

## YÜZEYSEL TEMELLİ YAPI GRUBUNDA YAPI ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

### ANALYSIS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION BY FINITE ELEMENTS METHOD

Hüseyin Mungan 

Öğr. Gör., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak MYO,

İnşaat Bölümü, / Zonguldak, Türkiye

Ayşe Bengü Sünbül Güner 

Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü /  
Zonguldak, Türkiye

Hasan Özkaynak 

Doç. Dr., Beykent Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul /  
İstanbul, Türkiye

Geliş Tarihi / Received: 10.11.2020  
Kabul Tarihi / Accepted: 25.12.2020

Araştırma Makalesi/Research Article  
DOI: 10.38065/euroasiaorg.358

### ÖZET

Bu çalışmada 4 katlı yüzeysel temelli bir yapı grubu ele alınarak, statik ve dinamik etkiler altındaki davranışı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İncelenen yapı grubu, zemin iyileştirmeli ve zemin iyileştirmesiz durumları için sistematik bir şekilde; düşey yükler altında statik olarak, iki farklı deprem ivme kaydı etkisinde dinamik olarak analiz edilmiştir. Çalışma alanında yapılan geoteknik incelemeler ve belirlenen zemin parametreleri; yapı gurubunun bulunduğu bölgenin sıvılaşma potansiyeli yüksek ve aşırı deformasyonların oluşabileceği bir zemin olduğunu göstermektedir. Zeminin bu özelliklerine göre, çalışma alanında *Darbeli Kırmataş Kolon (DKK)* ve *Jet Grout (JG) kolonu* iyileştirme yöntemlerinin uygulanması öngörülmüştür. Zemin iyileştirmesi uygulanmadan önce yapılan statik analiz çalışmasına göre, düşey yük etkileri altında yapının temel seviyesinde yapısal hasara neden olabilecek önemli düşey deformasyonlar gözlenmiştir. Sayısal analizlere göre zemin iyileştirme yöntemleri olarak, DKK ve JG kolonu yöntemi kullanılması halinde; yapının temel seviyesinde oluşan düşey deformasyonların sırasıyla %30 -%60 oranında azaldığı görülmüştür. Dinamik analizler, DKK ve JG kolonu uygulamaları için, yapının tepe noktasında oluşan yatay yer değiştirmelerin sırasıyla %70-75 ve % 65-75 oranlarında azaldığı görülmüştür. Bu çalışmada önerilen zemin iyileştirme yöntemleri, incelenen yapı grubunda statik veya dinamik yükleme durumlarında oluşabilecek yatay yer değiştirmeleri önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** sonlu elemanlar metodu, yapı zemin etkileşimi, statik analiz, dinamik analiz

### ABSTRACT

The use of local soil parameters obtained from the field survey provides a good estimation of structural behaviour under the effects of actual loads during the numerical analysis of structure-soil interactions. The group of structures were systematically investigated under the effects of static and dynamic loads considering with/without ground improvements by using finite element method (FEM). According to the soil properties, application of Ramped Aggregate Piers (RAP) and Jet Grouting (JG) column ground improvement methods were proposed for the case study area. The numerical analysis concludes that the vertical deformations could be decreased by 30% to 60% by the application of RAP and JG columns, respectively. Dynamic analyses showed that for the cases of RAP and JG column applications; lateral top displacements were decreased by 70-75% and 60-65%, respectively. Finite elements analysis showed that the ground improvement methods have

positive effects in decreasing the deformations through structure-soil interaction and improve the structural behaviour in terms of lateral displacements.

**Keywords:** finite element method, soil-structure interaction; static analysis; dynamic analysis

## 1. GİRİŞ

Türkiye bina deprem yönetmeliği (2018)'de deprem bölgelerinde yapılacak binaların zemin ve yapı karakterlerine göre nasıl tasarlanacağı ve yapıların herhangi bir deprem yükü altında nasıl bir davranışa maruz kalacağı ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır (TBDY - 2018).

Bu yönetmelik kapsamında binaların taşıyıcı sistemlerinin hesabı, depremlerin sadece yatay doğrultudaki etkileri kullanılarak oluşturulur. Ancak gerçekte depremin yatay etkisi yanında düşey etkisinin de yapılarda hasara neden olduğu yapılan çalışmalarla bilinmektedir (Mitchell et al. 1998). Depremde oluşan kuvvetli yer hareketinin yapı hasarları üzerindeki etkisinin yerel zemin şartlarına bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir (Seed et al. 1971, Seed 1969). Günümüzde geoteknik modelleme imkanlarının gelişmesiyle hem statik hem dinamik durum için zemin ile yapı birlikte analiz edilerek, depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunda daha doğru hesaplar yapılması sağlanmaktadır. Ishihara (1996), statik ve dinamik yükler etkisinde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ve deformasyon özelliklerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir.

