

## TAŞ KOLONLARLA GÜÇLENDİRİLEN TABAKALI ZEMİNLERİN DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

### LAYERED SOILS REINFORCED WITH STONE COLUMNS INVESTIGATION OF BEHAVIOR UNDER EARTHQUAKE LOADS

Ferhat ŞAHİNKAYA<sup>1</sup>, Cenk Cuma ÇADIR<sup>2</sup>, Gökhan DEMİR<sup>3</sup>, Zülküf KAYA<sup>4</sup>

#### ÖZET

Son dönemde Geoteknik mühendisliğinde problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biride uygulaması kolay ve diğer yöntemlere göre daha ekonomik olan taş kolon yöntemidir. Ülkemizde yaygın şekilde kullanılan bu yöntemin statik yükler açısından değerlendirilmesi hususunda birçok çalışma yapılmıştır. Ancak deprem gibi sismik bir yük etkisindeki davranışıyla ilgili çalışmalar sınırlı düzeydedir. Dolayısıyla bu çalışmada deprem etkisinde taş kolonlarla güçlendirilen tabaklı zeminlerin davranışı incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, Plaxis 2D programı kullanılarak 32 m derinliğinde ve 60 m genişliğinde iki tabakadan oluşan (kil – kum) zemin modellenmiştir. Zemin modelinde, 100 cm çapında, temel genişliği (B=4m) dikkate alınarak 4B uygulama derinliğinde ve farklı s/D (2, 3) aralıklarında taş kolonlar oluşturulmuştur. Yapılan dinamik analizlerde Loma Prieta (1989) depreminin Gilory İstasyonu'ndan alınan ivme-zaman kaydı kullanılmıştır. Analizler sonucunda, taş kolonlar ile güçlendirilen zemin modellerinde, düşey deplasmanların azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak taş kolonların depreme karşı etkili bir iyileştirme yöntemi olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin Güçlendirme, Deprem etkisi, Sonlu elemanlar, Yumuşak zeminler, Taş kolonlar

<sup>1</sup> Arş. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, ferhat.sahinkaya@yobu.edu.tr (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> Arş. Gör., Yozgat Bozok Üniversitesi, cenk.cadir@yobu.edu.tr

<sup>3</sup> Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, gokhan.demir@omu.edu.tr

<sup>4</sup> Doç. Dr., Erciyes Üniversitesi, zkaya@erciyes.edu.tr

## ABSTRACT

Recently, many methods have been used to improve problematic soils in geotechnical engineering. One of these methods is the stone column method, which is easy to apply and more economical than other methods. Numerous studies have been conducted to evaluate this method, which is widely used in our country, in terms of static loads. However, studies on the behavior under seismic loading, such as an earthquake, are limited. Therefore, this study aims to investigate the behavior of stratified soils reinforced with stone columns under the action of earthquakes.

In this study, a 32 m deep and 60 m wide soil consisting of two layers (clay - sand) was modeled using Plaxis 2D program. In the soil model, stone columns with a diameter of 100 cm, 4D application depth and different s/D (2, 3) intervals were created considering the foundation width (B=4m). The acceleration-time record of the Loma Prieta earthquake (1989) from Gilroy Station was used for the dynamic analysis. As a result of the analyzes, it was found that the vertical displacements decreased for the soil models reinforced with stone columns. As a result, it was concluded that stone columns are an effective method for earthquake restraint.

**Keywords:** *Soil Reinforcement, Earthquake effect, Finite elements, Soft soils, Stone columns*

## 1. GİRİŞ

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında deprem etkisindeki deplasmanların belirlenmesinde genel olarak harmonik (tekrarlı) kullanıldığı görülmektedir. Bu yaklaşımda sabit bir frekans kullanılarak depremin etkisi simüle edilmektedir. Bu çalışmada ise Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak 1989 yılında meydana gelen Loma Prieta olarak bilinen gerçek bir depremin ivme kaydı, model tabanından etki ettirilerek deprem sırasında meydana gelen deplasmanların zamana bağlı olarak nasıl değiştiği belirlenmiştir.

