışının inceleneceği A-A, B-B kesiti simetrik olarak A'-A' ve B'-B' olarak yerleştirilmiştir. Zemin profili, u-p oluşumlarına sahip tek katmanlı, elemanları kullanılarak simüle edilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, dört köşe düğümü 3 serbestlik derecesine sahiptir: x ve y yönlerinde yer değiştirmeleri (u) için iki serbestlik derecesi ve boşluk suyu basıncı (p) için bir serbestlik derecesi. Kalan 5 iç düğüm ise katı yer değiştirmeleri kaydetmek içindir ve 2 serbestlik derecesine sahiptir (McKenna ve Fenves, 2002).



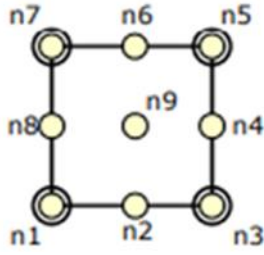
Şekil 1. Sayısal modelin şematik gösterimi

#### Zemin Constitutive Modeli

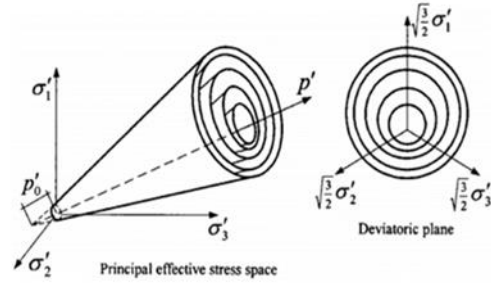
Bu çalışmada, Nevada Kum'u malzeme olarak ele alınmıştır. Bu malzemenin gerilme-deformasyon tepkisi, Yang et al. (2000, 2003 ve 2008) tarafından OpenSees'de geliştirilen



PDMY02 materyali ile simüle edilmiştir. Bu constitutive malzeme modeli ile suya doymuş kumlu zeminlerin drenajsız koşullarda ve dinamik yükler altında davranış biçimleri elde edilebilir. Bu constitutive modelin akma kriterleri, Şekil 3'te sunulduğu gibi birkaç açık konik şekilli akma yüzeyi tarafından tanımlanmıştır. Model, kayma deformasyonu altında hacimsel genişleme ve daralma ile sonuçlanan bir akış kuralı kullanır. Bu modeldeki plastik akış tamamen sapma karakterindedir. Bu nedenle, akma yüzeyleri açık uçlu olduğundan sabit bir gerilme oranı altında plastik hacim değişikliği meydana gelmez (Karimi ve Dashti, 2015a). Eleman, Biot'un gözenekli ortam teorisine (Biot, 1962) dayanarak çalışır ve dinamik yüklemeye malzemenin drenajsız davranışını başarılı bir şekilde simüle eder. Sonlu elemanlar analizinde eleman boyutunu seçmek için, minimum dalga boyu, zemin kesme dalgası hızı ( $V_s$ ) ve depremin maksimum frekansı ( $f_{max}$ ) içeriğine dayanarak tahmin edilmiştir. Zemin yumuşamasını dikkate almak için maksimum izin verilen eleman boyutu, minimum dalga boyunun 24'e bölünmesiyle hesaplanmıştır (Karimi ve Dashti, 2015a). Bu nedenle, zemin alanı, doğruluğu sağlamak ve hesaplama verimliliğini optimize etmek için iç kısımlarda 1 m x 1 m ağırlara ve serbest alan sütunlarında 1 m x 3 m ağırlara ayrılmıştır. Tablo 1, bu çalışmada kullanılan PDMY02 materyali için kalibre edilmiş parametreleri göstermektedir.