Laman (2009), yumuşak kil zeminler üzerine inşa edilen yüzeysel temeller altına yerleştirilen farklı kalınlıktaki stabilize granüler dolgu tabakasının taşıma kapasitesine etki eden parametreleri araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizler yapmıştır. Deprem etkisi altında üst yapı-temel-zemin ortamı arasındaki dinamik etkileşim konusunda detaylı bir literatür çalışması hazırlamıştır. Stewart et al. (1999), mevcut zemin-yapı etkileşimi problemleri ve analiz yöntemlerini belirlemiş ve sismik yapı davranışına etki eden içsel zemin yapı etkileşimi parametrelerini değerlendirmiştir. Deprem yükleri altında yüzeysel temellerin göçme mekanizması açısından Adapazarı ve çevresinde büyük hasarlara neden olmuş 1999  $M_w=7.4$  Marmara depremi sonrası araştırılmıştır. Bu depremde hasar tespit çalışmaları; bu bölgede zemin koşullarına bağlı olarak farklı oturmalar, yerinden çıkma veya zemine batma gibi yapısal hasarlar oluştuğunu göstermiştir (Knappett et al. 2006). Bu tip hasarların gözlemlendiği yapılar genellikle temelleri 1-1.5 m. derinlikte ölçülen yüzeysel temelli yapılar olmuştur.

Deprem sırasında oluşabilecek bu tür yapısal davranışlar ve davranışlara sebep olan etkenlerin tespiti ve gerçekçi parametreler yardımıyla modellenmesi yapı-temel-zemin davranışının ayrıntılı analizini mümkün kılar. Gerçekçi parametrelerle oluşturulan yapı-zemin sayısal modeli gerçek deprem kaydı etkisinde analiz edilerek binanın dinamik davranışı belirlenir ve yapılarda meydana gelebilecek dinamik hareketler analiz edilebilir.

Adapazarı ili 22 mm/yıl hareketi ile Türkiye'nin en aktif fay zonu olan Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) batı kesiminde yer almaktadır, (Reilinger et al. 2006). Bölgenin depremselliği ile ilgili KAFZ üzerinde  $M_w>6.7$  olan on adet depremin birbirleri ile etkileşimlerini Coulomb gerilme analizi ile modelleyerek olasılık hesabı yapılmıştır. (Stein et al. 1997). Bu hesaba göre KAFZ üzerinde depremler çok kısa aralıklarla oluşmakta ve birbirlerini tetiklemektedir. Bunun yanında bu zonun batı bölümünde herhangi bir  $M_w>6.7$  depremin meydana gelme olasılığı 30 yıl için %12 olarak hesap edilmiştir. Bu çalışma yayımlandıktan kısa bir süre sonra Marmara bölgesini etkileyen 1999 depremi meydana gelmiştir.

Olasılık hesapları kapsamında, Adapazarı ve çevresinde bir deprem oluşma ihtimali zaman ile artmaktadır (Stein et al. 1997). Günümüzde ise deprem olasılık hesaplamaları Marmara bölgesinin geneli üzerine yoğunlaşmıştır (Murru et al. 2016).

Bu bölgede yeni yapılacak yapılar ve depremi orta hasar ile atlatıp, onarım-güçlendirme işlemleri sonrası kullanımına devam edilen mevcut yapılar için, olası büyüklükteki deprem davranışının modellenmesi önemlidir. Bu çalışma kapsamında; Adapazarı Zemin profilini temsil eden bir mahalle inceleme alanı olarak kabul edilmiş ve bu alanda yer alan 1999 depreminde hasar görmüş yüzeysel temelli bir yapı grubu sonlu elemanlara dayalı programda 2 boyutta modellenmiştir. Aynı zamanda gerçek deprem kaydı kullanılarak deprem sırasındaki davranışı analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak; gerçek durum ve model simülasyonu sonuçları karşılaştırılarak yapı davranışına etki eden unsurlar tartışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde birçok geoteknik problemin çözümünde kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Bu yöntem, mühendisliğin çok geniş bir alanında sınır değer problemlerine (*katı cisim mekaniği, termoelastite, termodinamik, akışkanlar mekaniği, magnetizma vb*) uygulanabilmektedir. Karmaşık sınır koşulları ve lineer olmayan malzeme davranışını modellemeye uygun ve homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlama yöntemidir. Bu çalışmada da depremde oluşan zamana bağlı yer değiştirme değerleri, Plaxis 2D programı dinamik modülü yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir (Brinkgreve et al. 2005, Plaxis 2D 2016).

