Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

Jet-Grout Yöntemi ile İyileştirilmiş Zeminlerin Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışının Sayısal Analizi

Numerical Analysis of the Behavior of Jet-Grout Improved Soils Under Static and Dynamic Loads

TANER KARAGÖNLÜ[1], HASAN SAVAŞ[2]

ÖZET

Eskişehir ilinde inşa edilecek bir rezidans projesi için zemin etüt çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sahanın jeolojik açıdan homojen olmayan yapısı ve proje alanının yaklaşık 50 m yakınında bulunan Porsuk Çayı nedeniyle yeraltı su seviyesinin temel seviyesinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Yapılan zemin etütleri sonucunda proje sahasında sıvılaşma potansiyeli ve taşıma gücü problemleri tespit edilmiştir. Proje alanındaki taşıma gücü ve sıvılaşma problemlerinin giderilmesi amacıyla jet grout yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılmasına karar verilmiştir. Halihazırda proje sahasında zemin iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmada, saha verilerinden elde edilen zemin parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile zemin performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Sayısal analizler PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve analizler hem statik hem de dinamik koşullar altında yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları ile jet grout uygulamasının zemin davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Zemin iyileştirme, Jet Grout, Dinamik analiz, Deprem etkisi*

ABSTRACT

Soil investigation studies were carried out for a residential project to be constructed in Eskişehir. Due to the geologically non-homogeneous structure of the site and the presence of the Porsuk Stream located approximately 50 meters from the project area, it was determined that the groundwater level is above the foundation level. As a result of the geotechnical investigations, liquefaction potential and bearing capacity problems were identified at the project site. In order to eliminate the bearing capacity and liquefaction problems in the project area, it was decided to perform ground improvement using the jet grout method. Ground improvement works are currently ongoing at the project site. In this study, it is aimed to examine the soil performance using soil parameters obtained from field data through the finite element method. Numerical analyses were performed using the PLAXIS 2D software, and the analyses were conducted under both static and dynamic conditions. The effects of the jet grout application on soil behavior were evaluated based on the results obtained from the analyses.

Keywords: *Ground improvement, Jet Grout, Dynamic analysis, Seismic effects*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, karagonlutaner99@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, hsavas@ogu.edu.tr

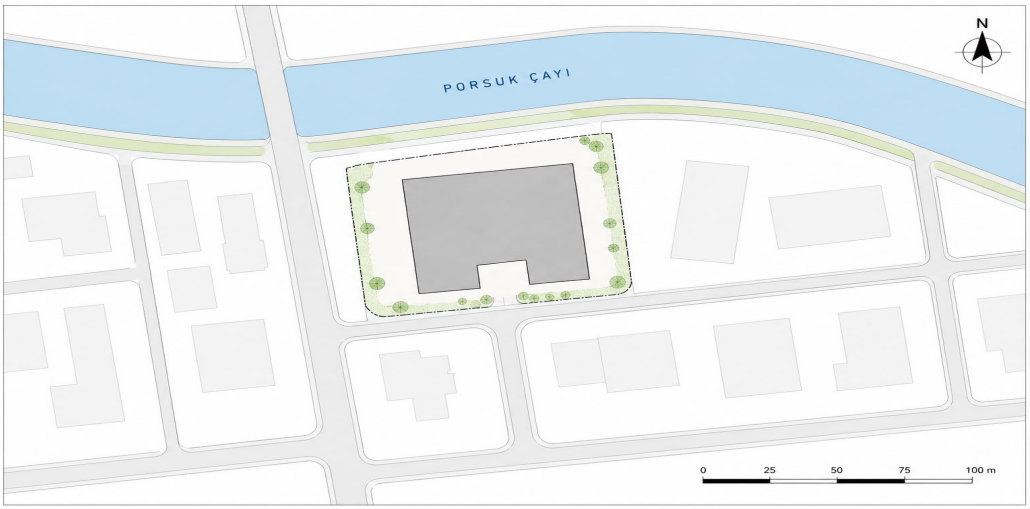
1. GİRİŞ

Zemin koşulları, yapıların güvenliği ve servis performansı üzerinde doğrudan etkili olan en önemli mühendislik parametrelerinden biridir. Düşük taşıma gücüne sahip, yüksek sıkışabilirlik gösteren veya sıvılaşma potansiyeli bulunan zeminlerde uygun iyileştirme yöntemlerinin uygulanması zorunlu hale gelmektedir.
Bu çalışmada, Eskişehir ilinde inşa edilmesi planlanan bir rezidans projesine ait saha verileri esas alınarak, jet grout ile zemin iyileştirmesinin farklı gerçek deprem kayıtları altındaki dinamik davranışı üzerindeki etkisi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Eskişehir ve yakın çevresinde gerçekleştirilen zemin tepki analizleri, yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi ve zemin tepkisi üzerinde önemli etkiler oluşturabildiğini göstermektedir (Coşkun vd., 2025). Analizlerden elde edilen jet grout kolonlarında oluşan gerilme ve deplasman sonuçları değerlendirilmiştir. Böylece, aynı zemin ve iyileştirme koşulları korunarak dört farklı gerçek deprem kaydının kolon davranışı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