Şekil 2. 9-4quadrilateral eleman



Şekil 3. Konik akma yüzeyleri

Tablo 1. Kalibre edilmiş zemin parametreleri (Karimi ve Dashti, 2015a)

Relatif sıklık (%)	Doygun birim hacim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Sürtünme açısı (°)	Faz dönüşüm açısı (°)	Kesme modülü
50	19,7	33,5	25,5	57100

## 2.2. Sınır Koşulları ve Sayısal Analiz Yöntemi

Modelde iki tür sabitleme uygulanmıştır:

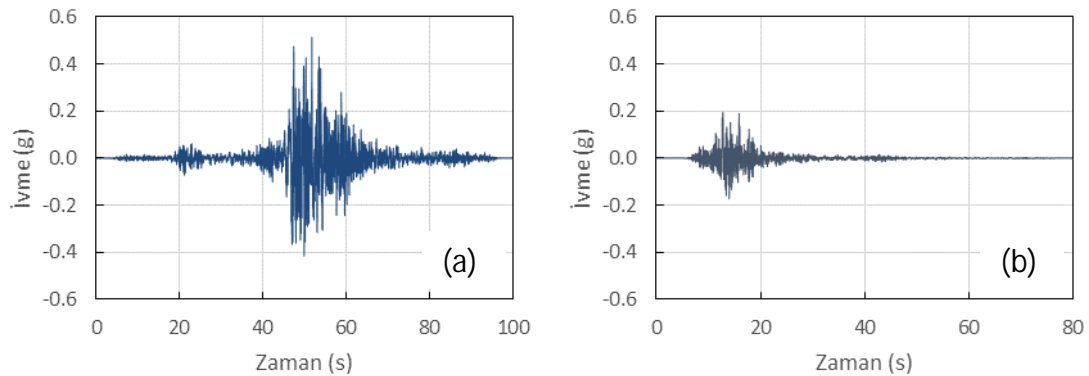
1. Modelin tabanındaki düğümler sadece yerçekimi yönünde sabitlenmiştir. Altındaki elastik yarı-uzay modellemesi için, taban düğümlerinin yatay yönde hareket etmelerine izin verilmesi gerekir. Ancak, bu düğümler yatay hareketler için "equalDOF" komutu kullanılarak kısıtlanmıştır.
2. Boşluk basıncı oluşumunu modellemek için, modelin üst sınırındaki tüm düğümler için 3.serbestlik derecesi sabitlenmiştir. Bu serbestliğin sabitlenmesi, komşu elemanlardaki su için bir drenaj yolu oluşturur ve boşluk suyu basıncında herhangi bir birikim veya değişikliği önler.



Model, yatay yönde geniş bir zemin alanının yalnızca küçük bir kesitini simüle etmektedir. Yatay sınır koşullarını sağlamak için, bu alanlardaki elemanlar (Şekil 1'de gösterilen 15 m genişliğindeki serbest alan sütunları) artan kalınlık verilerek, ağ içindeki elemanlardan önemli ölçüde daha büyük hale getirilmiştir. Aynı derinlikte olan iki düğümün, sismik yüklemeye altında aynı yatay hareketini sağlamak için, bu serbest alan sütunlarının yan sınırlarındaki düğümlere periyodik sınır koşulları uygulanmıştır. Bu nedenle, deprem dinamik yük kaydı modele uygulandığında, bu büyük sütunların tepkisi serbest alan yanıtı olmalıdır. Modelde, yatay yönde 30 m derinlikte bir viskoz sönümleyici (Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969) uygulanmış ve dinamik yük, kuvvete dönüşen bir hız zaman geçmişi olarak uygulanmıştır. Sönümleyici katsayısı,  $c = AV_s\rho$  (Joyner ve Chen, 1975) formülüyle tanımlanır; burada A modelin taban alanı,  $V_s$  kayma dalgası hızı ve  $\rho$  elastik yarı-uzayın yoğunluğudur.

