# GEOGRİD İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TEMELLERİN FARKLI BOYUTLARDAKİ BİNALARIN SİSMİK PERFORMANSINA ETKİLERİ

# EFFECTS OF GEOGRID-REINFORCED FOUNDATIONS ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF DIFFERENT SIZE BUILDINGS

**Ayşe Edinçliler[1], Murat Çalıkoğlu[2]**

## ÖZET

Geosentetiklerin sığ temellerin altında donatı elemanı olarak kullanılması, taşıma gücünü artırmak ve sismik enerjiyi sönümleyerek üst yapıya iletilen ivmeleri azaltmak için oldukça etkili ve ekonomik bir yöntemdir. Bu çalışmada, farklı geogrid konfigürasyonları ile güçlendirilmiş zeminler üzerine inşa edilen iki farklı genişlikte, az katlı binaların sismik davranışı nümerik olarak incelenmiştir. Yapıların dinamik performansı üzerindeki etkileri detaylıca belirlemek amacıyla, modeller farklı kat sayıları dikkate alınarak oluşturularak kuvvetli deprem hareketi altında PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde geogrid donatı uzunluğu (B, 2B, 3B) gibi çeşitli konfigürasyon parametrelerinin, spektral ivme etkileri ve temel seviyesinden en üst katlara kadar iletilen ivme değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, geogrid ile zemin güçlendirme yönteminin sismik enerjiyi sönümlemede başarılı olduğunu; yapı kat sayısının ve seçilen geogrid konfigürasyonunun binaya etkiyen sismik talepleri azaltmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

***Anahtar Kelimeler:*** *Geogrid donatılı zemin, sismik performans, az katlı binalar, nümerik modelleme, Plaxıs 2D.*

## ABSTRACT

The use of geosynthetics as a reinforcement element under shallow foundations is a highly effective and cost-efficient method to increase bearing capacity, absorb seismic energy, and mitigate dynamic excitations transmitted to the superstructure In this study, seismic behavior of low-rise buildings of two different widths. constructed on soil reinforced with various geogrid configurations is numerically investigated. To determine the specific effects on the dynamic performance of these structures, analytical models were generated considering a different number of stories and analyzed under strong earthquake motion utilizing the PLAXIS 2D finite element software. Through these dynamic time-history analyses, the impacts of several geogrid configuration parameters, such as variations in reinforcement length (B, 2B, 3B), on spectral acceleration responses and transmitted accelerations from the foundation to the top floors were comparatively evaluated. The findings demonstrate that the geogrid reinforced soil successfully dissipates seismic energy, and that the number of stories and the utilized geogrid configuration play a critical role in reducing the seismic demands on the structural system.

***Keywords:*** *Geogrid-reinforced soil, seismic performance, low-rise buildings, numerical modeling, Plaxis 2D.*

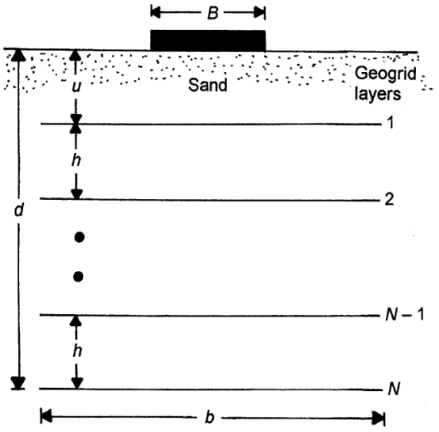
[1] Prof, Bogazici University, aedinc@bogazici.edu.tr
[2] PhD Student, Bogazici University, murat.calikoglu@std.bogazici.edu.tr

# 1. GİRİŞ

Depremlere maruz kalan zayıf zemin üzerine inşa edilen sığ temeller, düşük taşıma gücü ve aşırı oturma problemleri gibi ciddi mühendislik problemleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu durum üst yapılarda yapısal hasarlara, dayanım azalmalarına ve performans kayıplarına yol açabilmektedir. Geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri arasında zayıf kohezyonlu zeminin granüler bir dolgu ile değiştirilmesi veya temel boyutlarının artırılması yer almaktadır; ancak bu çözümler yüksek maliyetli ve zahmetlidir. Son yıllarda, sığ temellerin altında geosentetik (özellikle geogrid) malzemelerin donatı elemanı olarak kullanılması hem taşıma gücünü artırmak hem de oturma miktarlarını azaltmak için oldukça etkili, pratik ve ekonomik bir alternatif yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Literatür incelendiğinde, geogrid donatılı zeminlerin statik yükler altındaki davranışı üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Das vd. (1998), geogrid takviyeli kum zeminlerin statik yükler yanında dinamik yükler altında da temel oturmalarını ve deplasmanlarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Şekil 1). Patra vd. (2005) ise gömülü şerit temeller üzerine yaptıkları çalışmada; temel gömülme derinliği oranı ($D_f/B$) ve toplam donatı derinliği oranı (d/B) arttıkça, zeminin taşıma gücü oranının (BCR) da belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir. Zemin donatısı üzerine yapılan kapsamlı incelemelerde, geogrid kullanımının zemin içindeki gerilmeleri daha geniş bir alana yayarak temele iletilen yükleri ve gerilmeleri azalttığı belirtilmektedir.

Son yıllarda araştırmalar, geogrid donatılı sistemlerin sismik performansına yoğunlaşmıştır. Sismik hareketler altında geogrid tabakaları, kendi yüksek çekme dayanımları ve zeminle olan arayüz etkileşimleri sayesinde sismik enerjiyi sönümleme görevi üstlenmektedir. Bu sayede, deprem sırasında üst yapıya iletilen ivme ve sismik kuvvet değerleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Edinçliler ve Toksoy (2019), sismik performans değerlendirmelerinde deprem karakteristiklerinin ve donatı konfigürasyonunun (donatı genişliği, kat sayısı vb.) kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamıştır. Edinçliler vd. (2017) ile Edinçliler ve Toksoy (2019) tarafından yapılan nümerik çalışmalarda, geogrid takviyesinin orta katlı binalarda deprem kaynaklı eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kalıcı temel oturması değerlerini ciddi oranda düşürdüğü ortaya konmuştur. Ayrıca, Burnwal ve Raychowdhury (2023) tarafından gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde, suya doygun kum zeminlerde geogrid kullanılmasının az katlı (3 katlı) çerçeve yapılarda oturma riskini ve üst yapı deplasmanlarını etkin şekilde azalttığı saptanmıştır.