### 2.2. Rijit Kolonlar

Günümüz geoteknik modelleme çalışmalarında hem statik hem dinamik durum için zemin ve yapı birlikte analiz edilerek, depreme dayanıklı yapı tasarımı konusunda daha gerçekçi hesaplar yapılması sağlanmaktadır. Bu çalışmada, hem statik hem de dinamik yükler etkisi altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve deformasyon özellikleri sonlu eleman modelleri ile analiz edilerek daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. Çalışmada, Aydın İli Germencik ilçesindeki Jeotermal Enerji Santrali zemin etüdü raporundaki geoteknik veriler kullanılarak, elverişsiz zemin koşullarında, rijit kolonların statik ve dinamik davranışları sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis 2D programı kullanılarak analiz edilmiştir.

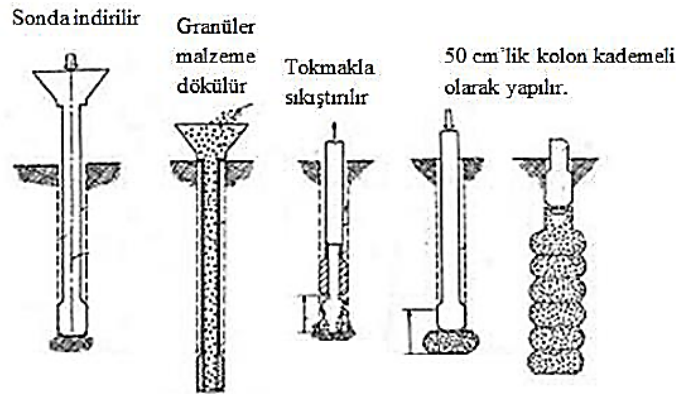
#### 2.2.1. Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK)

Taş kolon yöntemi ilk defa 1930'lu yıllarda Almanya'da ortaya çıkmış olup, Türkiye'de son 10 yıl içerisinde kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye'de ilk defa taş kolon uygulaması zemin iyileştirme kapsamında kullanılmış olup, dane boyutu 10-100 mm arasında değişen ince dane oranı %5' ten az olan ve ortamla kimyasal reaksiyona girmeyen doğal kırmataş malzemesi olarak kullanılmıştır (Durgunoğlu et al. 1992). Taş kolonlar zemin rijitliğini artırmak için yapılan diğer yöntemlere göre daha hızlı ve ekonomik olan zemin iyileştirme yöntemidir. Ayrıca deprem sırasında da fazla boşluksuyu basınçlarını sönmülmektedir (Selçuk 2009). Zeminde rijitliği artırmak için yapılan taş kolonlar, deprem sırasında yatay ve düşey deplasmanlarında azaltmaktadır (Kanmaz 2014).

DKK yönteminde, diğer taş kolon yapım yöntemlerinden farklı olarak, granüler malzeme vurularak sıkıştırılır ve rijit bir kolon elde edilir. DKK, yöntemlerinden günümüzde en çok olarak kullanılan yöntemler, Geopier® ve Impact® DKK yöntemleridir (Mungan 2016).

Bu çalışmada uygulanan yöntem Impact® yönteminde Şekil 1' de görüldüğü gibi zemine 36 cm çaplı mandrel istenilen derinliğe indirilerek, içine iyi derecelenmiş doğal kırmataşlar doldurulur. Daha sonra mandrel 1 m yukarı kaldırılır 67 cm aşağıya indirilerek, tokmakla kırmataşlar sıkıştırılır. Sıkıştırma sonucunda 36 cm olan çap değeri 50 cm olarak 33 cm'lik tabaka kalınlığı elde edilir.

Kademeli olarak bu işlem zemin yüzeyine kadar devam eder, her kademede 50 cm'lik kolon çapları ve 33 cm'lik tabaka kalınlığı oluşur.