### 2.3. Deprem Kayıtları

6 Şubat 2023'te, yerel saatle 04:14'te, Türkiye'nin güneydoğusundaki Kahramanmaraş bölgesinde güçlü bir deprem meydana geldi. Deprem, 7,8 büyüklüğünde olup, Türkiye tarihinin en önemli sismik olaylarından biri olarak kaydedildi. Olay, uzun süren etkisi ve karmaşık fay mekanizmaları ile, birden fazla fay kırılması gibi özellikleriyle tanımlandı ve büyük hasarlara sebep oldu. Farklı istasyonlardan depremin ivme ölçümleri alındı. Bu çalışmada kullanılan ilk kayıt Antakyada bulunan 3141 No'lu istasyondan (istasyonun bulunduğu zeminin kayma dalgası hızı 338 m/s dir) . alınmıştır. Bu istasyondan yüzeyde alınan kaydın kuzey-güney bileşeninin büyüklüğü  $M_w=7,4$  ve maksimum ivmesi  $a=970$  cm/s<sup>2</sup>'dir. İkinci deprem kaydı, 20.02.2023 tarihinde 6.02.2023 Maraş deprem serisi içinde meydana gelen  $M_w=6,4$  büyüklüğündeki Arsuz depreminin doğu-batı bileşeni olup ve yüzeyde maksimum ivmesi  $a=336$  cm/s<sup>2</sup>'dir (Kaydın alındığı zeminin kayma dalgası hızı 460 m/s dir). Deepsoil programı kullanılarak, yüzeyde ölçülen kayıtlar anakayaya indirilmiştir ve elde edilen kayıtlar nümerik çalışmada kullanılmıştır. Şekil 4 Antakya ve Arsuz depremlerinin ana kaya üzerine indirilmiş kaydını göstermektedir.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan a) Antakya ve b) Arsuz kaydı

### 2.4. Sayısal Çalışmalar

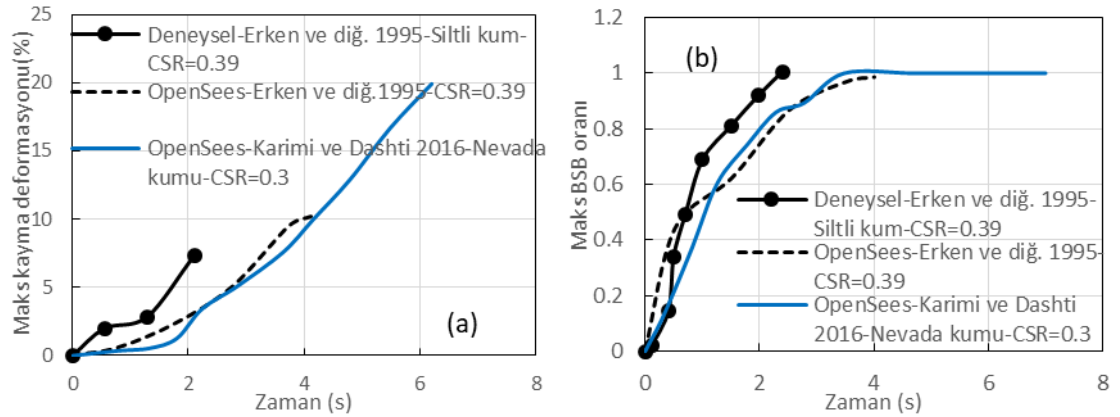


Tablo 2 bu çalışmada analizi yapılan setleri göstermektedir.

Set	Dr (%)	Deprem	Maks. ivme. (g)
1	50	Antakya NS	0.51
2	50	Arsuz EW	0.19

### 3. SAYISAL MODELİN DOĞRULANMASI

Elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının güvenilirliğini kontrol etmek için ilk adımda doğrulama yapılmıştır. Bu kapsamda, deneysel Dinamik Basit Kayma Gerilmesi deneyi (Erken, 1995) sonuçları kullanılmış ve tek bir eleman için modellenmiş ve tekrarlı yükleme altında analiz edilmiştir. Bu çalışmaya göre, Erzincan Havzası'nın kuzeyinde bulunan Ekşisu bölgesinde, 1992 yılında 6.8 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Bu deprem sırasında sıvılaşma gözlenmiştir. Yerinde inceleme ve laboratuvar deneylerini içeren bir araştırma programı yürütülmüştür. SPT ve CPT deneylerini gerçekleştirmek üzere sondajlar yapılmıştır. Zeminlerin dinamik davranışını incelemek için laboratuvar ortamında dinamik basit kesme (CSS) deneyleri yapılmıştır (siltli kum ve siltli toprak örnekleri). Maksimum kesme deformasyonu ve fazla boşluk suyu basıncı oranının ( $r_u$ ) deneysel ve nümerik sonuçları Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilmiştir. Yazarların belirttiğine göre, bu %21 ince daneli içeriğe sahip siltli kumda sıvılaşma 2,4 saniyede gözlemlenmiştir. Kayma deformasyonu ve sıvılaşma için maksimum değere ulaşmada sayısal ve deneysel sonuçlar arasında bir zaman farkı olduğu gözlenmektedir. Bu fark, siltli kumun temiz kumdan daha hızlı sıvılaşığı ve sayısal modellemenin temiz kuma uygun olduğu için bu model kullanılmıştır (Ghabaee ve Erken, 2023).