Şekil 1. Geogrid donatılı temel sistemine ait geometrik parametreler (Das vd. (1998)).

Bu çalışma kapsamında, farklı geogrid konfigürasyonları ile güçlendirilmiş kumlu zeminler üzerine inşa edilen az katlı binaların sismik davranışı nümerik olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile geogrid donatı uzunluğu (B, 2B, 3B) gibi konfigürasyon parametrelerinin, spektral ivme etkileri ve temelden en üst kata kadar iletilen ivme değerleri üzerindeki etkileri Plaxis 2D programı kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

# 2. METHODOLOJİ VE MALZEMELER

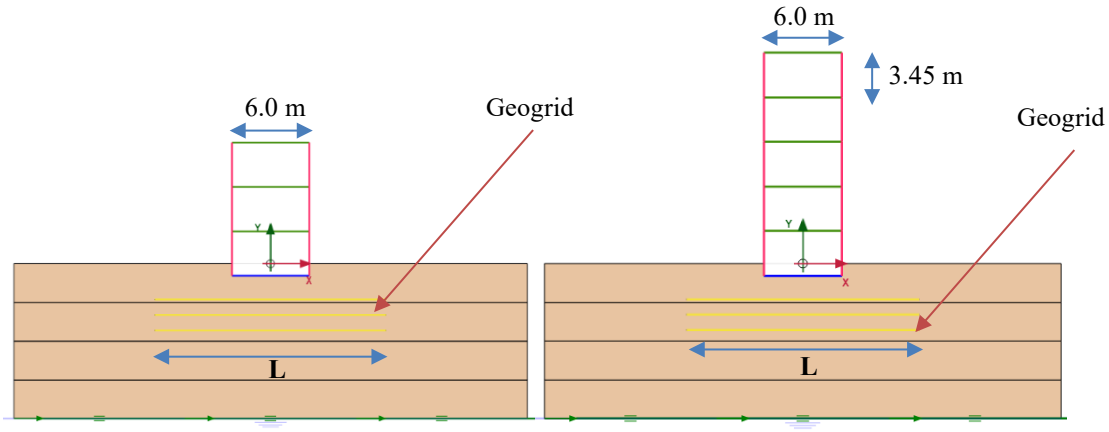
## 2.1. Methodoloji

Farklı yapı yüksekliklerinde binalara uygulanan geogrid zemin donatısı konfigürasyonunun binanın sismik performansa etkisini sistematik olarak belirlemek amacıyla, az katlı moment aktaran çerçeve sistemleri temsil eden üç ve beş katlı bina modelleri detaylıca incelenmiştir. Nümerik analizlerde kullanılan bina çerçevelerinin geometrik boyutları; bina genişliği (b) 6.00 m, tipik kat yüksekliği (h) 3.45 m ve radye temel tarafından desteklenen toplam temel genişliği (B) 6.00 m olacak şekilde tanımlanmıştır.

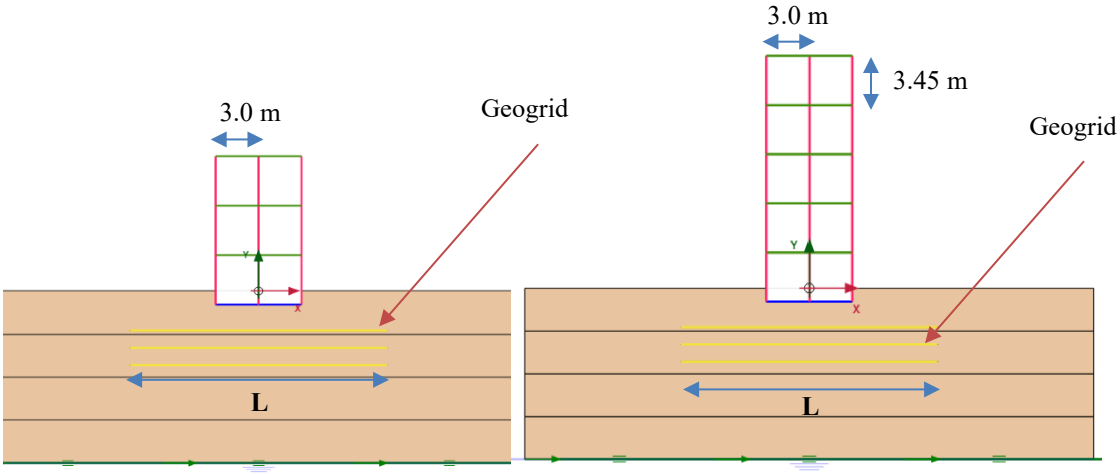
Yapıların biri tek açıklıklı, diğeri ise iki açıklıklı moment aktaran çerçeve sistemine sahip olup, her bir açıklık genişliği 3.00 m'dir. Bu yapı modellerinin sığ temelleri altında, sismik performansı iyileştirmek amacıyla üç tabakalı (N = 3) geogrid donatılı zemin sistemi modellenmiştir. Standart donatı aralığı kriterlerine göre tasarlanan bu sistemde; ilk geogrid tabakası temel tabanından itibaren u = 1.80m (u/B = 0.30) derinliğe yerleştirilmiş, ardışık donatılar arasındaki dikey mesafe h = 1.20m (h/B = 0.20) olarak sabit tutulmuş ve böylece toplam güçlendirilmiş zemin derinliği d = 4.20m (d/B = 0.70) olarak tanımlanmıştır (Tablo 1, Şekil 2 ve Şekil 3).