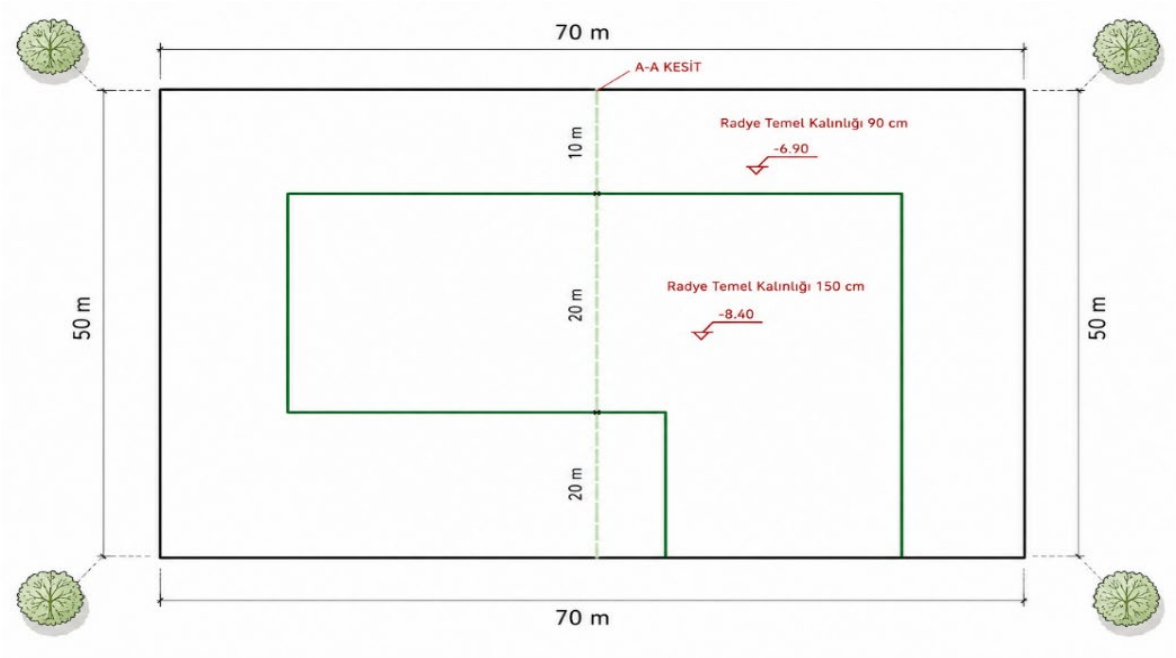
2. ÇALIŞMA ALANI VE GEOTEKNİK ÖZELLİKLER

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Eskişehir ilinde yer almakta olup, incelenen proje sahasının yaklaşık boyutları 50 × 70 m'dir. Proje kapsamında 14 katlı bir rezidans yapısının inşa edilmesi planlanmış ve yapı için radye temel sistemi öngörülmüştür. Radye temel, proje geometrisine bağlı olarak farklı kalınlıklarda düzenlenmiş olup modelleme kapsamında 0,90 m ve 1,50 m kalınlığındaki temel bölgeleri dikkate alınmıştır. Proje için kazı kotu -8,4 m'dir. Çalışma alanının genel yerleşimi ve temel geometrisi Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Proje alanının yaklaşık 50 m kuzeyinde Porsuk Çayı bulunması nedeniyle yeraltı su seviyesinin temel kotunun üzerinde olduğu belirlenmiştir. Zemin etüt çalışmalarında yeraltı su seviyesinin yaklaşık -5,0 m kotunda bulunduğu belirlenmiştir. Saha koşullarının değerlendirilmesi sonucunda, zemin profilinin heterojen bir yapıya sahip olduğu ve farklı derinliklerde kum, silt, kil ve çakıl içeren tabakaların bulunduğu belirlenmiştir.
Şekil 1, proje alanının genel yerleşimini ve çalışma alanının çevresindeki Porsuk Çayı'nı göstermektedir. Şekil 2'de ise yaklaşık 50 × 70 m boyutlarındaki proje alanı içerisinde radye temel geometrisi ve temel kalınlığının değiştiği bölgeler gösterilmektedir.



Şekil 1. Proje sahası



Şekil 2. Çalışma alanı ölçüleri, kazı kotları ve modelleme için alınan kesit bilgisi

2.2. Zemin Özellikleri

Saha kapsamında gerçekleştirilen zemin etüt çalışmaları sonucunda zemin profili genel olarak kum, silt, kil ve çakıl tabakalarından oluşmaktadır. Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda ideal zemin profili Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin parametreleri

Zemin	USCS	Derinlik (m)	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	c' (kPa)	φ'	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	ν
Kum-Siltli kum (Gevşek-orta sıkı)	SW-SM	0-6	18	21	0	34	65	65	195	0.30
Kum-çakıl (Orta sıkı)	GW-SW	6-12	19	21	0	38	95	95	285	0.30
Killi-kum (İnce dane oranı yüksek)	SC	12-18	19	21	20	32	90	90	270	0.35
Kil (Düşük plastisiteli)	CL	18-20	20	20	117	20	45	45	135	0.40
Kum-çakıl (Sıkı)	GW	>20	20	21	0	38	100	100	300	0.30

Zemin tabakalarının mühendislik özellikleri geoteknik etüt raporundan alınmış ve sayısal modelde Hardening Soil (HS) malzeme modeli kullanılmıştır.

Hardening Soil (HS) modeli, zeminlerin gerilme seviyesine bağlı rijitlik değişimini ve yükleme-boşaltma davranışını temsil edebilmesi nedeniyle tercih edilmiştir.
Jet grout kolonları ve radye temel, PLAXIS 2D içerisinde plate elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Jet grout kolonlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde saha uygulamasına ilişkin malzeme özellikleri ile literatürde önerilen dayanım–rijitlik ilişkileri dikkate alınmıştır. Elde edilen eşdeğer elastisite modülü kullanılarak kolonların eksenel ve eğilme rijitlikleri belirlenmiş ve sayısal modele aktarılmıştır. Sayısal modelde kullanılan yapısal eleman parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Radye temel, proje geometrisine bağlı olarak 1,50 m ve 0,90 m olmak üzere iki farklı kalınlıkta modellenmiştir. Her bir temel bölgesi için eksenel rijitlik (EA) ve eğilme rijitliği (EI) değerleri temel geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak tanımlanmıştır. Jet grout kolonları ise 0,80 m çapındaki kolon geometrisini temsil edecek şekilde eşdeğer rijitlik parametreleri kullanılarak plate eleman olarak modele aktarılmıştır. Bu kapsamda kolon için kullanılan EA ve EI değerleri sırasıyla $7{,}2\times10^{6}$ kN/m ve $3{,}84\times10^{5}$ kN·m²/m olarak alınmıştır. Tablo 2'de verilen parametreler, PLAXIS 2D modelinde temel ve jet grout kolonlarının rijitlik özelliklerinin tanımlanmasında kullanılmıştır.

Tablo 2. Yapısal eleman parametreleri

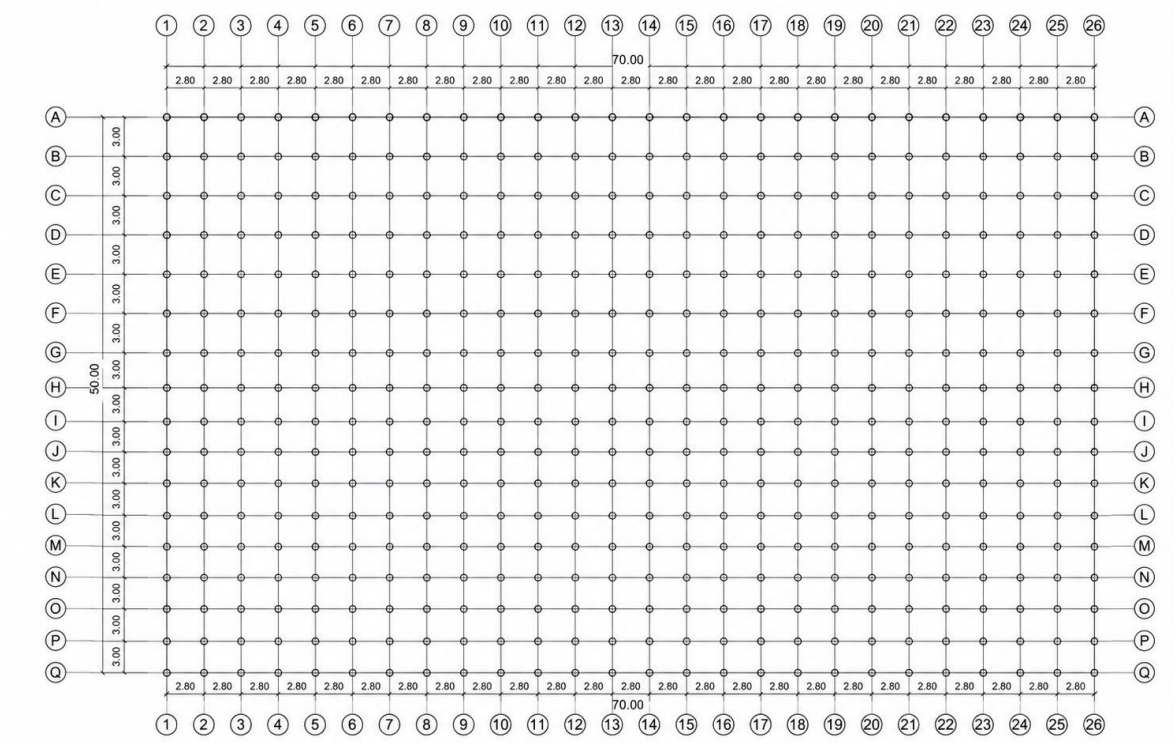
Temel-1	
Kalınlık, d (m)	1,5
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m³)	37,5
Eksenel rijitlik, EA (kN/m)	$4{,}5\text{x}10^{7}$
Eğilme rijitliği, EI (kN.m²/m)	$8{,}44\times10^{6}$
Poisson oranı, ν	0,20
Temel-2	
Kalınlık, d (m)	0,9
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m³)	22,5
Eksenel rijitlik, EA (kN/m)	$2{,}7\text{x}10^{7}$
Eğilme rijitliği, EI (kN.m²/m)	$1{,}82\times10^{6}$
Poisson oranı, ν	0,20
Jet Grout Kolon	
Kalınlık, d (m)	0,8
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m³)	17,6
Eksenel rijitlik, EA (kN/m)	$7{,}2\times10^{6}$
Eğilme rijitliği, EI (kN.m²/m)	$3{,}84\text{x}10^{5}$
Poisson oranı, ν	0,20