Şekil 5. a) Maks. kayma deformasyonu b) Maks.  $r_u$

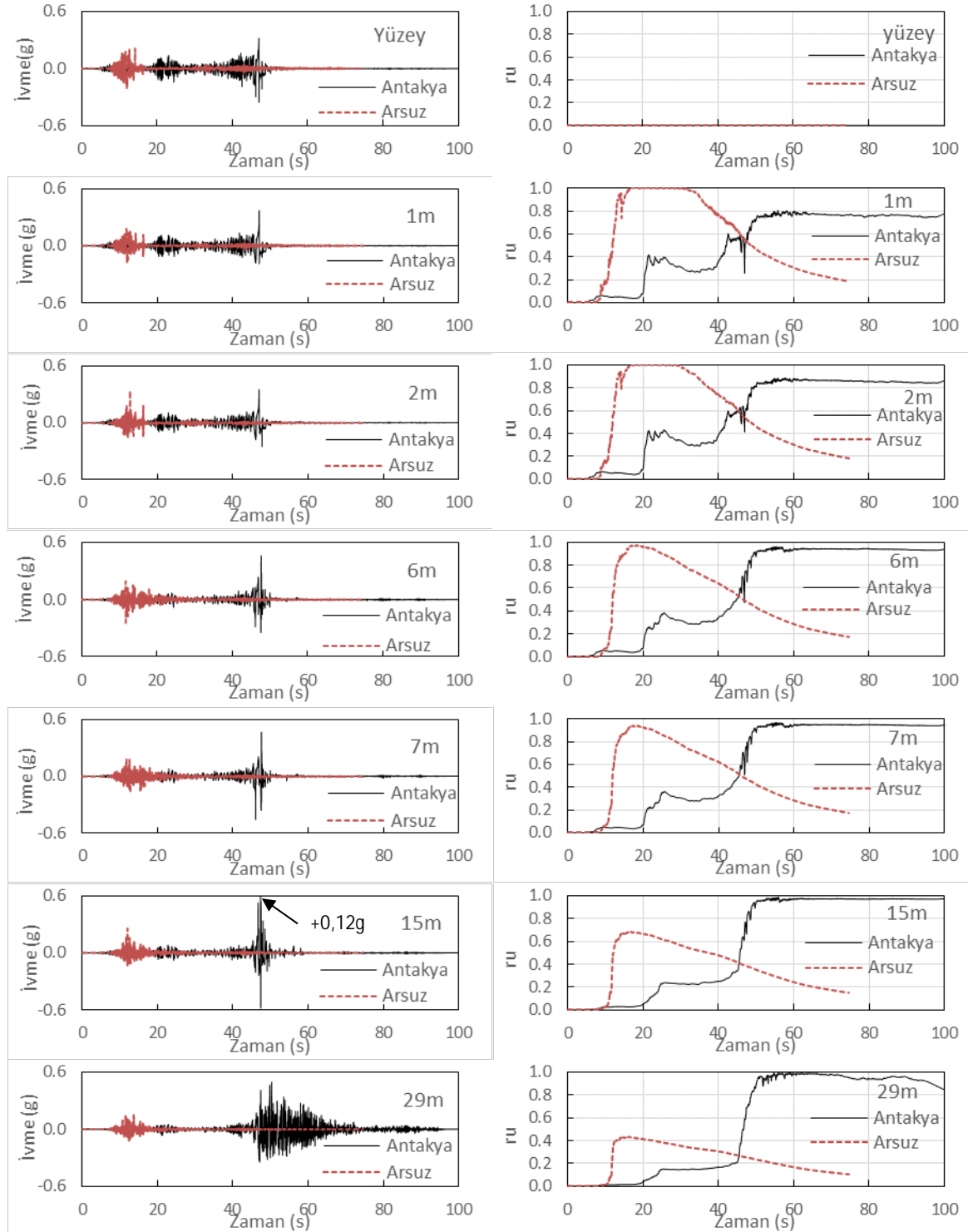
### 4. SONUÇLAR

Bu bölümde, zemin davranışı, zemin yüzeyinden farklı derinliklerde (1 m, 2 m, 6 m, 7 m, 15 m ve 29 m) ivme,  $r_u$ , yatay ve düşey deplasmanlar açısından nasıl bir tepki verdiği, Şekil 1'de gösterilen farklı mesafelerdeki çeşitli kesitlerde verilmiştir. Şekil 6 her iki setin ivme ve  $r_u$ , zaman ilişkisi A-A çizgisi üzerinde göstermektedir. Görüldüğü üzere çoklu fay kırılmasından



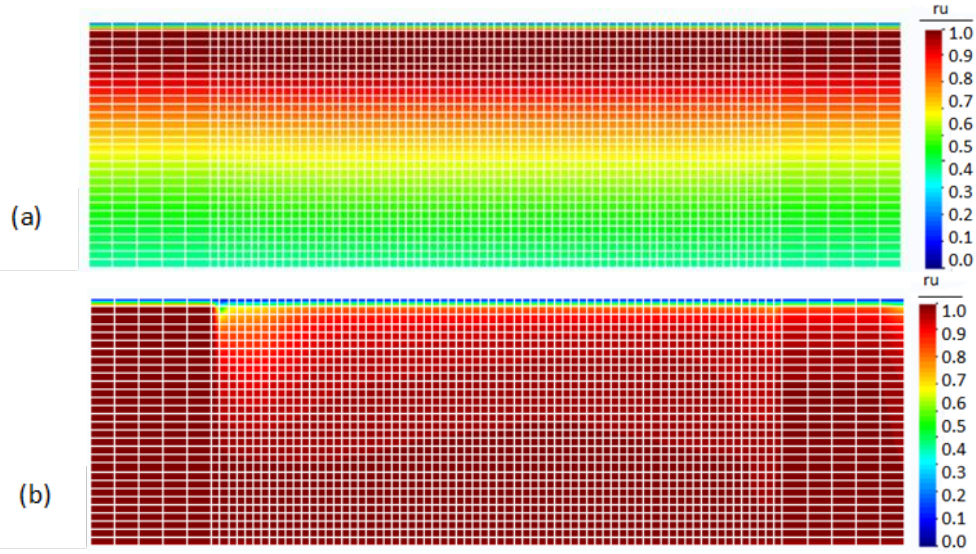


meydana gelen antakya depremi 30 metreye kadar sıvılaşmaya sebep olurken, Arsuz depreminde sıvılaşma 6 metreye kadar meydana gelmiştir. Her iki depremde