Tablo 1. Numerik analiz model parametreleri.

| Parametre | Sembol | Değer |
|---|---|---|
| Temel Genişliği | B | 6.0 m |
| Bina Genişliği | b | 6.0 m |
| Temel Gömülme Derinliği | $D_f$ | 1.0 m |
| Geogrid Tabaka Sayısı | N | 3 adet |
| Geogrid Eksenel Rijitliği | EA | 500,000 N/m |
| İlk Tabaka Derinlik Oranı | u/B | 0.30 |
| İlk Tabaka Derinliği | u | 1.80 m |
| Tabakalar Arası Mesafe Oranı | h/B | 0.20 |
| Tabakalar Arası Mesafe | h | 1.20 m |
| Toplam Donatı Derinlik Oranı | d/B | 0.70 |
| Toplam Donatı Derinliği | d | 4.20 m |
| Geogrid Donatı Boyları | L | 6.0 m, 12.0 m, 18.0 m |
| Model Boyutları | X,Y | 40 m x 12 m |
| Ağ Hassasiyeti | - | Medium |




Şekil 2. Tek açıklıklı bina için nümerik modeller.




Şekil 3. İki açıklı bina için nümerik modeller.

Nümerik modelde yapısal elemanlar (kolonlar, kirişler ve döşemeler) ile radye temel, doğrusal elastik davranış gösteren elemanlar kullanılarak tanımlanmıştır. Yapısal elemanlara ait eksenel rijitlik (EA) ve eğilme rijitliği (EI) değerleri, bina modelinin dinamik karakteristiklerini yansıtacak şekilde Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Bina malzeme özellikleri.

| Parametre | Temel | Kolon | Kiriş/Döşeme |
|---|---|---|---|
| $EA_1$ | 14.7E6 kN/m | 814E3 kN/m | 3.00E6 kN/m |
| $EA_2$ | 14.7E6 kN/m | 814E3 kN/m | 3.00E6 kN/m |
| EI | 312.5E3 $kNm^2/m$ | 3510 $kNm^2/m$ | 2500 $kNm^2/m$ |

Bu çalışmada, geogrid donatılı kumlu zeminler üzerine inşa edilen az katlı binaların sismik davranışı, sonlu elemanlar yöntemini temel alan yazılım kullanılarak iki boyutlu düzlem şekil değiştirme koşullarında nümerik olarak incelenmiştir (Tablo 3). Çalışma kapsamında kumlu zeminin elasto-plastik ve boşaltma-yeniden yükleme altındaki dinamik davranışını gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek amacıyla Hardening Soil Small-Strain (HS Small) zemin bünye modeli tercih edilmiştir. Bina taşıyıcı çerçevesi ve sığ temel, elastik elemanlar ile modellenmiş; yapılar tek açıklıklı ve çift açıklıklı olacak şekilde iki farklı mimari konfigürasyonda ele alınmıştır. Temel altında konumlandırılan zemin donatısı olarak, sismik analizlerde yaygın olarak tercih edilen eksenel çekme rijitliğine sahip çok tabakalı tek eksenli geogrid tanımlanmıştır. Geogrid donatısının yerleşim geometrisinde literatürle uyumlu standart donatı aralığı kriterleri benimsenerek; ilk tabaka derinliği,

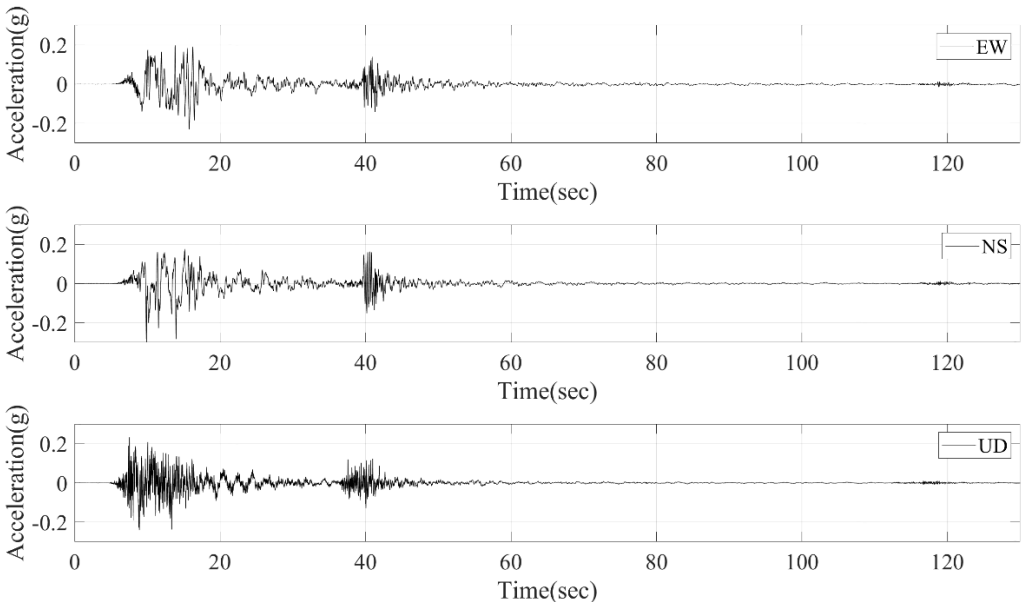
tabakalar arası dikey mesafe ve toplam donatı derinliği temel genişliğine bağlı belirli oranlar dahilinde sabit tutulmuştur. Donatı uzunluğunun sismik sönümleme performansına etkisini belirlemek amacıyla geogrid boyları temel genişliğinin katları şeklinde sistematik olarak değiştirilmiştir. Böylece tek/çift açıklık ve farklı kat kombinasyonlarıyla oluşturulan donatılı durumlar için dinamik analizler gerçekleştirilerek spektral ivme ve kat ivmeleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Nümerik analizde değerlendirilen analiz özellikleri.