Kholdebarin et al. (2008, 2016), çimento ile geliştirilmiş killi-kum zemin üzerine inşa edilmiş bir şerit temel altındaki sismik taşıma kapasitesini iki boyutlu sonlu farklar yöntemini (FDM) kullanarak incelemişlerdir. Sonuç olarak çimentonun %2, %4 ve %6 eklenmesinin sismik taşıma kapasitesini sırasıyla %270, %140 ve %176 oranında artırdığını göstermişlerdir.

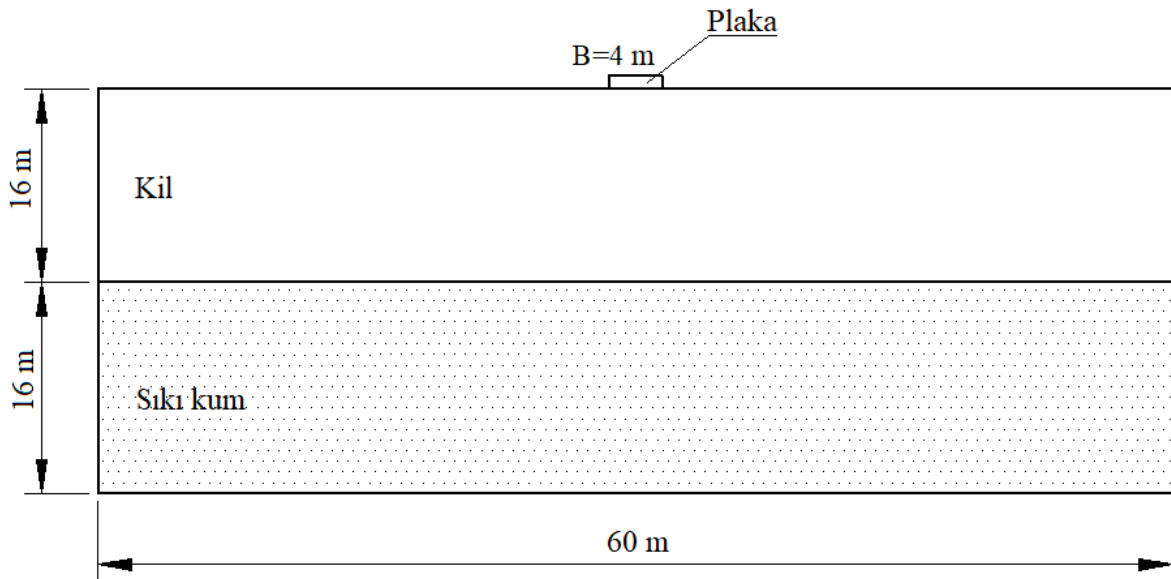
Vivek (2011), birbirine yakın bir şekilde konumlandırılmış iki şerit temel arasındaki boşluk miktarının, sismik oturma üzerindeki etkisini incelemiştir. Karamitros et al. (2013 a, b, c) sıvılaştırılabilir bir kil tabakası üzerine inşa edilmiş bir şerit temelin sismik oturma, sismik sıvılaşma ve taşıma kapasitesi kayıplarını incelemiştir. Azzam (2015), bir şev üzerine inşa edilmiş bir temelin sismik yer değiştirmesi üzerinde eteklerin etkisini araştırmış ve eteklerin varlığının sismik yer değiştirmeyi azalttığı sonucuna varmıştır. Ghayomi ve Dasht (2015), kuru kum üzerine inşa edilmiş çok katlı bir binanın deprem karakteristiğinin etkisini küçük ölçekli sarsma tablası testleri kullanarak incelemiştir. Mansur et al. (2016), doygun bir kum üzerine oturan sığ bir temelin, deprem sırasındaki taşıma gücünü incelemiştir. Çalışmasında, gömülme derinliğinin kumun bağlı yoğunluğunun, şerit temelin genişliğinin ve en yüksek zemin ivmesinin, sonuca olan etkisi üzerinde odaklanmıştır. Nguyen et al. (2016), 50 kPa drenajsız kesme dayanımına sahip yumuşak killi zemin

üzerine oturan betonarme çok katlı bir binanın sismik davranışına temel boyutunun etkisini incelemiştir. Bu çalışmaların tamamı, deprem sırasında yumuşak bir kil zeminde meydana gelen yüksek miktardaki deplasman ve taşıma gücü kayıplarını işaret etmektedir.