de  $r_u$  değeri yüzeye yaklaştıkça, su drene olduğu için azalmaktadır ve yüzeyde tamamen sönmülmektedir. Ayrıca görüldüğü üzere Arsuz depremi  $t=19$  s ve Antakya depremi  $t=55$  s de sıvılaşmaya neden olmuştur. Zemin profilinin bu zaman dilimdeki  $r_u$  dağılımı sırayla Şekil 7a ve 7b de net bir şekilde gösterilmiştir.



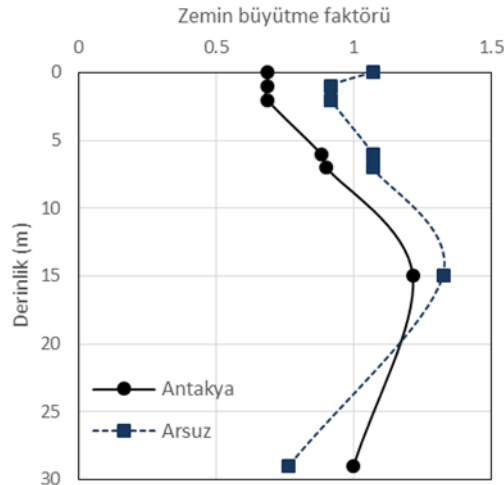
Şekil 6. Set 1 ve 2 a) ivme zaman hikayesi b)  $r_u$  zaman hikayesi





Şekil 7. a) Arsuz depremi t=19 s, b) Antakya depremi t=55 s  $r_u$  dağılımı

Şekil 8 her iki depremin büyütme faktörünü gösterir. Değişik derinliklerdeki maksimum ivmenin tabanda uygulanan maksimum ivmeye bölünerek büyütme oranı elde edilmektedir.