| Analiz No | Kat Adedi | Açıklık Adedi | Geogrid Uzunluğu | Model No. | Yer Hareketi |
|---|---|---|---|---|---|
| #1 | 3 | 1 | B – G1 | 3ST – G1 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #2 | 5 | 1 | B – G1 | 5ST – G1 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #3 | 3 | 1 | 2B – G2 | 3ST – G2 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #4 | 5 | 1 | 2B – G2 | 5ST – G2 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #5 | 3 | 1 | 3B – G3 | 3ST – G3 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #6 | 5 | 1 | 3B – G3 | 5ST – G3 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #7 | 3 | 2 | B – G1 | 3ST – G1 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #8 | 5 | 2 | B – G1 | 5ST – G1 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #9 | 3 | 2 | 2B – G2 | 3ST – G2 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #10 | 5 | 2 | 2B – G2 | 5ST – G2 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #11 | 3 | 2 | 3B – G3 | 3ST – G3 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #12 | 5 | 2 | 3B – G3 | 5ST – G3 | 1999 Kocaeli Depremi |
| #13 | 3 | 1 | - | 3ST – RM1* | 1999 Kocaeli Depremi |
| #14 | 5 | 1 | - | 5ST – RM1* | 1999 Kocaeli Depremi |
| #15 | 3 | 2 | - | 3ST – RM2* | 1999 Kocaeli Depremi |
| #16 | 5 | 2 | - | 5ST – RM2* | 1999 Kocaeli Depremi |

*RM1: Tek açıklıklı sistem için Referans Model
*RM2: İki açıklıklı sistem için Referans Model

Temel zeminine yerleştirilen geogrid tabakanın, binaların sismik performansına olan etkisini değerlendirmek amacıyla, analizlerde sismik girdi olarak 1999 Kocaeli Depremi yer hareketinin Kuzey-Güney (NS) doğrultusu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen dinamik analizlerde, deprem sırasında Yarımca istasyonunda kaydedilen ivme kaydı modele taban ivmesi (girdisi) olarak uygulanmıştır (Şekil 4).




Şekil 4. 1999 Kocaeli depremi Yarımca istasyonu ivme kayıtları

### 2.2. Malzemeler

Temel zemini, ortalama kayma dalgası hızı (Vs) 340 m/s olan ve D Tipi zemin sınıfında kategorize edilen Silivri Kumu ile temsil edilmiştir. Silivri kumunun geoteknik parametreleri arasında 33°'lik efektif içsel sürtünme açısı (ϕ′) ile sırasıyla 16.5 kN/m³ ve 20.0 kN/m³ olan kuru ve doygun birim hacim ağırlık değerleri yer almaktadır (Çalıkoğlu, 2017), (Edinçliler ve Çalıkoğlu, 2017). Nümerik modellerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 4. Bu çalışmada değerlendirilen zemin parametreleri.

| Parametre | Değer |
|---|---|
| $\gamma_{unsat}$ | 16.5 kN/m$^3$ |
| $\gamma_{sat}$ | 20.0 kN/m$^3$ |
| φ | 33° |
| $E_{50}^{ref}$ | 13560 kPa |
| $E_{oed}^{ref}$ | 13560 kPa |
| $E_{ur}^{ref}$ | 40680 kPa |
| $G_0^{ref}$ | 85500 kPa |
| Model | HS Small |

Sayısal çalışmada, zemin profili yatay olarak dört eşit tabakaya bölünmüştür (Tablo 5).

Tablo 5. Zemin profili.

| Zemin Cinsi | Derinlik (m) | Birim Hacim Ağırlığı (kN/m$^3$) | $V_s$ Değeri (m/sn) |
|---|---|---|---|
| Silivri Kumu | 3 | 16.5 | 243 |
| Silivri Kumu | 6 | 16.5 | 300 |
| Silivri Kumu | 9 | 16.5 | 335 |
| Silivri Kumu | 12 | 16.5 | 357 |