Sadeghi vd. (2020), Kanada Geoteknik Topluluğu'nda yaptıkları bir çalışmada, deprem sonrası Amerikan Petrol Enstitüsü'ne ait yumuşak zemin bulunan bir bölgede yer alan yakıt tanklarında, taşıma gücü kaybı sebebiyle yüksek miktarda deplasman meydana geldiğini gözlemlemiştir. Daha sonra bölgenin zemin parametreleri kullanılarak, ABAQUS programında oluşturulan modeller, farklı çap, farklı aralık ve farklı derinliklerde taş kolonlarla iyileştirilerek, 2003'te meydana gelen Bam depremi etkisinde analiz edilmiştir. Sonuç olarak taş kolonların olası bir deprem sırasında meydana gelebilecek taşıma gücü kayıplarını engelleyerek, deplasman miktarını ortalama %52 olmak üzere %80'e varan oranlarda azalttığı belirlenmiştir.

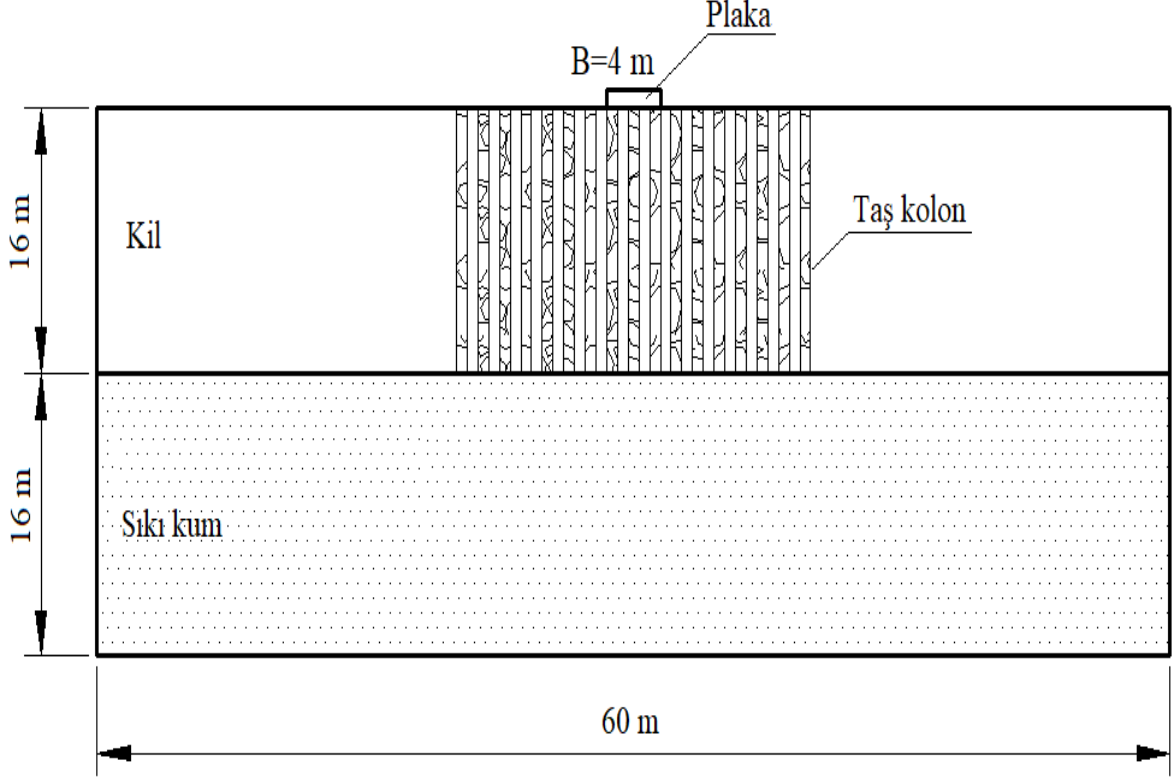
## 2. ZEMİN MODELİ

Sayısal analizlerde zemin modelinin boyutu hakkında literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle deprem etkisi altında yapılan dinamik analizlerde zemin modelinin boyutları büyük önem arz etmektedir. Derinlik ve genişliğin belirli ölçülerin altında seçilmesi analiz sonucunu doğrudan etkilemektedir. Nitekim bu konuda (Alzabeebee, 2020) yapılmış bir çalışmada zemin genişliğinin deprem sırasında meydana gelen oturma üzerindeki etkisi araştırılmış ve 40 m genişliğin altındaki değerlerde oturma miktarının azalarak hatalı sonuçlar bulunmasına sebep olduğu görülmüştür. 80 m genişlik ile yapılan analizlerde ise elde edilen oturma miktarının 40 m ile aynı olduğu gösterilmiştir. Bu ve benzer çalışmalarda göz önünde tutularak analizlerde kullanılan zemin modelinin genişliği 60 m derinliği ise 16 m yumuşak kil, 16 m çok sıkı kum olmak üzere toplamda 32 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca yükün zemine düzgün bir şekilde aktarılması için modelin ortasına 4 m genişliğinde plaka temel yerleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan zemin modeli Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Taş kolonsuz zemin modeli