2.3. Jet Grout Uygulaması

Jet grout yöntemi, yüksek basınçlı çimento şerbeti enjeksiyonu ile zeminin yerinde iyileştirilmesini sağlayan ve geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme tekniklerinden biridir. Bu yöntem, zeminin dayanımını ve rijitliğini artırarak taşıma gücünün yükseltilmesi ve oturmaların kontrol altına alınması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Modoni ve Bzówka, 2012).
Jet grout uygulamalarının deprem ve sıvılaşma koşullarındaki performansı üzerine yapılan sayısal çalışmalarda ve saha çalışmalarında, iyileştirmenin zemin davranışı ve deformasyonlar üzerinde etkili olduğu ortaya konulmuştur (Şahin vd., 2022; Karataş ve Kahyaoğlu, 2026; Kayakeser ve Sünbül Güner, 2026). Bununla birlikte, jet grout kolonlarının deprem etkisi altındaki davranışı yalnızca zemin iyileştirmesinin statik performansı açısından değil, farklı deprem kayıtlarının kolon iç kuvvetleri ve yüzey ivmesi üzerindeki etkileri açısından da değerlendirilmelidir (Sedighi vd., 2017).

Jet grout kolonlarının sismik zemin tepkisini değiştirebildiği görülmekle birlikte iyileştirmenin etkisinin zeminin ve kolonların özelliklerine bağlı olarak farklılaşabildiği anlaşılmıştır.

İncelenen projede jet grout iyileştirmesi 0,80 m çapında ve 9,0 m uzunluğunda kolonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kolonlar 2,8 × 3,0 m aks aralığında düzenlenmiş ve radye temel altında düzenli bir kolon ağı oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Uygulama sırasında yaklaşık 400 bar enjeksiyon basıncı kullanılmış ve çimento + su dozajı 450 kg/m³ olarak uygulanmıştır. Jet grout uygulamasına ait saha görünümü Şekil 4'te, kolon plan haritası da Şekil 3'te verilmiştir. Uygulama sonrasında kalite kontrol amacıyla kolonlardan karot numuneleri alınmış ve kolon çapı kontrol edilmiştir.



Şekil 3. Jet grout kolonu plan görüşü



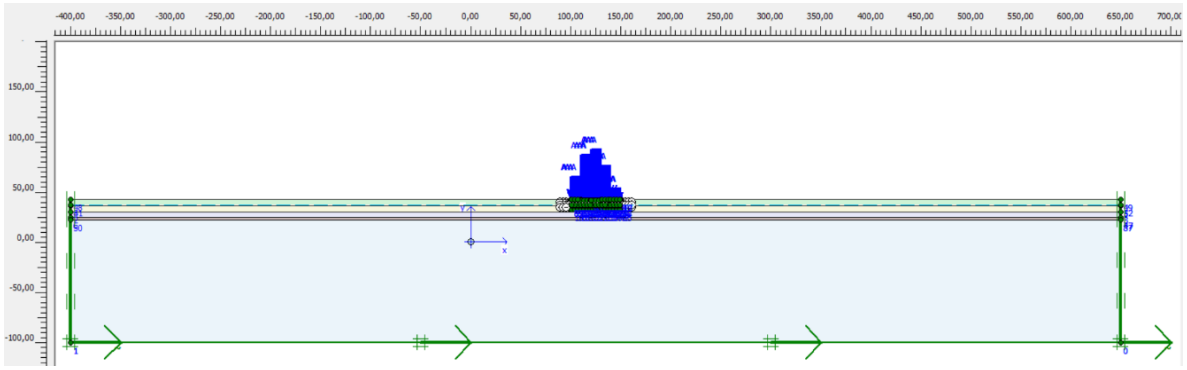
Şekil 4. Proje sahasında gerçekleştirilen jet grout zemin iyileştirme uygulaması

3. SAYISAL MODELLEME

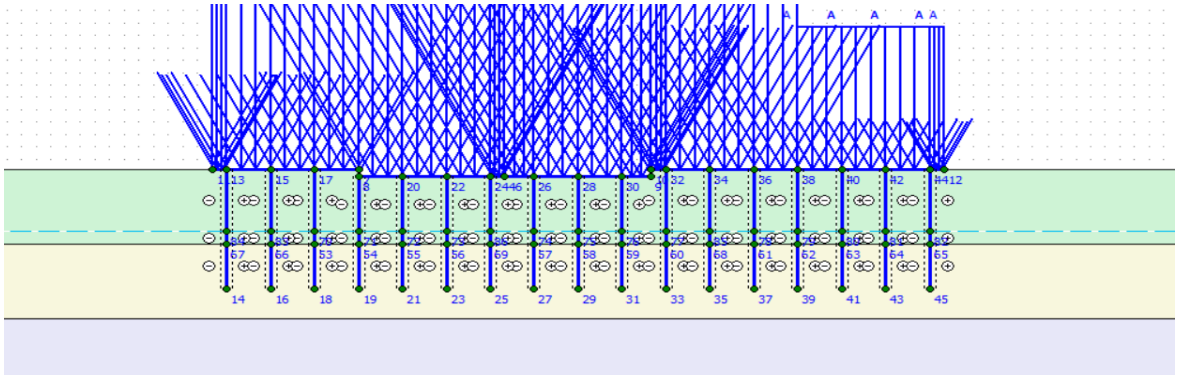
3.1. Sayısal Model

Çalışma kapsamında jet grout ile iyileştirilmiş zemin davranışının deprem etkisi altındaki performansını değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi esaslı PLAXIS 2D programı kullanılmıştır.

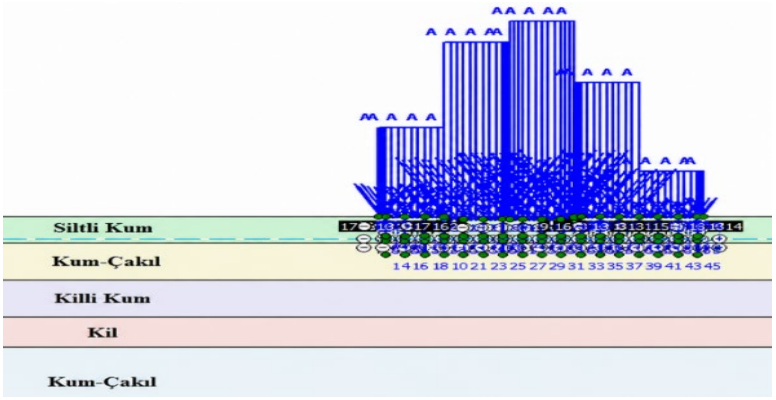
Şekil 5'te analizlerde kullanılan sayısal model geometrisi, zemin tabakaları, radye temel ve jet grout kolonlarının model içerisindeki konumu gösterilmektedir. Model, saha koşullarını temsil edecek şekilde farklı zemin tabakalarından oluşturulmuş ve yeraltı su seviyesi -5 m kotunda tanımlanmıştır. Jet grout kolonları radye temel altında 9,0 m uzunluğunda ve 0,80 m çapında olacak şekilde modellenmiştir. Model sınırları, temel ve iyileştirme bölgesinin sınır etkilerinden yeterli uzaklıkta kalmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir.