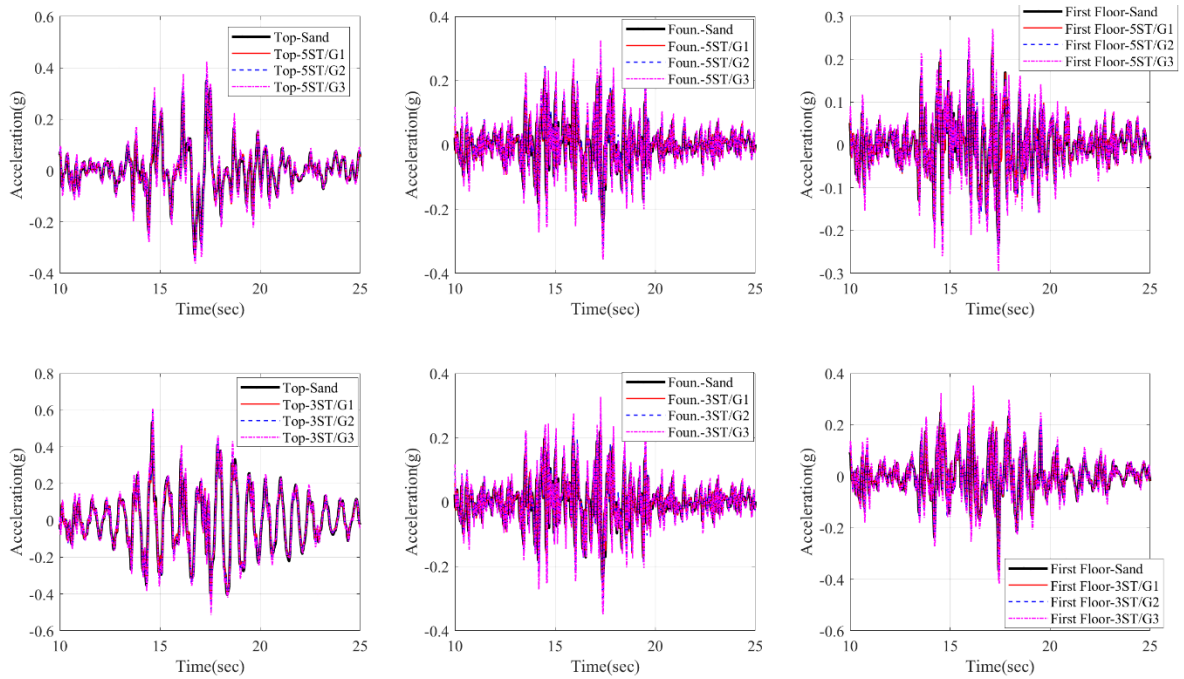
## 3. ANALİZ BULGULARI

Geogrid ile iyileştirilmiş zemin altındaki binaların sismik performansı, sonlu elemanlar analizleri kapsamında kuvvetli deprem hareketi altında değerlendirilmiştir. Zemin iyileştirme verimliliği; geogrid donatılı modellerin (Analiz 1 ile Analiz 12) maksimum yatay ivme ve maksimum spektral ivme (PSA) değerlerinin, farklı donatı uzunlukları (B, 2B ve 3B), kat sayıları (3 ve 5 katlı) ve açıklık sayıları bazında birbiriyle karşılaştırılmasıyla sayısal olarak belirlenmiştir.

### 3.1. Tek Açıklıklı Bina Modeli

Tek açıklıklı bina sistemini dikkate aldığımızda üç katlı referans bina modelinde (3ST-RM1), sismik sarsıntı sırasında kaydedilen maksimum yatay ivmeler en üst katta 0.53g, birinci katta 0.36g ve temel seviyesinde 0.24g olarak ölçülmüştür. Sistemin temel altında B uzunluğunda geogrid tabakası ile iyileştirilmesiyle (Analiz #1), bu ivme değerleri sırasıyla en üst katta 0.53g'den 0.52g'ye, birinci katta 0.36g'den 0.32g'ye ve temel seviyesinde ise 0.24g'den 0.20g'ye düşmüştür. Donatı uzunluğunun 2B'ye çıkarıldığı konfigürasyonda (Analiz #2) zemin iyileştirme verimliliği daha da belirginleşmiş; ivme değerleri en üst katta 0.47g'ye, birinci katta 0.32g'ye ve temel seviyesinde ise 0.17g'ye gerilemiştir. Diğer taraftan, donatı uzunluğunun 3B'ye yükseltildiği konfigürasyonda (Analiz #3) ise en üst katta 0.46g, birinci katta 0.31g ve temel seviyesinde 0.14g değerleri kaydedilmiştir. Bu bulgular, iyileştirilmiş zemin altındaki binalarda geogrid donatı uzunluğu arttıkça yapıya iletilen ivmelerin kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Ancak, geogrid boyunun

2B'den 3B'ye çıkarılmasının sismik performansa ek katkısının oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, mühendislik tasarımı açısından 2B (12.0 m) donatı uzunluğunun sismik performans açısından en iyi olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 5).



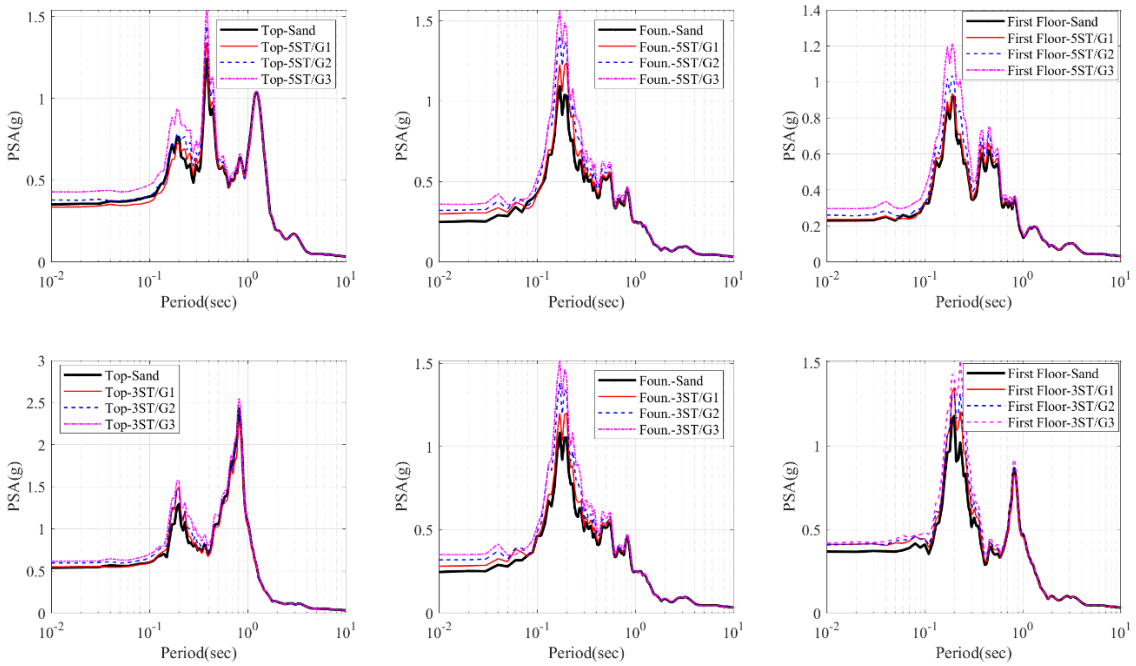

Şekil 5. Tek açıklıklı bina modeli için ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

Benzer bir maksimum spektral ivme (PSA) düşüş eğilimi, yapı yüksekliklerine göre çizdirilen spektral ivme profillerinde de açıkça görülmektedir. Üç katlı referans bina modelinde; en üst katta 2.43g, birinci katta 1.18g ve temel seviyesinde 1.08g spektral ivme değerleri ölçülmüştür. Modele B uzunluğunda geogrid donatısının entegre edilmesiyle (Analiz #1), spektral ivmeler birinci katta 1.18g'den 1.01g'ye, temel seviyesinde ise 1.08g'den 0.96g'ye düşerken, en üst katta zemin-yapı etkileşimi nedeniyle spektral ivme 2.59g olarak kaydedilmiştir (Şekil 6). Donatı uzunluğunun 2B'ye çıkarıldığı Analiz #2 konfigürasyonunda spektral ivme değerleri en üst katta 2.46g, birinci katta 1.05g ve temel seviyesinde 0.78g seviyesine çekilmiştir. Donatının 3B uzunluğunda uygulandığı Analiz #3 senaryosunda ise en üst katta 2.31g, birinci katta 0.85g ve temel seviyesinde 0.65g değerleri elde edilmiştir.