Taş kolonsuz zeminlerin analizlerinin tamamlanmasının ardında zemine 100 cm çapında temel genişliğinin 4 katı kadar (4B) derinlikte ve taş kolonların merkezleri arası mesafenin (s), taş kolonların çapına (D) oranı 2 ve 3 ( $s/D=2$ ,  $s/D=3$ ) olacak şekilde iyileştirme yapılmıştır. Bu iyileştirme sayesinde temelden gelen yük 16 m derinliğindeki problemlili zemin tabakasından, hemen altta yer alan çok sıkı kum tabakasına aktarılmıştır. Şekil 2’de taş kolonlu zemin modeli görülmektedir.



Şekil 2. Taş kolonlu zemin modeli

Plaxis 2D sonlu elemanlar programında hali hazırda kullanılan 11 adet malzeme modeli bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları, Linear Elastic model (LE), Mohr-Coulomb model (MC), Hardening Soil model (HS), Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall), Soft Soil model (SS), Soft Soil Creep model (SSC), Jointed Rock model (JR) ve Modified Cam-Clay model (MCC) modelleridir.

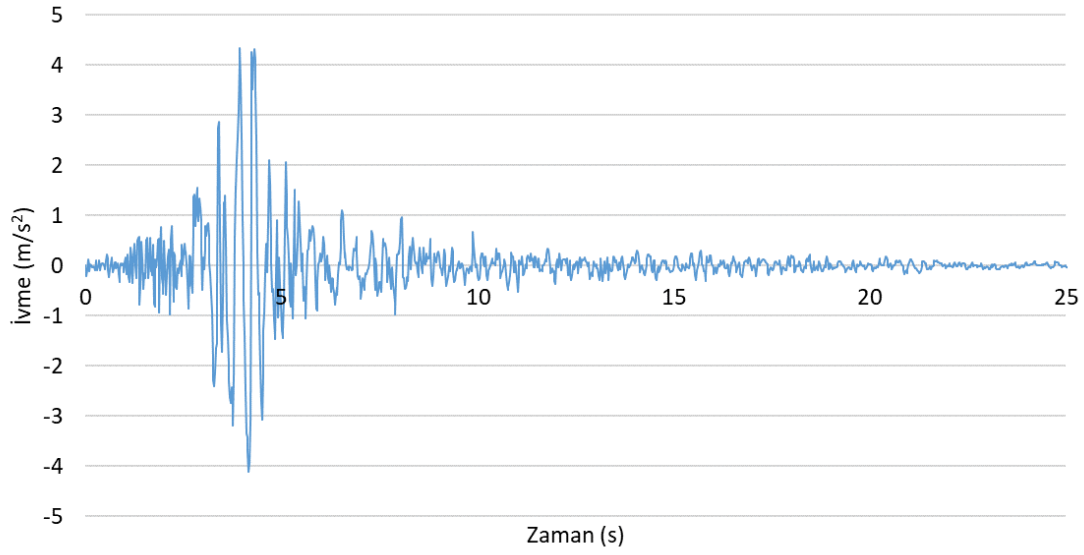
Bu çalışmada, zemine zamana bağlı bir ivme uygulanarak deprem simüle edileceği için ve bu analiz sırasında zeminin sönümlenmesine ihtiyaç duyulacağı için oluşturulan modellerde HSsmall malzeme modeli kullanılmıştır. Zemin sönümlenmesi, genel olarak radyasyon sönümlenmesi ve histeretik (malzeme) sönümlenme olarak ikiye ayrılabilir. Bunları ayırmak zordur, ancak PLAXIS'in sonlu eleman modellemesi sayesinde radyasyon sönümlenmesinin açıklandığını rahatlıkla söyleyebiliriz. Öte yandan, histeretik sönümlenme, elastik ve plastik gerilmeler ile daha da detaylandırılabilir. Zemin modelleri (LE hariç), gerilme noktaları, dinamik hesaplamalarda sönümlenmeye yol açacak şekilde (ilgili zemin modelinin) hata kriterine ulaşırsa plastik gerilmeler oluşturulabilir. Kısacası, HSsmall modeli, modül indirgeme eğrilerinin yardımıyla dinamik uygulamada histeretik sönümlenmeyi modelleme yeteneğine sahiptir (Raikar, 2016). Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri