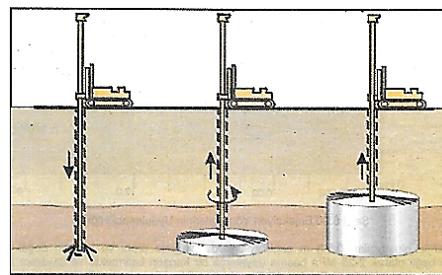
Şekil 1. Impact yöntemi (Mungan 2016)

Çizelge 1. Zemin Parametreleri (Mungan, 2016)

|                                   | MC-1           | SC-1           | MC-2           | SC-2           |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Material Model                    | Pekleşen Zemin | Pekleşen Zemin | Pekleşen Zemin | Pekleşen Zemin |
| Drenaj Durumu                     | Drenajlı       | Drenajlı       | Drenajlı       | Drenajlı       |
| $\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )       | 18             | 19             | 18             | 19             |
| $\rho_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 19             | 20             | 19             | 20             |
| $E_{50}$ (kPa)                    | 2773           | 16800          | 6240           | 20000          |
| $E_{oed}$ (kPa)                   | 2773           | 16800          | 6240           | 20000          |
| $E_{ur}$ (kPa)                    | 8319           | 50400          | 18720          | 60000          |
| $v'_{ur}$                         | 0.2            | 0.2            | 0.2            | 0.2            |
| $c'$ (kPa)                        | 10             | 5              | 23             | 10             |
| $\phi'$ (°)                       | 25             | 35             | 20             | 33             |
| $\psi$ (°)                        | 0              | 5              | 0              | 3              |

### 2.2.2. Jet Grout

Jet Grout tekniğinde, zeminde istenilen derinliğe kadar sonda ile delinerek örselendikten sonra sondanın yukarıya doğru çekilmesiyle, sondanın ucundan 3 mm çaplı bir nozzle delikten yüksek basınçla su ve çimento birlikte enjekte edilerek, zemin içinde kolon oluşturulan zemin iyileştirme türüdür (Şekil 2.). Su/çimento oranı genel olarak 1.00 dir. Priz alma süresinin uzun olması istenilen dayanımı almak için genellikle su ve çimento ile birlikte katkı maddeleri de verilmektedir. Jet Grout yöntemi zemin iyileştirme yanı sıra, temel altı yatak oluşturulması, tünel korumada, kazı desteklenmesinde ve yanıl basınç azaltmada da kullanılan bir yöntemdir. Zeminin ortamında taşıma gücünü artırarak oturmaları azaltmaktadır (Küsin 2009).



Şekil 2. Jet Grout Yöntemi (Önalp ve Sert 2010).

### 3. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında; 4 katlı çerçeve bir yapı ele alınarak, çizelge 2.' deki veriler kullanılarak bodrum kat üst yapıdan daha rijit bir eleman alınarak sonlu elemanlara dayalı analiz yapan yazılım ile düzlem (plate) eleman olarak tanımlanmıştır. Çizelge 1.' deki zemin parametreleri kullanılarak, söz konusu yapıda Şekil 3a' da görüldüğü gibi 148 cm oturma olduğu görülmektedir. Bu değer ortamın oturma açısından oldukça elverişsiz olduğunu göstermektedir.

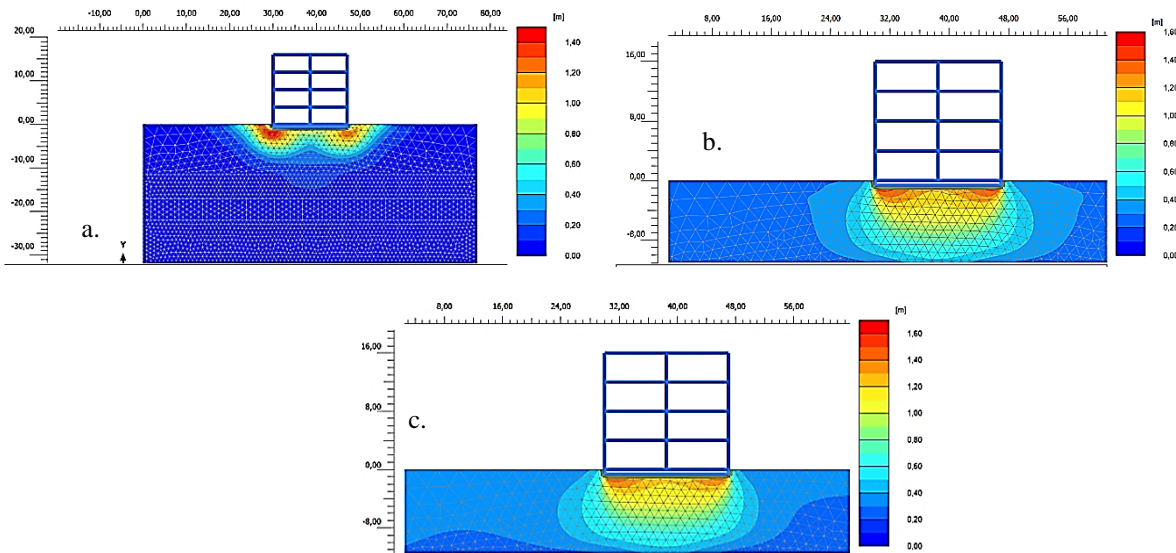
Dinamik durumda ise, iki farklı deprem etkisinde ( $M_w = 5.5$  ve  $M_w = 7.1$ ) bu değerlerin arttığı analizlerde gözlenmiştir. Şekil 3b' de  $M_w:5.4$  büyüklüğündeki depremde, 156 cm oturma görülmektedir. Aynı analize  $M_w = 7.1$  büyüklüğündeki depremde tekrarlandığında elde edilen oturma değeri şekil 3c' de 160 cm. elde edilmiştir.