a



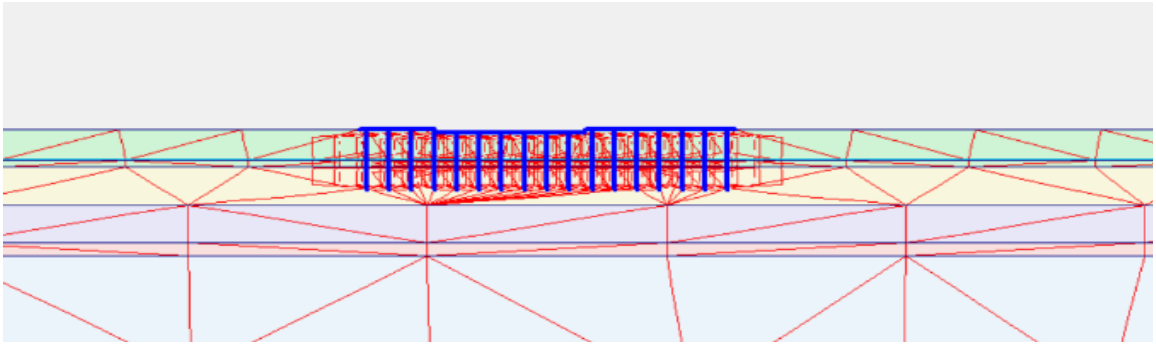
b



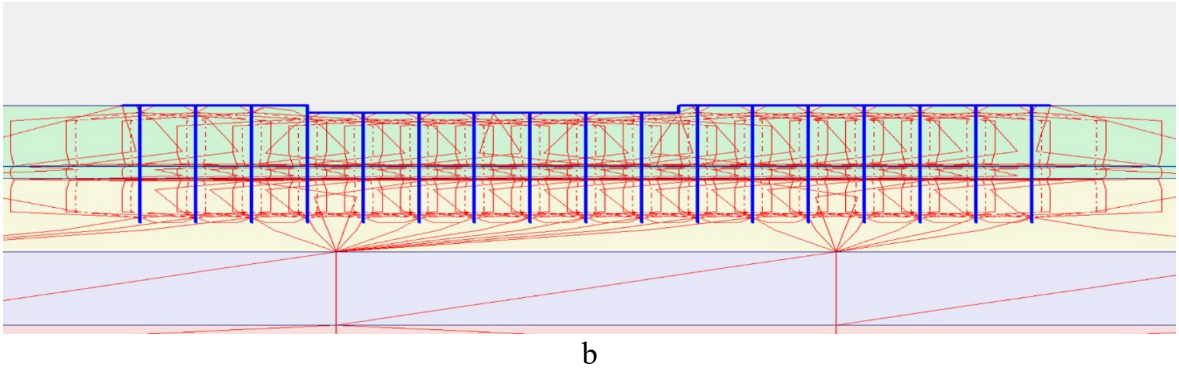
c

Şekil 5. PLAXIS modeli: (a) Tüm modelin görünümü, (b) Radye temel ve jet grout kolonlarının bulunduğu bölgenin büyütülmüş görünümü, (c) zemin tabakaları ile birlikte verilmiş görünüm

Sayısal model yatay doğrultuda yaklaşık 1000 m, düşey doğrultuda 150 m olarak oluşturulmuştur. Analiz bölgesi, modelin statik analiz aşamasında sınır koşulları Standard Fixities kullanılarak tanımlanmıştır. Dinamik analiz aşamasında ise deprem dalgalarının model sınırlarında yansıma etkilerinin azaltılması amacıyla Dynamic Boundaries uygulanmış ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtları Dynamic Earthquake aşamasında modele tanımlanmıştır. Analizler, gerçek saha uygulamasını temsil edecek şekilde aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme kapsamında başlangıç gerilme durumu oluşturulduktan sonra jet grout kolonları aktive edilmiş ve yapı yükleri modele uygulanmıştır.
Dinamik analizlerde ise ivme kayıtları ölçeklendirilerek kullanılmış, jet grout kolonlarının deprem etkisi altındaki davranışı değerlendirilmiştir.
Sayısal modelde çözüm doğruluğunu artırmak amacıyla ince (fine) sonlu eleman ağı oluşturulmuş, temel ve jet grout kolonları çevresinde yerel mesh iyileştirmesi uygulanmıştır. Böylece gerilme ve deformasyonların yüksek olduğu bölgelerde daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6'da sayısal modelde kullanılan sonlu elemanlar ağı gösterilmektedir. Temel ve jet grout kolonlarının bulunduğu bölgelerde daha küçük sonlu elemanlar kullanılarak yerel mesh sıklaştırması yapılmıştır. Şekilde özellikle jet grout kolonlarının temel altındaki konumu ve kolon çevresindeki mesh yoğunluğu açıkça görülebilmektedir.



a



b

Şekil 6. PLAXIS modeline ait sonlu elemanlar ağı: (a) Tüm modelin mesh görünümü,

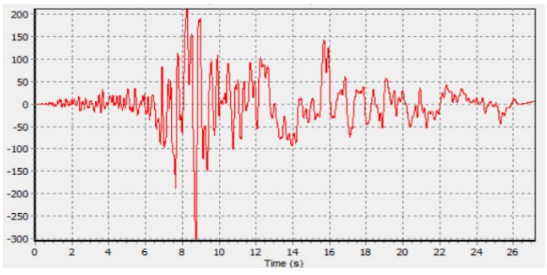
(b) Radye temel ve jet grout kolonlarının bulunduğu bölgenin büyütülmüş mesh görünümü

3.2. Deprem Kayıtları

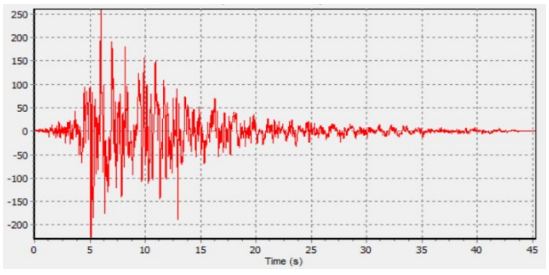
Dinamik analizlerde kullanılan deprem kayıtları, proje sahası için dikkate alınan hedef yer hareketi düzeyi ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Ölçekleme işleminde her bir kaydın orijinal PGA değeri ile hedef PGA arasındaki oran esas alınmış ve buna göre kayıt bazında ölçek faktörleri belirlenmiştir. Bu kapsamda hedef PGA değeri yaklaşık 0,287 g olarak alınmıştır. Kocaeli, Hector Mine, Imperial Valley ve Landers kayıtları için sırasıyla 0,920, 1,083, 1,761 ve 1,329 ölçek faktörleri kullanılmıştır. Ölçekleme sonrasında dört kaydın da maksimum yer ivmesi yaklaşık 0,287 g seviyesine getirilmiştir. Orijinal ve ölçekleme sonrası PGA değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Her deprem kaydı için analiz süresi ilgili kayıt süresini kapsayacak şekilde belirlenmiş, zaman adımı ise deprem hareketinin zamansal değişimini yeterli hassasiyetle temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Farklı deprem kayıtlarının kullanılmasının temel amacı, yalnızca maksimum ivmenin değil, deprem kayıtlarının frekans içeriği ve süre özelliklerinin de jet grout kolon davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Deprem kayıtları Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database'den temin edilmiştir. Dinamik analizlerde Rayleigh sönümü kullanılmış olup zemin için %5 eşdeğer viskoz sönüm oranı kabul edilmiştir. Böylece deprem sırasında oluşan enerji kayıpları modele yansıtılmıştır.