| Parametre (HSsmall)                                                                             | Kil                   | Sıkı kum              | Taş kolon            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Drenaj Durumu                                                                                   | Drenajsız             | Drenajlı              | Drenajlı             |
| Kuru Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )                                       | 16                    | 20                    | 21                   |
| Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )                                | 20                    | 20                    | 21                   |
| Permabilite, $k_x, k_y$ (m/gün)                                                                 | $1 \times 10^{-8}$    | 5                     | 50                   |
| Drenajlı üç eksenli deneylerle elde edilen sekant rijitliği, $E_{50ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )   | 5000                  | $30 \times 10^3$      | $30 \times 10^3$     |
| Drenajlı odömetre deneyleriyle elde edilen tanjant rijitliği, $E_{oedref}$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 7795                  | $36 \times 10^3$      | $30 \times 10^3$     |
| Elastik yükleme/boşaltma rijitliği, $E_{urref}$ (kN/m <sup>2</sup> )                            | $22,84 \times 10^3$   | $110,8 \times 10^3$   | $90 \times 10^3$     |
| Zeminin gerilme bağımlı sertliği, power (m)                                                     | 1                     | 0,5                   | 0,5                  |
| Poisson Oranı, $\nu$                                                                            | 0,2                   | 0,2                   | 0,2                  |
| Kohezyon, $c$ , (kN/m <sup>2</sup> )                                                            | 10                    | 5                     | $1 \times 10^{-8}$   |
| İçsel Sürtünme Açısı, $\phi$ (°)                                                                | 18                    | 28                    | 35/40/45             |
| Toprak Basıncı Katsayısı, $K_{0nc}$                                                             | 0,65                  | 0,53                  | 0,43                 |
| Maksimum kayma modülü, $G_{0ref}$                                                               | $9 \times 10^4$       | $1 \times 10^5$       | $2,5 \times 10^5$    |
| Kayma birim deformasyonu, $\gamma_{07}$                                                         | $0,12 \times 10^{-3}$ | $0,15 \times 10^{-3}$ | $4,6 \times 10^{-5}$ |