Çizelge 2. Üst Yapı Parametreleri

|        | EA (kN/m)       | EI (kN/m)       | w (kN/m) |
|--------|-----------------|-----------------|----------|
| Yapı   | $10^9$          | $10^9$          | 25       |
| Bodrum | $12 \cdot 10^6$ | $16 \cdot 10^4$ | 20       |

Çizelge 3. Rijit Kolon Parametreleri

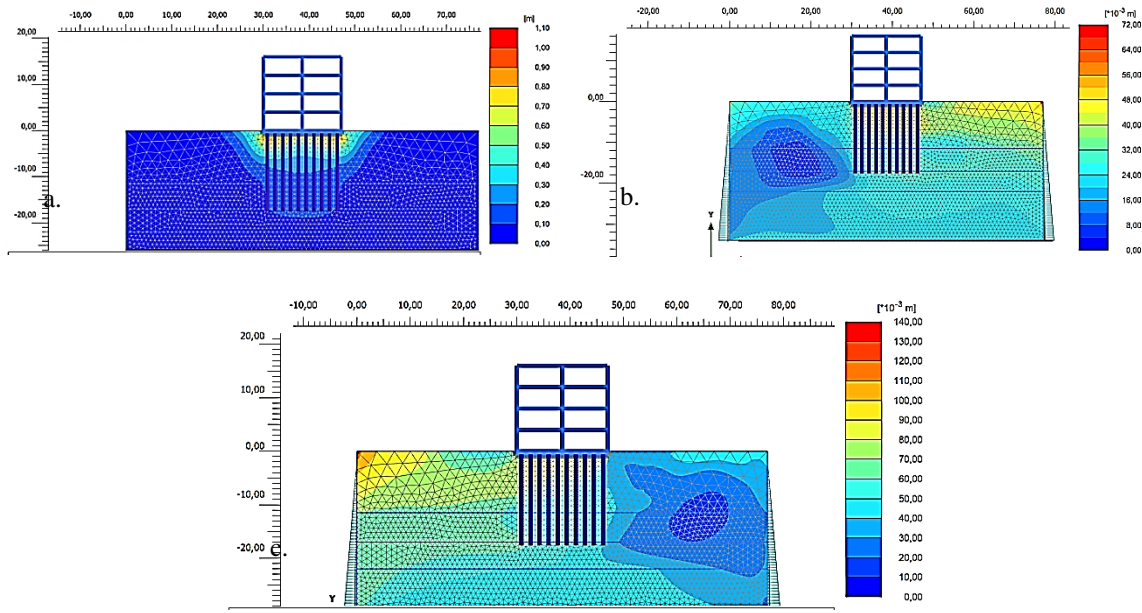
| Malzeme   | E (MPa) | $\rho$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Çap (m) | Sürtünme Direnci $f_s$ (kN/m) | Uç Direnci $Q_g$ (kN) |
|-----------|---------|-----------------------------|---------|-------------------------------|-----------------------|
| DKK       | 165     | 22                          | 0.5     | 65                            | 160                   |
| Jet Grout | 300     | 24                          | 0.6     | 784.3                         | 229                   |