Tablo 3. Deprem kayıtları ve özellikleri

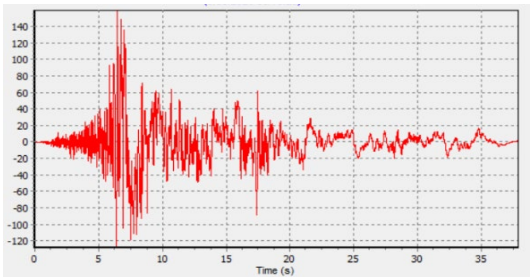
	Yıl	Mw	Ölçekleme Öncesi PGA(g)	Ölçek Faktörü	Ölçekleme Sonrası PGA(g)
Kocaeli	1999	7.51	0,312	0,920	0,287
Hector Mine	1999	7.13	0,265	1,083	0,287
Landers	1992	7.28	0,216	1,329	0,287
Imperial Valley	1979	6.53	0,163	1,761	0,287



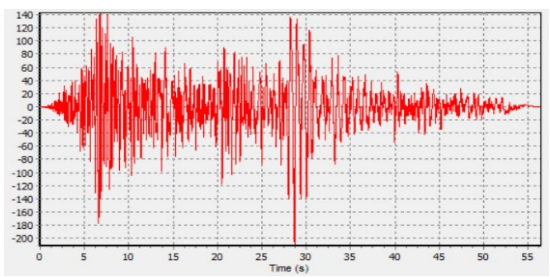
a



b



c



d

Şekil 7. Analizlerde kullanılan ivme-zaman kayıtları: (a) 1999 Kocaeli, (b) 1999 Hector Mine, (c) 1979 Imperial Valley ve (d) 1992 Landers.

3.3. Analiz Aşamaları

Analizler gerçek saha uygulamasını temsil edecek şekilde aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada başlangıç gerilmeleri K0 prosedürü ile oluşturulmuş, ikinci aşamada jet grout kolonları aktive edilmiş, üçüncü aşamada radye temel tanımlanmış ve yapı yükleri uygulanmıştır. Son aşamada ise ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input
Initial phase	0	0	N/A	N/A
JET GROUT	1	0	Plastic	Staged construction
TEMEL	2	1	Plastic	Staged construction
YÜKLEME	3	2	Plastic	Staged construction
DEPREM	4	3	Dynamic analysis	Total multipliers

Şekil 8. PLAXIS modelinde tanımlanan analiz aşamaları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

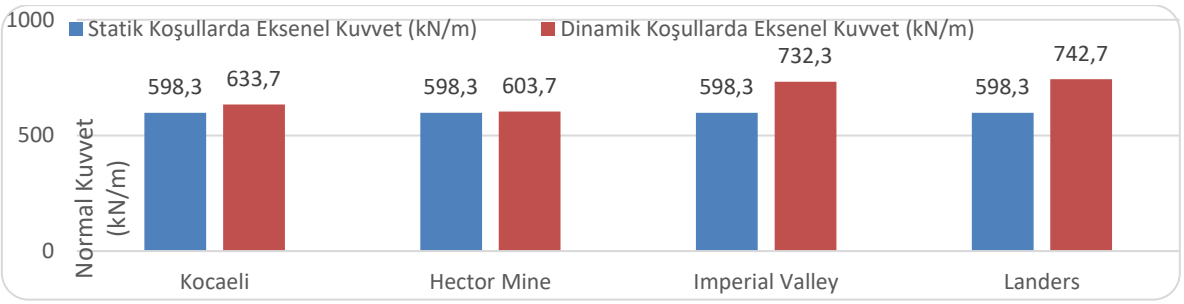
4.1. Jet Grout Kolonlarının Performansı

Jet grout kolonlarının deprem yükleri altındaki mekanik davranışı eksenel kuvvet (N), kesme kuvveti (Q), eğilme momenti (M) ve deplasman parametreleri kullanılarak incelenmiştir.

Bu değerlendirme ile jet grout kolonlarının zemin iyileştirme işlevinin yanı sıra deprem etkileri altında oluşan yüklerin aktarımına katkısı ortaya konulmuştur.

Eksenel Kuvvet

Jet grout kolonlarında oluşan maksimum eksenel kuvvetler Şekil 9'da verilmiştir.



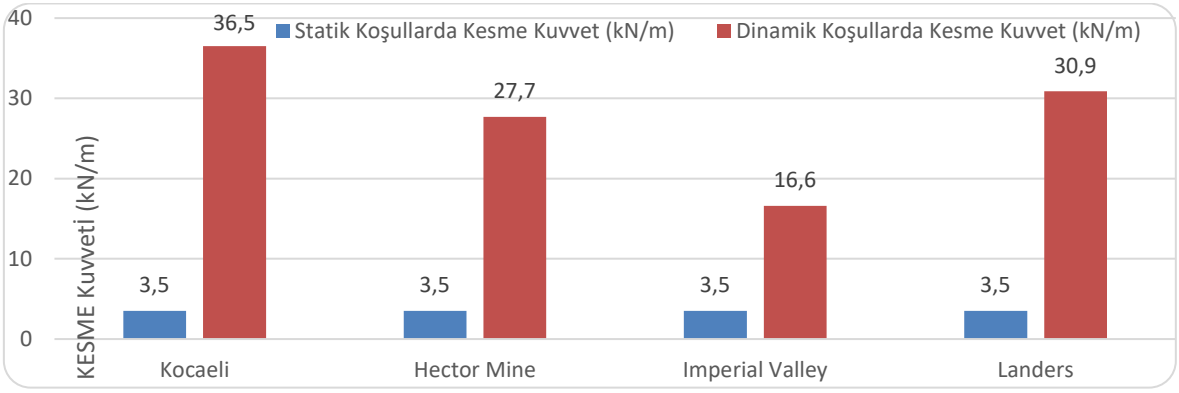
Şekil 9. Eksenel kuvvetlerin karşılaştırılması

Statik analizde yaklaşık 598,3 kN/m olan eksenel kuvvet, dinamik analizlerde deprem kaydına bağlı olarak farklı seviyelere ulaşmıştır. Landers depreminde 742,7 kN/m ile en yüksek eksenel kuvvet elde edilmiş ve statik duruma göre yaklaşık %24 artış meydana gelmiştir.

Imperial Valley kaydında eksenel kuvvet yaklaşık %22 artarken, Kocaeli ve Hector Mine kayıtlarında statik duruma göre sırasıyla yaklaşık %6 ve %1 oranında artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, aynı hedef PGA düzeyine ölçeklenen farklı deprem kayıtlarının jet grout kolonlarında farklı iç kuvvet talepleri oluşturabildiğini göstermektedir. Bu farklılığın, kayıtların frekans içeriği, süre ve enerji dağılımı gibi karakteristikleriyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Kesme Kuvveti

Jet grout kolonlarında meydana gelen maksimum kesme kuvvetleri Şekil 10'da sunulmuştur.



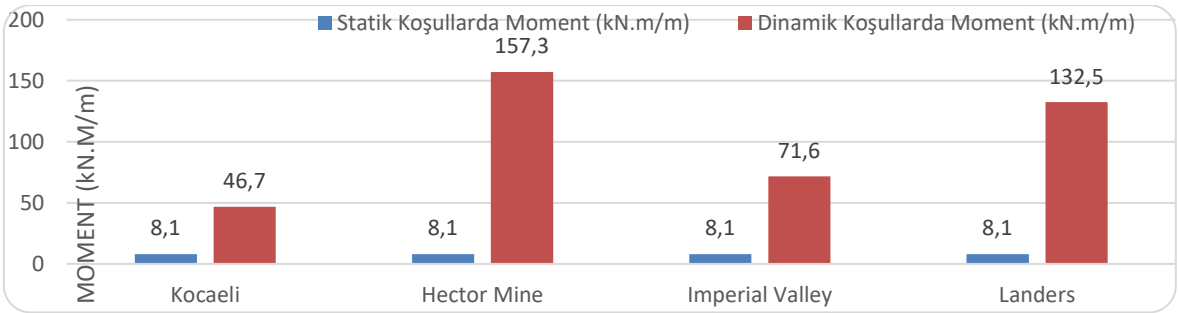
Şekil 10. Kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Dinamik analizlerde maksimum kesme kuvvetleri 36,5, 27,7, 16,6 ve 30,9 kN/m olarak elde edilmiştir. Statik durumda 3,5 kN/m olan kesme kuvvetine göre dinamik analizlerde sırasıyla yaklaşık 10,4, 7,9, 4,7 ve 8,8 kat artış meydana gelmiştir.