Beş katlı bina modelleri ele alındığında, referans modelde (5ST – RM1) spektral ivme değerleri en üst katta 1.24g, birinci katta 0.92g ve temel seviyesinde 1.09g olarak saptanmıştır. Temel altında B uzunluğunda geogrid kullanılan Analiz #4 konfigürasyonunda bu değerler sırasıyla en üst katta 1.14g'ye, birinci katta 0.90g'ye ve temel seviyesinde ise 0.94g'ye gerilemiştir. Donatı boyunun 2B'ye uzatıldığı Analiz #5 senaryosunda spektral ivmeler en üst katta 1.04g, birinci katta 0.80g ve temel seviyesinde 0.77g olarak ölçülürken; 3B donatı boyuna sahip Analiz #6 modelinde ise en üst katta 0.94g, birinci katta 0.63g ve temel seviyesinde 0.62g seviyelerine kadar düşmüştür.

Nihayetinde nümerik analiz sonuçları, geogrid ile yapılan zemin iyileştirme uygulamasının binalara iletilen deprem enerjisini dağıtmada son derece etkili olduğunu göstermektedir. İvme bulgularıyla birlikte değerlendirildiğinde, geogrid boyunun 2B (12.0 m) olarak seçilmesinin üç ve beş katlı binaların sismik performansını artırmada teknik kararlılık, güvenlik ve ekonomik fizibilite açısından en optimum tasarımı sunduğu saptanmıştır.

Nümerik analizlerden elde edilen maksimum yatay ivme ve spektral ivme değerleri, farklı bina açıklıkları, kat sayıları ve donatı uzunluğu konfigürasyonları bazında Tablo 6 ve Tablo 7'de detaylı olarak sunulmaktadır.




Şekil 6. Tek açıklıklı bina modeli için spektral ivme-periyot grafiklerinin karşılaştırılması.

Tablo 6. Tek açıklıklı bina modeli için maksimum ivme değerleri.

| İvme (g) | 3- kat | | | 5- kat | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temel | Birinci kat | En üst kat | Temel | Birinci kat | En üst kat |
| Donatısız | 0.24 | 0.36 | 0.53 | 0.25 | 0.23 | 0.35 |
| B – G1 | 0.20 | 0.32 | 0.52 | 0.20 | 0.23 | 0.37 |
| 2B – G2 | 0.17 | 0.32 | 0.47 | 0.18 | 0.20 | 0.32 |
| 3B – G3 | 0.14 | 0.31 | 0.46 | 0.14 | 0.16 | 0.28 |

Tablo 7. Tek açıklıklı bina modeli için maksimum spektral ivme değerleri.

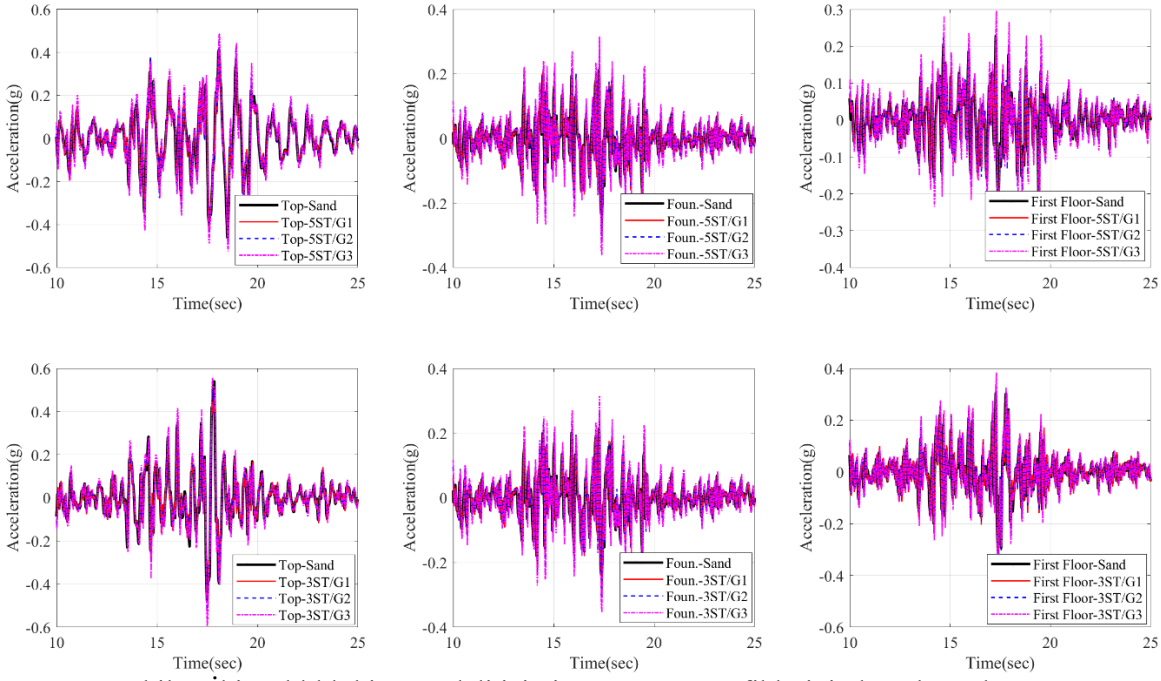
| Spektral İvme (g) | 3- kat | | | 5- kat | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temel | Birinci kat | En üst kat | Temel | Birinci kat | En üst kat |
| Donatısız | 1.08 | 1.18 | 2.43 | 1.09 | 0.92 | 1.24 |
| B – G1 | 0.96 | 1.01 | 2.59 | 0.94 | 0.90 | 1.14 |
| 2B – G2 | 0.78 | 1.05 | 2.46 | 0.77 | 0.80 | 1.04 |
| 3B – G3 | 0.65 | 0.85 | 2.31 | 0.62 | 0.63 | 0.94 |