Şekil 3. Oturma miktarları a. 1.48m b.1.56 m c.1.60m

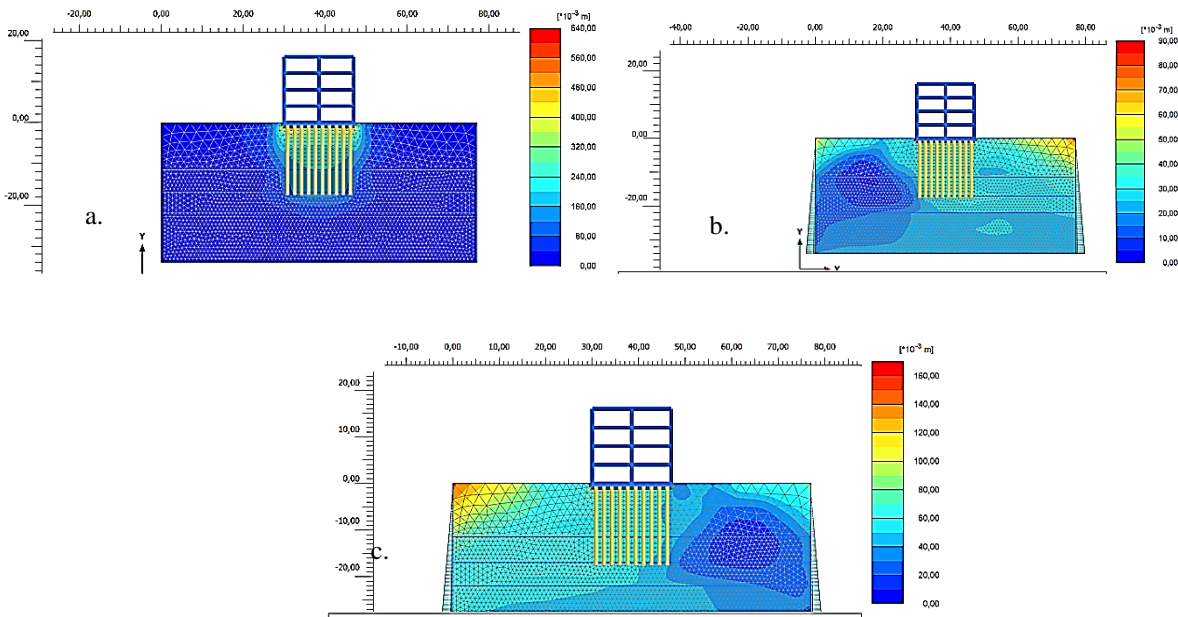
Yapı temeli altına, 1.7 m aralıklarla ve 17 m uzunluğunda Şekil 4a' da görüldüğü gibi Çizelge 3.' teki veriler kullanılarak DKK' lar tanımlanarak, statik durumda, 101 cm, ve dinamik durumda ise, Şekil 4b. ve 4c.' de görülmek üzere  $M_w = 5.4$  büyüklüğündeki depremde, 7.1 cm ve  $M_w = 5.4$  büyüklüğündeki depremde, 13.69 cm oturma elde edilmiştir.





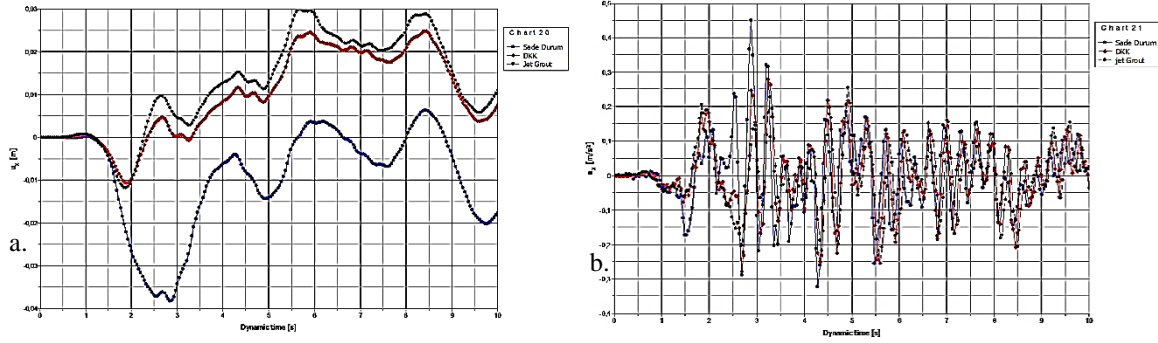
Şekil 4. DKK' lı durumda oturma miktarları a. 1.01m b. 0.071 m c. 0.13m

Yapı temeli altına, kare yerleşim planına göre 1.7 m aralıklarla ve 17 m uzunluğunda Şekil 5a.' daki gibi Çizelge 3.' teki veriler kullanılarak Jet grout kolonları temel altına tanımlanarak, statik durumda, 60 cm, ve dinamik durumda ise, Şekil 5b.'de  $M_w = 5.4$  büyüklüğündeki depremde, 8.6 cm ve  $M_w = 7.1$  büyüklüğündeki depremde, Şekil 5c.' de 16.11 cm oturma elde edilmiştir.