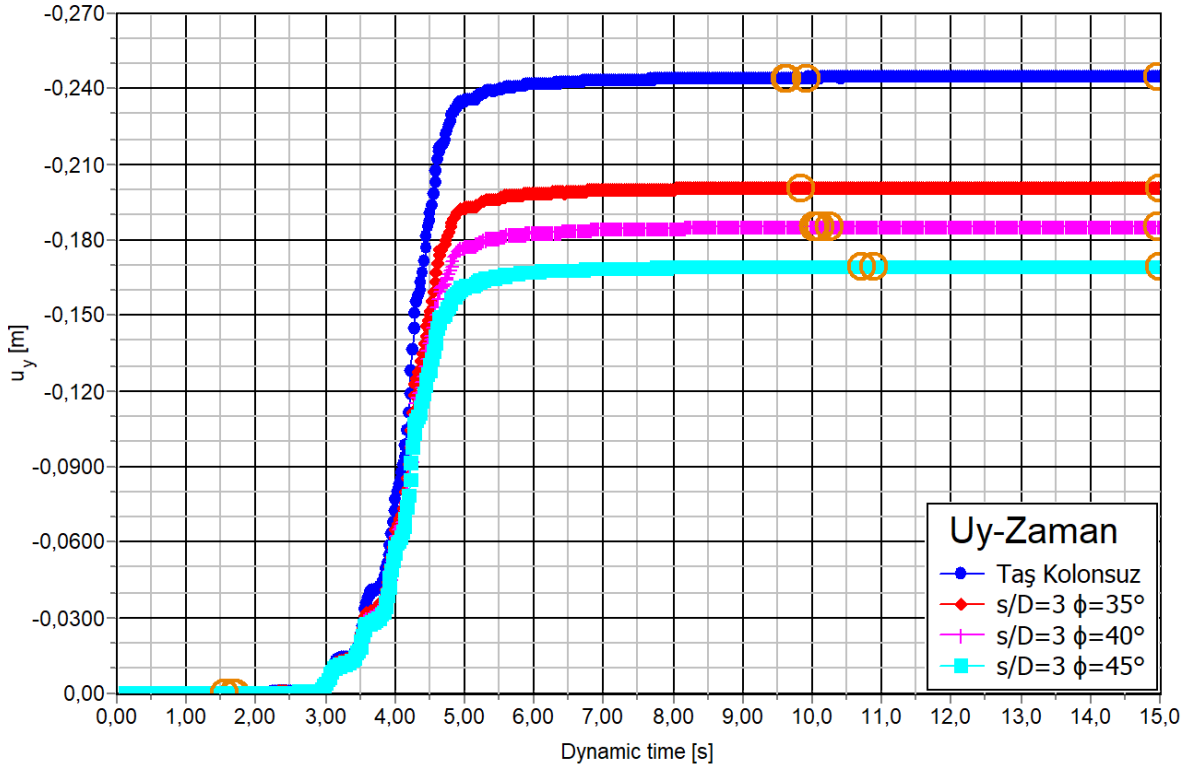
### 2.1. Sonlu Elemanlar Analizi

İlk olarak taş kolonsuz zemin modeline 0,1 m miktarında statik bir deplasman yükü uygulanarak limit taşıma gücü değeri hesaplanmıştır. Yapılan bu analizde taş kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü 112,5 kN/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Statik yüklemelerden sonraki aşamada taş kolonsuz zeminin taşıma gücü değeri, zemin modellerine yayılı yük uygulanmış ve Loma Prieta depremi etkisinde dinamik analizler yapılmıştır. Taş kolonlu zemin modellerinin dinamik analizleri, taş kolonların içsel sürtünme açısı  $\phi=35^\circ$ ,  $40^\circ$  ve  $45^\circ$  olarak değiştirilerek tekrar edilmiştir. Böylelikle analizler sonucunda taş kolonlar arası mesafenin ve taş kolon malzemesinin, sabit bir yük altında bir deprem sırasında, deplasmanları hangi oranda azalttığı belirlenmiştir. Dinamik analizlerde kullanılan Loma depremine ait ivme zaman grafiği Şekil 3'te görülmektedir. Depremi ilk 15 saniyesinden sonra sonuçlarda herhangi bir değişiklik olmaması sebebiyle ve analiz sürelerinin kısaltılması amacıyla dinamik analizlerde depremin ilk 15 saniyelik kısmı kullanılmıştır.