## 3.2. İki Açıklıklı Bina Modeli

İki açıklıklı bina modelini dikkate aldığımızda, üç katlı referans bina modelinde (3ST – RM2) sismik sarsıntı sırasında kaydedilen maksimum yatay ivmeler en üst katta 0.54g, birinci katta 0.30g ve temel seviyesinde 0.24g olarak ölçülmüştür. Sistemin temel altında B uzunluğunda geogrid tabakası ile iyileştirilmesiyle (Analiz #7), ivme değerleri temel seviyesinde 0.24g'den 0.19g'ye ve birinci katta 0.30g'den 0.25g'ye gerilerken, en üst katta zemin-yapı etkileşimi ve kısa donatı boyu nedeniyle ivme değeri 0.54g'den 0.60g'ye yükselmiştir.

Donatı uzunluğunun 2B'ye çıkarıldığı konfigürasyonda (Analiz #8) ivme değerlerindeki düşüş trendi belirginleşmiş; ivmeler temel seviyesinde 0.16g'ye, birinci katta 0.21g'ye gerilerken, en üst katta referans model seviyesi olan 0.54g değerinde dengelenmiştir. Geogrid uzunluğunun 3B'ye yükseltildiği Analiz #9 senaryosunda ise sismik performans en üst düzeye ulaşmış; maksimum yatay ivmeler en üst katta 0.49g'ye, birinci katta 0.17g'ye ve temel seviyesinde ise 0.13g'ye kadar düşmüştür.

Bu bulgular, iki açıklıklı (yapısal rijitliği daha yüksek) az katlı binalarda geogrid ile zemin iyileştirme uygulamalarında kısa donatı boyunun (B boyunun) üst katlarda sismik ivme büyütmesine yol açabileceğini göstermektedir. Ancak donatı uzunluğu 2B (12.0 m) ve özellikle 3B (18.0 m) seviyelerine çıkarıldığında zemin iyileştirme verimliliğinin üst yapı ivmelerini kontrol altına almada son derece başarılı olduğu saptanmıştır. Bu durum, rijitliği yüksek çok açıklıklı binalarda güvenli bir sismik tasarım için minimum 2B donatı boyunun kritik bir alt sınır değer olarak seçilmesi gerektiğini doğrulamaktadır (Şekil 7).

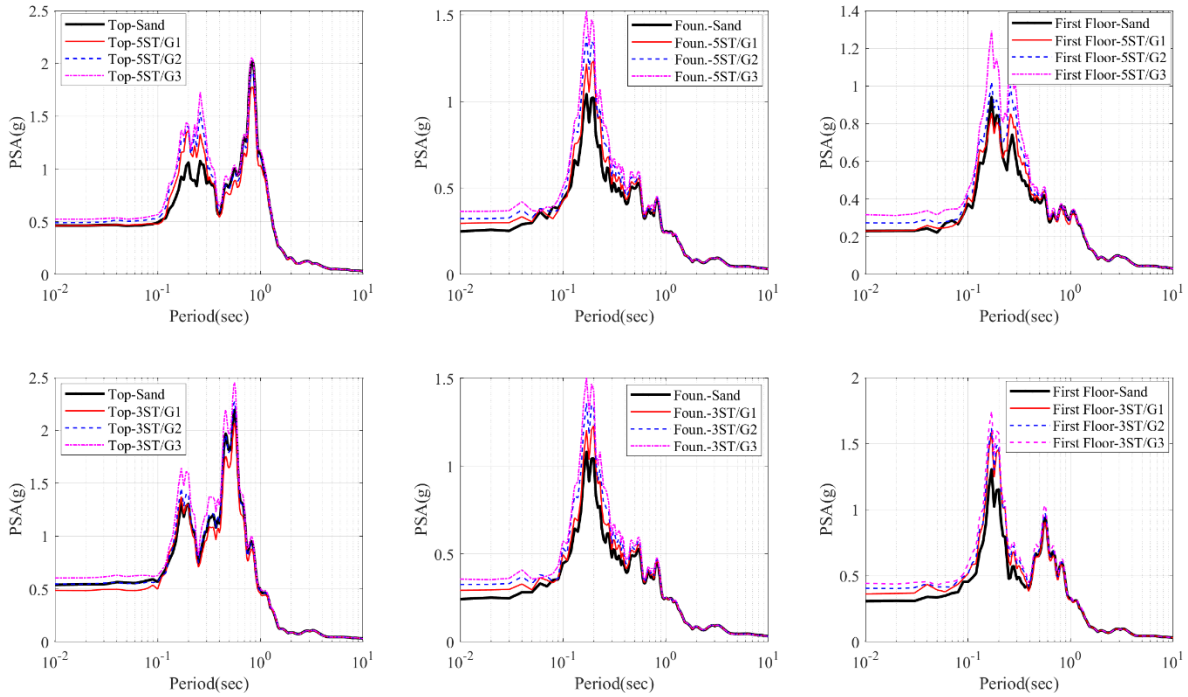



Şekil 7. İki açıklıklı bina modeli için ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

İki açıklıklı sistemi dikkate aldığımızda, üç katlı referans bina modelinde spektral ivme (PSA) değerleri en üst katta 2.19g, birinci katta 1.31g ve temel seviyesinde 1.08g olarak saptanmıştır. Sistemin temel altında B uzunluğunda geogrid tabakası ile iyileştirilmesiyle (Analiz #7), spektral ivmeler temel seviyesinde 1.08g'den 0.93g'ye ve birinci katta 1.31g'den 1.03g'ye gerilerken; en üst katta zemin-yapı etkileşimi ve yetersiz donatı uzunluğu nedeniyle spektral ivme değeri 2.19g'den 2.31g'ye yükselerek hafif bir artış sergilemiştir. Donatı uzunluğunun 2B'ye çıkarıldığı Analiz #8 konfigürasyonunda spektral ivme değerlerindeki bu olumsuz artış kontrol altına alınmış; ivmeler en üst katta 2.11g'ye, birinci katta 1.00g'ye ve temel seviyesinde 0.80g'ye çekilmiştir. Geogrid uzunluğunun 3B'ye yükseltildiği Analiz #9 senaryosunda ise spektral ivme değerleri en üst katta 1.93g, birinci katta 0.87g ve temel seviyesinde 0.66g değerlerine kadar düşürülerek en başarılı spektral sönümleme elde edilmiştir.