Kocaeli kaydında elde edilen yüksek kesme kuvveti, bu kaydın modelde kolonlara aktardığı yatay dinamik talebin diğer kayıtlara göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Eğilme Momenti

Jet grout kolonlarında oluşan maksimum eğilme momentleri Şekil 11'de verilmiştir.



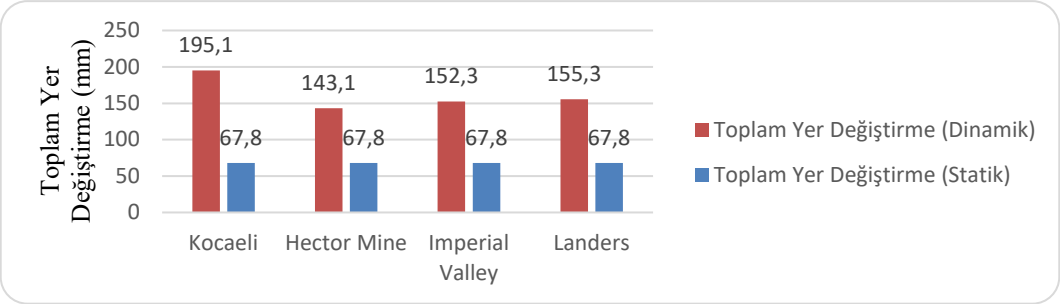
Şekil 11. Eğilme momentlerinin karşılaştırılması

Hector Mine kaydında elde edilen yüksek eğilme momentinin, deprem kaydının dinamik karakteri ve kısa periyot bölgesindeki enerji içeriği ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Moment sonuçları incelendiğinde, deprem kayıtları arasında önemli farklılıklar bulunduğu görülmektedir.

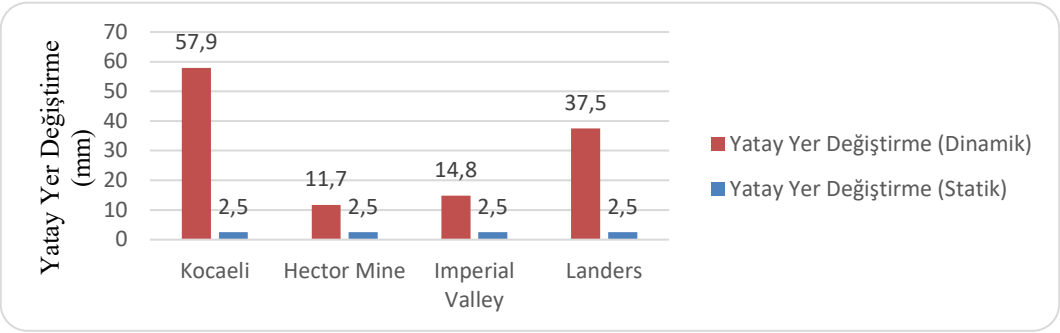
Hector Mine kaydında maksimum eğilme momenti 157,3 kN.m/m olarak elde edilmiş ve statik duruma göre yaklaşık 19,4 kat artmıştır. Buna karşılık Kocaeli depreminde kesme kuvveti daha yüksek olmasına rağmen moment değeri daha düşük kalmıştır. Bu durum, deprem kayıtlarının kolon davranışı üzerinde farklı mekanizmalar oluşturduğunu göstermektedir. Bazı deprem kayıtları kolonlarda ağırlıklı olarak basınç kuvveti oluştururken, bazı kayıtlar eğilme etkilerini daha belirgin hale getirmektedir.

Kolon Deplasmanları

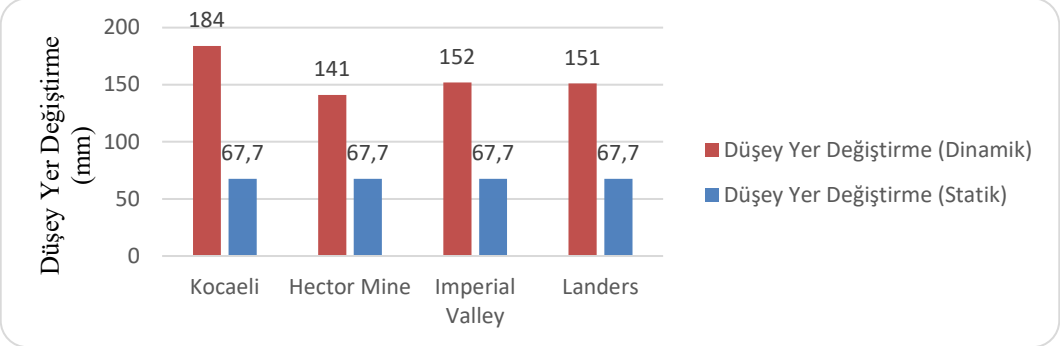
Jet grout kolonlarında oluşan toplam, yatay ve düşey yer değiştirmeler Şekil 12–14'te gösterilmiştir.



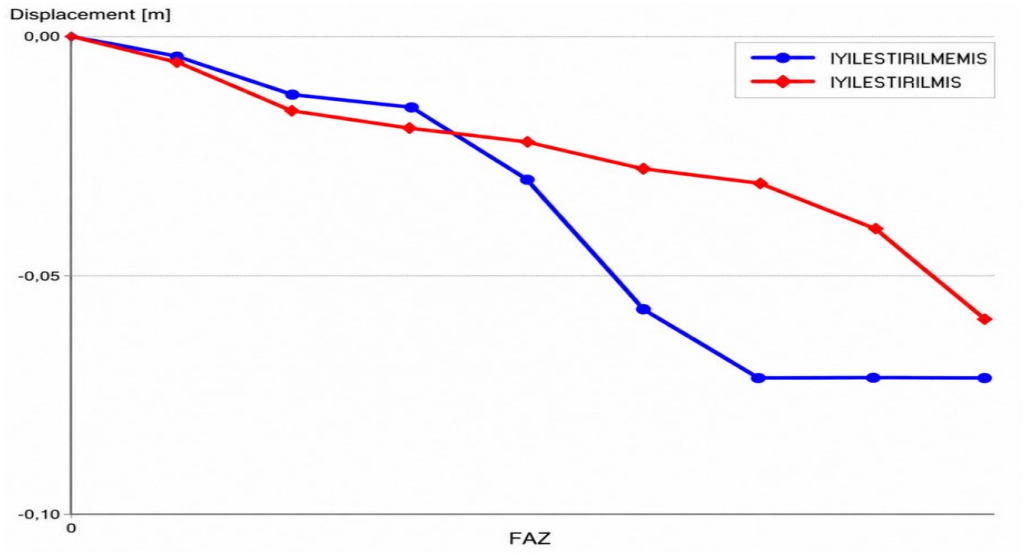
Şekil 12. Jet grout kolonunda toplam yer değiştirmelerin karşılaştırılması (mm)



Şekil 13. Jet grout kolonunda yatay yer değiştirmelerin karşılaştırılması (mm)



Şekil 14. Jet grout kolonunda düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması (mm)



Şekil 15. Jet grout kolonunda düşey yer değiştirmelerin C noktası için statik koşullarda karşılaştırılması (mm)

Jet grout uygulamasının statik oturma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, iyileştirilmemiş ve jet grout ile iyileştirilmiş zemin durumları için elde edilen düşey yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Şekil 15'te görüldüğü üzere, iyileştirilmemiş durumda maksimum düşey yer değiştirme yaklaşık 68 mm iken, jet grout uygulaması sonrasında bu değer 58 mm seviyesine gerilemiştir. Buna göre jet grout uygulaması, statik yükleme koşullarında temel sisteminde meydana gelen düşey yer değiştirmeyi yaklaşık 10 mm azaltmıştır.