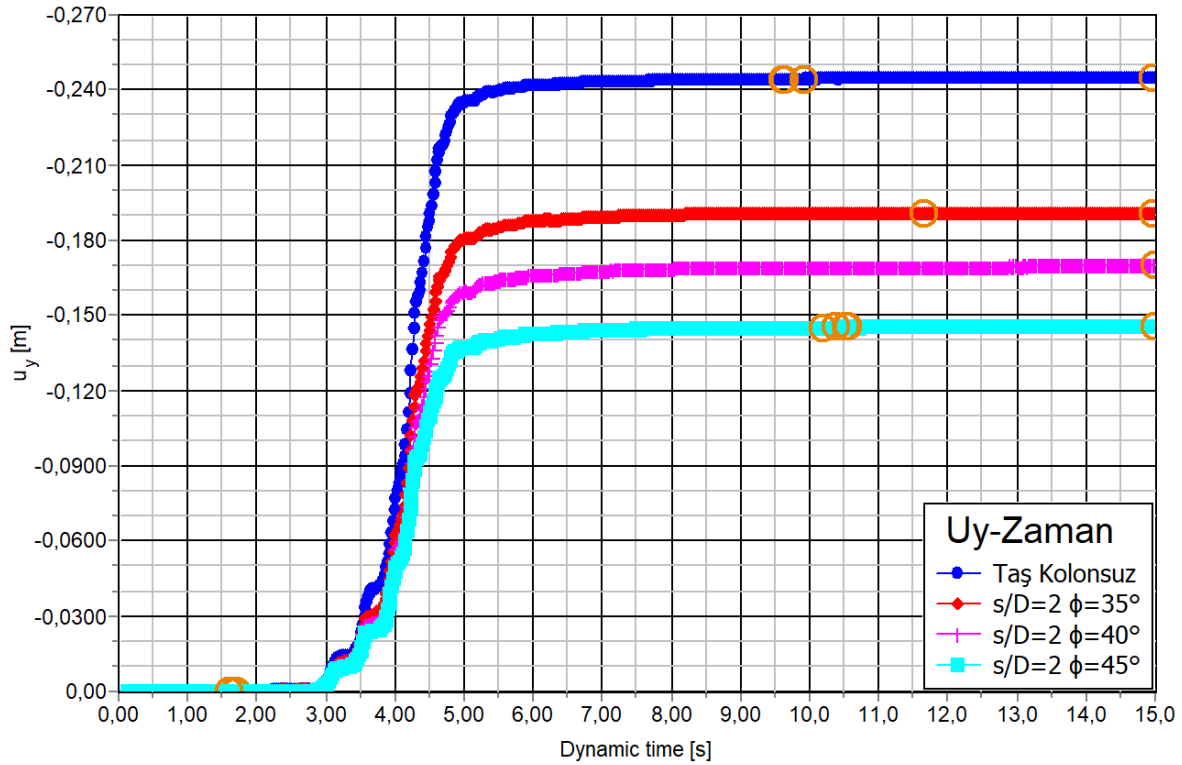


Şekil 3. Loma Prieta depremi ivme-zaman grafiği.

Loma Prieta depremi etkisinde yapılan dinamik analizlerden elde edilen zamana bağlı  $y$  eksenindeki deplasmanlar ( $U_y$ ),  $s/D=3$  ve  $s/D=2$  aralıklarıyla uygulanmış taş kolonlar için, içsel sürtünme açısının değişimine bağlı olarak sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4.  $U_y$ -Zaman değişimi ( $s/D=3$ )

Şekil 5.  $U_y$ -Zaman değişimi ( $s/D=2$ )