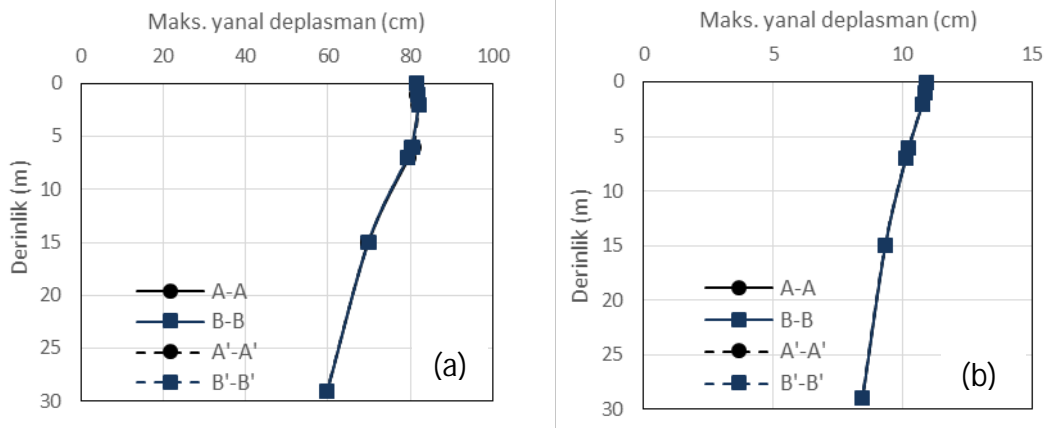


Şekil 8. Set 1 ve 2 kıyaslamaları

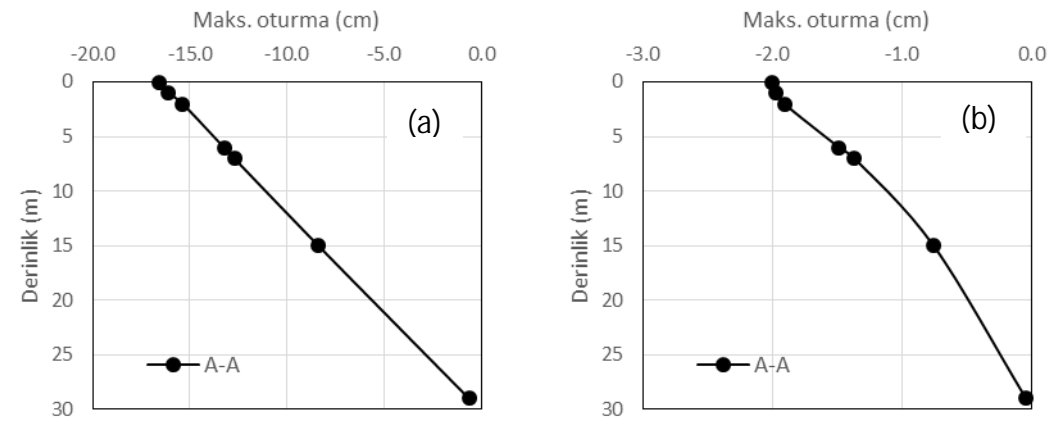
Şekil 9 her iki deprem de meydana gelen yanal deplasmanları gösterir. Bu grafiklere göre her iki deprem de, zemin profili bütün halinde aynı yönde hareket ettiği görülmektedir. Ancak Antakya depremi yüzeyde 80 cm yanal deplasmana sebep olurken Arsuz depreminde yüzeyde 12 cm yanal deplasman meydana gelmiştir. Her iki depremde derinliğin artmasıyla yanal deplasmanın azaldığı görülmektedir. Şekil 10 her iki depremde meydana gelen A-A çizgisi üzerinde farklı derinliklerde meydana gelen maksimum oturmaları göstermektedir. Buna göre Antakya depremi yüzeyde yaklaşık 17 cm oturmaya sebep olurken, Arsuz depremi yüzeyde 2 cm oturmaya neden olmuştur. Her iki depremde de derinlik arttıkça oturma azalmaktadır.