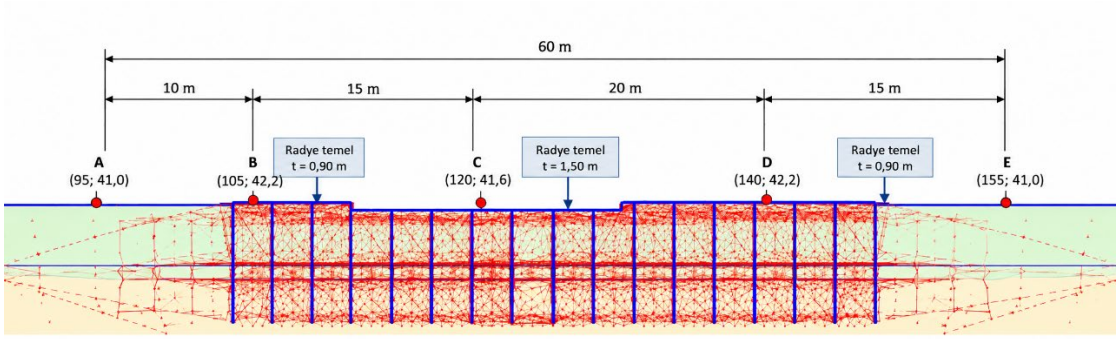
Kayıtlar arasındaki sonuç farklılıkları birlikte değerlendirildiğinde, benzer hedef PGA düzeyine ölçeklenen deprem hareketlerinin jet grout kolonlarında farklı kritik davranış biçimleri oluşturduğu görülmektedir. Kocaeli kaydında kesme kuvveti ve kolon deplasmanlarının, Hector Mine kaydında ise eğilme momentinin daha belirgin hale gelmesi; kolon taleplerinin yalnızca maksimum ivme ile açıklanamayacağını göstermektedir. Bu farklılığın deprem kayıtlarının frekans içeriği, etkin süresi ve enerji dağılımı gibi özellikleriyle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu çalışmada frekans içeriğinin kolon davranışı üzerindeki etkisi doğrudan ayrı bir parametrik analiz ile incelenmemiş olup, elde edilen sonuçlar farklı gerçek deprem kayıtlarının karşılaştırmalı davranış sonuçları üzerinden değerlendirilmiştir.

Yüzey İvmesi

Farklı deprem kayıtları altında model yüzeyinde oluşan maksimum ivmeler, iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin durumları için karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, jet grout uygulamasının yüzey ivmesi üzerindeki etkisinin deprem kaydına ve değerlendirme noktasının konumuna bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

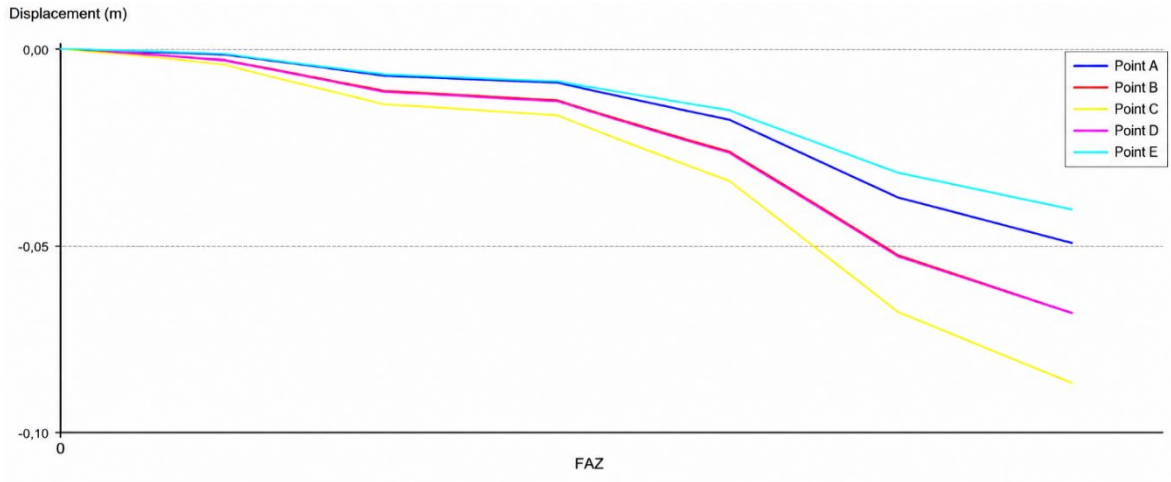
Tablo 4. İvme değerlendirme noktası koordinatları

Nokta	X (m)	Y (m)
A	95	41
B	105	42,2
C	120	41,6
D	140	42,2
E	155	41

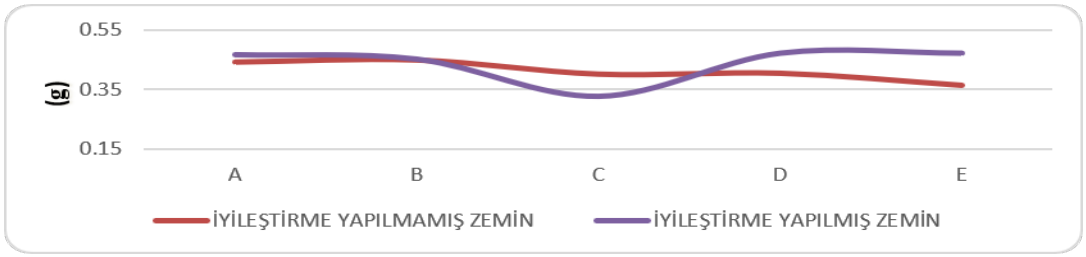


Şekil 16. Model yüzeyinde maksimum ivme değerlendirme noktalarının konumları

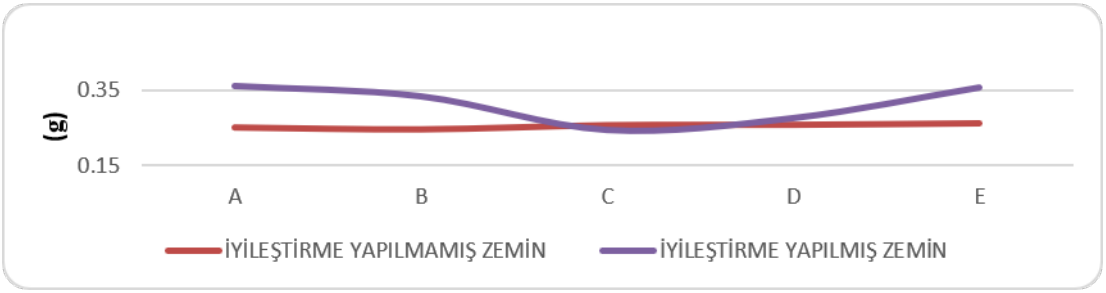
Statik analiz kapsamında model yüzeyinde tanımlanan A–E değerlendirme noktalarındaki düşey yer değiştirmeler incelenerek diferansiyel oturma eğilimleri değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda A, B, C, D ve E noktalarında sırasıyla 40, 54, 68, 54 ve 34 mm düşey yer değiştirme elde edilmiştir. Temel üzerinde bulunan B, C ve D noktaları dikkate alındığında, B–C ve C–D aralıklarında maksimum diferansiyel oturma 14 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 17. A–E değerlendirme noktalarında statik düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