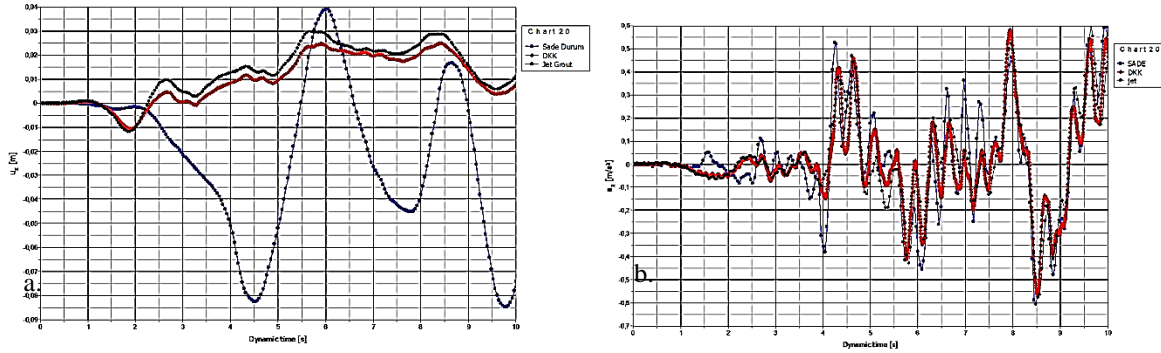
Şekil 5. Jet Grout' lı durum için oturma miktarları a. 0.60 m b. 0.064 m c. 0.1161m

Şekil 6a' da ,  $M_w = 5.4$  büyüklüğündeki depremde, alınan referans noktası için deprem anındaki yatay yer değiştirme değerleri kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaya göre, sade durumda en fazla 3.7 cm oturma, DKK' lı ortamda 2.5 cm oturma ve Jet Groutlu durumda ise 3 cm oturma görülmektedir. Alınan referans noktası için yatay ivme değerleri şekil 6b' de görülmektedir. Sade durumda yüksek yatay ivme değerleri görülürken, DKK' lı ve Jet Groutlu ortamda daha düşük yatay ivme değerleri görülmektedir.



Şekil 6. Dinamik Analiz Sonuçları (Mw = 5.4)

Şekil 7a 'de, , Mw = 7.1 büyüklüğündeki depremde, alınan referans noktası için deprem anındaki yatay yer değiştirme değerleri kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaya göre, sade durumda en fazla 6.25 cm oturma, DKK' lı ortamda 2.6 cm oturma ve Jet Groutlu durumda ise 3.1 cm oturma görülmektedir. Alınan referans noktaları için yatay ivme değerleri şekil 7b' da görülmektedir. Sade durumda yüksek yatay ivme değerleri görülürken, DKK'lı ve Jet Groutlu ortamda daha düşük yatay ivme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 7. Dinamik Analiz Sonuçları (Mw = 7.1 )

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, elverişsiz zemin ortamlarında, üst yapı temel ilişkisini statik ve dinamik durumda, etkileşimini ifade edilmektedir. Söz konusu zemin ortamı, aşırı oturmaların ve sıvılaşma riskinin fazla olduğu zemin ortamıdır.

Dört katlı, bir çerçeve yapı ele alınarak, statik ve dinamik durumda yapıda meydana gelmesi muhtemel aşırı oturma değerleri analiz edilmiştir.

Yapılan statik durum analizinde; yapıda 148 cm oturma elde edilmektedir. Dinamik durumda ise, Mw = 5.4 depremde, 156 cm ve Mw=7.1 depremde, 160 cm oturma görülmektedir.

Aşırı oturmaların görüldüğü zeminlerde, DKK ve Jet Grout zemin iyileştirme yöntemi olarak önerilmiştir.

DKK ortamında, statik durumda, 101 cm, ve dinamik durumda ise, Mw = 5.4 i depremde, 7.1 cm ve Mw = 7.1 depremde, 13.69 cm oturma görülmektedir.