Şekil 9. a) Antakya b) Arsuz depremi maksimum yanar deplasman



Şekil 10. a) Antakya b) Arsuz depremi maksimum oturma

## KAYNAKLAR

- Adampira, M., Derakhshandi, M. "Influence of a layered liquefiable soil on seismic site response using physical modeling and numerical simulation," *Engineering Geology*, 266, 105462, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105462>
- Biot, M., A., 1962 Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *J. Appl. Phys.* 33, 1482-1492
- Boulanger, R. W., and K. Ziotopoulou. 2015. PM4Sand (Version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Rep. No. UCD/CGM-15/01. Davis, CA: Center for Geotechnical Modeling, Univ. of California
- Elgamal, A., E. Parra, Z. Yang, R. Dobry, and M. Zeghal. 1998. "Liquefaction constitutive model." In Proc., Int. Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, edited by P. Lade. Baltimore: A.A. Balkema
- Erken A., Ansal A., et al. (1995) "Liquefaction of Silt and Sand Layers in Ekşisu Erzincan" *Earthquake Geotechnical Engineering*, Ishihara(ed.) Balkema, Rotterdam. ISBN905410578X
- Ghabaee S., Erken A., (2023) "Numeric Study on Effect of Input Motion, Relative Density, Ground Water Table and Underground Structure on Dynamic Behavior of Liquefiable



- Soil," 3rd International Civil Engineering and Architecture Conference, Trabzon, Türkiye
- Joyner, W.B. and Chen, A.T.F. (1975). "Calculation of nonlinear ground response in earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No. 5, pp. 1315-1336, October 1975.
- Karimi, Z., and Dashti, S. (2015a). "Numerical and centrifuge modeling of seismic soil–foundation–structure interaction on liquefiable ground." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001346, 04015061
- Lee KL, Albaisa A. Earthquake-induced settlements in saturated sands. J Geotech Geoenvironme Eng 1974;100:11. Proc Pap 10496
- Lysmer, J. Kuhlemeyer, R.L., 1969. Finite dynamic model for infinite media. J. Eng. Mech. Div. 95 (4), 859-877. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001144>
- McKenna, F., 2011. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. Comput. Sci. Eng. 13 (4), 58-66 <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>
- McKenna, F., Fenves, G.L., 2002. Available online. The OpenSees Command Language Primer. Department of Civil and Environmental Engineering. University of California, Berkeley, CA, USA accessed 25 April 2022.
- Mojtahedzadeh N., Siddharthan R., 2021. Estimating free field seismic settlement history in a saturated layered soil profile J. Soil Dynam Earthq Eng 2021.106937 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106937>
- Ozkula G, Dowell RK, Baser T, Lin J-L, Numanoglu OA, Ilhan O, Olgun CG, Huang C-W, Uludag TD. Field reconnaissance and observations from the February 6, 2023, Turkey earthquake sequence. Nat Hazards 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06143-2>
- Sadeghi H., Pak A., Pakzad A., Ayoubi P., 2021. Numerica-probabilistic modeling of the liquefaction-induced free fields settlement. J. Soil Dynam Earthq Eng 2021. 106868 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106868>
- Shengcong, F., Tatsuoka, F. "Soil liquefaction during Haicheng and Tangshan earthquake in China; A review," Soils and Foundations, 24(4), pp. 11–29, 1984. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.24.4\\_11](https://doi.org/10.3208/sandf1972.24.4_11)
- Yang, Z. (2000). "Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction." Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia Univ., New York.
- Yang, Z., Elgamal, A., and Parra, E. (2003). "Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:12(1119), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:12\(1119\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:12(1119))
- Yang, Z., Lu, J., and Elgamal, A. (2008). "OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements: User's manual." Dept. of Structural Engineering, Univ. of California, San Diego