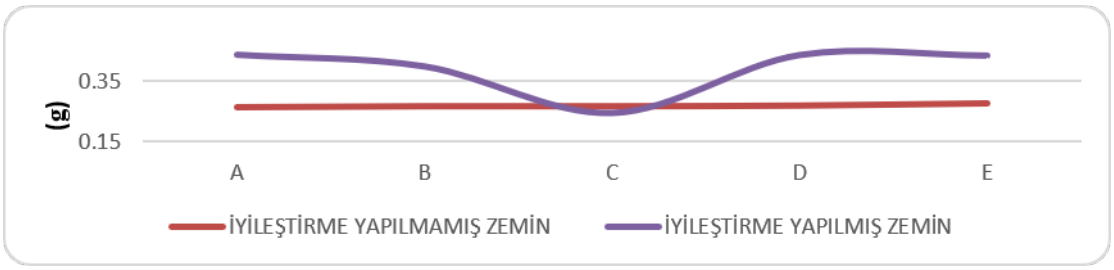
Şekil 18. Kocaeli depreminde model yüzeyindeki değerlendirme noktalarında maksimum ivmelerin karşılaştırılması



Şekil 19. Hector Mine depreminde model yüzeyindeki değerlendirme noktalarında maksimum ivmelerin karşılaştırılması



Şekil 20. Imperial Valley depreminde model yüzeyindeki değerlendirme noktalarında maksimum ivmelerin karşılaştırılması



Şekil 21. Landers depreminde model yüzeyindeki değerlendirme noktalarında maksimum ivmelerin karşılaştırılması

Yüzey ivmesi değerlendirmeleri için seçilen A–E noktalarının model içerisindeki konumları ve temel sistemine göre göreli yerleri Şekil 16'da boyutlandırılmış olarak gösterilmiştir.

A–E noktalarında elde edilen yüzey ivmesi sonuçlarının farklılık göstermesinde, jet grout uygulamasının yanı sıra değerlendirme noktalarının temel sistemi içerisindeki konumu ve temel rijitliğinin de etkili olduğu değerlendirilmektedir.

A ve E noktalarının temel dışındaki zemin bölgelerinde, B ve D noktalarının 90 cm kalınlığındaki radye temel üzerinde, C noktasının ise 150 cm kalınlığındaki daha rijit temel bölgesinde bulunması nedeniyle deprem dalgalarının yapı-zemin sistemi içerisindeki yayılımı ve yüzey ivmesi farklılaşabilmektedir. Bu nedenle iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin arasındaki ivme farklarının değerlendirilmesinde noktasal konum ve temel rijitliği de dikkate alınmalıdır.

5. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Jet grout kolonlarında oluşan iç kuvvetler incelendiğinde deprem kayıtlarının kolon davranışı üzerinde belirgin farklılıklar oluşturduğu görülmektedir.

Bu durum, maksimum yer ivmesinin tek başına kolon performansını açıklamak için yeterli olmadığını göstermektedir. Deprem kayıtlarının frekans içeriği, etkin süresi ve enerji dağılımı, jet grout kolonlarının davranışında önemli rol oynamaktadır. Benzer şekilde, farklı kuvvetli yer hareketlerinin kullanıldığı sayısal bir çalışmada, maksimum deformasyonların yalnızca deprem büyüklüğü ve PGA ile açıklanamayacağı, yer hareketinin karakteristiklerinin de sonuçlar üzerinde etkili olacağı belirtilmiştir (Subaşı ve İyisan, 2022).

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, jet grout kolonlarının deprem sırasında oluşan yüklerin taşınmasına aktif olarak katıldığı, deprem kayıtlarına bağlı olarak farklı büyüklüklerde eksenel kuvvet ve eğilme momenti geliştirdiği görülmektedir.

6. SONUÇ

• Dinamik analiz sonuçları, jet grout kolonlarının deprem kayıtlarına bağlı olarak farklı iç kuvvet ve deformasyon taleplerine maruz kaldığını göstermiştir. Landers kaydında 742,7 kN/m ile en yüksek eksenel kuvvet elde edilmiş ve statik duruma göre yaklaşık %24 artış meydana gelmiştir.

• Kesme kuvveti açısından en yüksek değer Kocaeli kaydında 36,5 kN/m olarak elde edilmiş ve statik durumdaki 3,5 kN/m değerine göre yaklaşık 10,4 kat artış meydana gelmiştir. Kocaeli kaydı aynı zamanda 195,1 mm ile en yüksek toplam ve 184 mm ile en yüksek düşey kolon deplasmanı oluşturmuştur.

• Eğilme momenti açısından en kritik kayıt Hector Mine olmuştur. Bu kayıtta 157,3 kNm/m maksimum moment elde edilmiş ve statik duruma göre yaklaşık 19,4 kat artış meydana gelmiştir. Hector Mine kaydında deplasmanların diğer kayıtlara göre daha düşük olmasına rağmen moment talebinin en yüksek seviyeye ulaşması, deprem kaydının kolon üzerindeki etkisinin yalnızca deplasman büyüklüğü ile açıklanamayacağını göstermektedir.

• Imperial Valley ve Landers kayıtlarında benzer düşey deplasmanlar elde edilmesine rağmen kolon iç kuvvetlerinde belirgin farklılıklar oluşmuştur. Bu durum, kolon davranışının yalnızca deprem büyüklüğü veya PGA ile değil, deprem hareketinin frekans içeriği, süre ve enerji dağılımı gibi özellikleriyle de ilişkili olduğunu göstermektedir.

• Yüzey ivmesi sonuçlarında jet grout uygulamasının etkisinin tüm değerlendirme noktalarında aynı yönde olmadığı görülmüştür. Bazı noktalarda iyileştirme yüzey ivmesini azaltırken bazı noktalarda artırmıştır. Bu sonuç, zemin rijitliğindeki değişimin deprem dalgalarının yayılımı ve yüzeydeki ivme dağılımı üzerinde mekânsal olarak farklı etkiler oluşturabileceğini göstermektedir.

• Genel olarak değerlendirildiğinde, farklı deprem kayıtları aynı zemin ve iyileştirme koşulları altında kolonlarda farklı kritik davranış biçimleri meydana getirmiştir. Bu nedenle jet grout ile iyileştirilmiş zeminlerin deprem performansının yalnızca oturma veya taşıma gücü üzerinden değil, eksenel kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti, deplasman ve yüzey ivmesi gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesiyle incelenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Coşkun, G. N., Türköz, M. ve Civelekler, E. (2025). "Bir Boyutlu Zemin Tepkisinin Tahmini: İnönü Havzası Örneği", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(3), 2017–2031. DOI: 10.31796/ogummf.1760960.

Karataş, H. ve Kahyaoğlu, M. R. (2026). "Field Performance Evaluation of Jet Grout Columns for Potential Liquefaction Risk Mitigation: A Comparative Study from the 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in İskenderun Coastal Zone", Mugla Journal of Science and Technology, 12(1), 58–71. DOI: 10.22531/muglajsci.1831957.

Modoni, G. ve Bzówka, J. (2012). "Analysis of Foundations Reinforced with Jet Grouting", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(12), 1442–1454. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000718.

Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). "PEER Ground Motion Database", University of California, Berkeley.

Sedighi, P., Schweiger, H. F., Wehr, W. J. vd. (2017). "Effect of Jet-Grout Columns on the Seismic Response of Layered Soil Deposits", International Journal of Geomechanics, 17(3).

Subaşı, O. ve İyisan, R. (2022). "Sıvılaşma Nedeniyle Meydana Gelen Oturmaların PM4Sand Bünye Modeli ile İncelenmesi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(3), 378–388. DOI: 10.5505/pajes.2021.06606.

Sünbül Güner, A. B. ve Kayakeser, U. (2026). "Jet Enjeksiyon Yöntemiyle Temel Zeminlerinde Sıvılaşma Riskinin Azaltılması: Saha ve Sayısal Analizler", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 17(1), 1–11. DOI: 10.24012/dumf.1871392.

Şahin, G., Toygar, O. ve Kahyaoğlu, M. R. (2022). "Sıvılaşma Riskinin Azaltılması için Kullanılan Jet Grout Kolonlarının Verimliliği Üzerine Bir Sayısal Çalışma", Türk Deprem Araştırma Dergisi, 4(2), 210–229. DOI: 10.46464/tdad.1170304.