Jet grout ortamında, statik durumda, 60 cm, ve dinamik durumda ise, şekilde Mw = 5.4 depremde, 8.6 cm ve Mw = 7.1 Mw depremde, 16.11 cm oturma görülmektedir.

DKK ve Jet groutlu ortamda, statik durumda sırasıyla, %31 ve %59 oranında azalma görülmektedir.

Dinamik durumda, karşılaştırma yapıldığında yine sırasıyla, DKK' lı ortamda  $M_w = 5.4$  depremde, %95 ve  $M_w = 7.1$  depremde %91 oranında azalma görülmektedir. Jet groutlu ortamda ise, %94 ve  $M_w = 7.1$  büyüklüğündeki depremde %89 oranında azalma görülmektedir.

Söz konusu kıyaslama yapılırken, arazideki fiziki durum değerlendirilerek ile analiz sonuçları ile karşılaştırılmalı ve ekonomik açıdan en uygun olabilecek zemin iyileştirme yöntemi araştırılmalıdır.

## 5. KAYNAKLAR

Brinkgreve R. B. J., Yamamuro, A. and Kaliakin, V.N., 2005. Selection of Soil Models and Parameters For Geotechnical Engineering Application, *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, And Calibration. J. American Society Of Civil Engineers., Vol. 128. Pp. 69–98.*

Durgunoğlu H.T, Kulaç, F., İkiz, S., Karadayıları T. 1992. Taş kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine bir Uygulama , *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, İTÜ*

Ishihara, K., 1996. Soil Behaviour In Earthquake Geotechnics, *1<sup>st</sup> Ed., Oxford, Claredon Press.*

Kanmaz, H. 2014. Rijit kolonların farklı zemin ortamlarındaki performansları, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 95.

Knappett, J. A., Haigh, S. K., Madabhushi, S. P. G., 2006. Mechanisms of Failure For Shallow Foundations Under Earthquake Loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Volume 26, Issues 2–4, P. 91-102.*

Kusin, C., 2009. Jet grout yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 171.

Laman, M., 2009. Geogrid Reinforcement On Soft Clay Deposit, *TÜBİTAK Scientific Research Project (no. 106M496), Ankara, Turkey, 528 pp.*

Mitchell, J. K., Cooke, H. G., and Schaeffer, J. A. 1998. Design Considerations in Ground Improvement For Seismic Risk Mitigation, *Proc., Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Vol. I, Geotech. Special Pub. No. 75., ASCE, Reston, VA, 580- 613.*

Mungan, H., 2016. Zeminin Kırmataş Kolonları ile İyileştirilmesi, MSc Thesis, Civil Engineering Department, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul Kültür University, Istanbul, 89.

Murru, M., Akinci, A., Falcone, G., Pucci, S., Console, R., and Parsons, T. 2016.  $M > 7$  earthquake rupture forecast and time-dependent probability for the sea of Marmara region, Turkey, *Journal of Geophysical Research*, 121, P:2679-2707.

Önalp, A. ve Sert S., 2010. Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri, Birsen Yayıncılık, ISBN: 978-975-511-465-1, İstanbul, Turkey.

Reilinger, R., et al. 2006. GPS Constraints On Continental Deformation In The Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone And Implications For The Dynamics of Plate Interactions, *J. Geophys. Res.*, 111, B05411, doi: 10.1029/ 2005JB004051.

Seed, H. B., and Idriss, I. M. 1971. Simplified Procedure For Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(Sm9), pp.1249-1273.

Seed, H. B., 1969. Design Problems in Soil Liquefaction, *Journal of Geotechnical Eng.* 113 (8), 827-845.

Selçuk L., 2009. Zemin sıvılaşmasına karşı optimum taş kolon tasarımının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi, Ankara Üniversitesi Doktora Tezi Ankara, 164.





Stewart, J. P., Seed, R. B., and Fenves, G. L., 1999. Seismic soil-structure interaction in Buildings. II: Empirical findings, *J. Geotech. & Geoenv. Eng.*, ASCE, 125 (1), pp.38-48.

Stein, R.S. , Barka, A.A., and Dieterich, J. H. 1997. Progressive Failure On The North Anatolian Fault Since 1939 By Earthquake Stress Triggering, *Geophysical Journal International*, Volume 128, Issue 3 Pp. 594–604., <http://www.geneseo.edu>, North Anatolian Fault Line Map.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). *Yayın Tarihi: 18.03.2018*, Resmi Gazete No.:30364