### 3. SONUÇLAR

Şekil 4 ve Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde taş kolonsuz zemin modeliyle 112,5 kN/m<sup>2</sup>'lik yayılı etkisinde, Loma Prieta depremi kullanılarak yapılan dinamik analizlerde, temelin orta noktasında 24,5 cm'lik deplasman meydana gelirken, aynı yük ve deprem etkisinde,  $s/D=3$  aralıklarla uygulanan taş kolonlarla yapılan analizlerde, içsel sürtünme açısına bağlı olarak (35°, 40°, 45°) temelin orta noktasında sırasıyla 20,1 cm, 18,5 cm ve 17 cm'lik deplasmanlar meydana gelmiştir. Aynı yük ve deprem etkisinde  $s/D=2$  aralıklarla uygulanan taş kolonlarla yapılan dinamik analizlerde ise, içsel sürtünme açısına bağlı olarak (35°, 40°, 45°) temelin orta noktasında sırasıyla 19,1 cm, 17 cm ve 14,5 cm'lik deplasmanlar meydana gelmiştir. Taş kolonlar arası mesafe  $s/D=3$  iken, deprem sırasında meydana gelen deplasman miktarı, taş kolonsuz zemine göre ortalama %24,5 azaltırken, taş kolonlar arası mesafe  $s/D=2$  iken, deplasman miktarı taş kolonsuz zemine göre ortalama %31,4 azaltmıştır. Taş kolonların içsel sürtünme açısındaki artışa bağlı olarak ise, deplasman miktarları  $s/D=3$  aralık için ortalama %8 azalırken,  $s/D=2$  aralık için ortalama %13 azalmıştır. Taş kolonlar arası mesafe azalırken, içsel sürtünme açısındaki artışın, deplasman miktarının azalmasına olan etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. En başarılı sonuç,  $s/D=2$  aralıklarla uygulanan ve içsel sürtünme açısı 45° olan taş kolonlarla iyileştirilen zemin modelinden elde edilmiştir. Bu modelde, taş kolonsuz zemin modeline göre temelin orta noktasında meydana gelen deplasman miktarı %40,8 oranında azalmıştır. Bu durum, taş kolon uygulamalarında, taş kolonlardan istenen performansın alınabilmesi için aralık ve malzeme seçiminin büyük önem arz ettiğini göstermektedir. Sonuç olarak taş kolonların, olası bir deprem sırasında uygulandıkları bölgede meydana gelebilecek deplasmanları azalttığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Alzabeebee, S. (2020). Seismic settlement of a strip foundation resting on a dry sand. *Natural Hazards*, 103, 2395–2425. University of Al-Qadisiyah, Al-Qadisiyah, Iraq.
- Azzam, WR. (2015). Finite element analysis of skirted foundation adjacent to sand slope under earthquake loading. *HBRC J* 11(2):231–239
- Elshehahwy ER., Eltahrany A., Dif A. (2019). Numerical analysis validation using embedded pile. *GeoMEast 2018, SUCI*, pp. 199–208. Springer Nature Switzerland.
- Ghayoomi, M., Dashti, S (2015). Effect of soil motion characteristics on seismic soil–foundation–structure interaction. *Earthquake Spectra*. 31(3):1789–1812
- Karamitros, DK., Bouckovalas, GD., Chaloulos, YK. (2013). Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*. 46:64–76
- Karamitros, DK., Bouckovalas, GD., Chaloulos, YK. (2013). Insight into the seismic liquefaction performance of shallow foundations. *J Geotech Geoenvironment Engineering*. 139(4):599–607
- Karamitros, DK., Bouckovalas, GD., Chaloulos, YK., Andrianopoulos, KI. (2013). Numerical analysis of liquefaction-induced bearing capacity degradation of shallow foundations on a two-layered soil profile. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*. 44:90–101
- Kholdebarin, A., Massumi, A., Davoodi, M., Tabatabaiefar, HR. (2008). Comparing of normal stress distribution in static and dynamic soil–structure interaction analyses. In: *AIP conference proceedings*, pp 650–657
- Kholdebarin, A., Massumi, A., Davoodi, M. (2016). Seismic bearing capacity of shallow footings on cementimproved soils. *Earthquake Structure*. 10(1):179–190
- Mansour, MF., Abdel-Motaal, MA., Ali AM. (2016). Seismic bearing capacity of shallow foundations on partially liquefiable saturated sand. *International Journal of Geotechnical Engineer*. 10(2):123–134
- Nguyen, QV., Fatahi, B., Hokmabadi, AS. (2016). The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil–foundation–structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics*. 58(6):1045–1075
- Raikaar P. (2016). Modelling Soil Damping for Suction Pile Foundations. Master of Science Thesis, Delft University of Technology.
- Sadeghi, H., Motlagh, A. H. and Sadeghi, H. (2020). Seismic performance of circular foundations resting on stone columns. *GeoVirtual 2020 - Resilience and Innovation*, The Canadian Geotechnical Society.
- Vivek, P. (2011). Static and dynamic interference of strip footings in layered soil. Master Thesis. Indian Institute of Technology Kanpur, India.