Beş katlı iki açıklıklı sistemler değerlendirildiğinde ise, referans bina modelinde (5ST – RM2) spektral ivme talepleri en üst katta 2.02g, birinci katta 0.94g ve temel seviyesinde

1.04g'dir. Temel altında B uzunluğunda geogrid kullanılan Analiz #10 konfigürasyonunda spektral ivme temel seviyesinde 0.85g'ye gerilerken, birinci katta 1.02g'ye ve en üst katta ise 2.26g'ye tırmanmıştır. Donatı boyunun 2B'ye uzatıldığı Analiz #11 senaryosunda spektral ivmeler en üst katta 2.12g, birinci katta 0.86g ve temel seviyesinde 0.71g olarak ölçülmüştür. Donatının 3B uzunluğuna çıkarıldığı Analiz #12 modelinde ise spektral ivme talepleri en üst katta referans seviyesinin altına düşerek 1.98g, birinci katta 0.59g ve temel seviyesinde ise 0.56g olarak kaydedilmiştir. Bu bulgular, rijitliği yüksek iki açıklıklı binalarda kısa donatı boyunun üst katlarda spektral ivme büyümesine zemin hazırladığını ortaya koymaktadır. Ancak geogrid donatı uzunluğu 2B (12.0 m) ve üstü seviyelere çıkarıldığında, spektral ivme talepleri özellikle temel ve üst kat seviyelerinde çok kararlı ve güvenli bir düşüş trendine girmektedir. Dolayısıyla, iki açıklıklı yapıların zemin iyileştirme tasarımlarında hem ivme kontrolü hem de spektral performans açısından minimum 2B donatı uzunluğunun tercih edilmesi gerektiği açıkça kanıtlanmıştır (Şekil 8).




Şekil 8. İki açıklıklı bina modeli için spektral ivme-periyot grafiklerinin karşılaştırılması.

Tablo 8. İki açıklıklı bina modeli için maksimum ivme değerleri.

| İvme (g) | 3- kat | | | 5- kat | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temel | Birinci kat | En üst kat | Temel | Birinci kat | En üst kat |
| Donatısız | 0.24 | 0.30 | 0.54 | 0.25 | 0.23 | 0.46 |
| B – G1 | 0.19 | 0.25 | 0.60 | 0.20 | 0.23 | 0.46 |
| 2B – G2 | 0.16 | 0.21 | 0.54 | 0.18 | 0.19 | 0.44 |
| 3B – G3 | 0.13 | 0.17 | 0.49 | 0.14 | 0.15 | 0.40 |

Tablo 9. İki açıklıklı bina modeli için maksimum spektral ivme değerleri.

| Spektral İvme (g) | 3- kat | | | 5- kat | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temel | Birinci kat | En üst kat | Temel | Birinci kat | En üst kat |
| Donatısız | 1.08 | 1.31 | 2.19 | 1.04 | 0.94 | 2.02 |
| B – G1 | 0.93 | 1.03 | 2.31 | 0.85 | 1.02 | 2.26 |
| 2B – G2 | 0.80 | 1.00 | 2.11 | 0.71 | 0.86 | 2.12 |
| 3B – G3 | 0.66 | 0.87 | 1.93 | 0.56 | 0.59 | 1.98 |

# 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sığ temeller altında donatı kullanılarak uygulanan zemin iyileştirme yönteminin az katlı binaların sismik performansı üzerindeki etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. 1999 Kocaeli depremi etkisi altında, yapı açıklıklarının (tek ve çift açıklık), yapı yüksekliğinin (kat sayısının) ve farklı geogrid donatı uzunluklarının (B, 2B, 3B) etkisini değerlendirmek amacıyla PLAXIS 2D yazılımı aracılığıyla kapsamlı iki boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Temel altında uygulanan geogrid donatılı zemin iyileştirmesi, deprem sarsıntısı sırasında temel seviyesinden üst yapılara iletilen sismik ivmeleri ve spektral ivme (PSA) değerlerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Bu durum az katlı yapıların deprem güvenliğini artırmada geogrid uygulamasının başarısını ortaya koymaktadır.

- Analiz sonuçları, tüm bina konfigürasyonlarında geogrid uzunluğunun B'den 2B'ye çıkarılmasının sismik performans üzerinde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Ancak donatı boyunun 2B'den 3B'ye çıkarılmasının binaya iletilen ivmeler ve spektral ivmeler üzerinde önemli bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Bu bulgu doğrultusunda, 2B (12.0m) donatı uzunluğunun optimum değer olduğu belirlenmiştir.

- Özellikle rijitliği yüksek iki açıklıklı bina modellerinde (hem 3 hem de 5 katlı analizlerde), kısa donatı boyunun (L = B) kullanılması durumunda, zemin-yapı etkileşimi nedeniyle en üst kat seviyesinde sismik ivme ve spektral ivme büyütmesi meydana geldiği saptanmıştır. Bu durum, çok açıklıklı binaların altındaki zemin iyileştirme tasarımlarında minimum donatı uzunluğunun 2B olarak seçilmesinin sismik güvenlik açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, yalnızca seçilen sismik yer hareketi girdisi ve kullanılan zemin ve geogrid malzemeleri ile sınırlıdır. Farklı yer hareketlerinin ve farklı geogrid özelliklerinin etkileri, gelecek çalışmalardaki nümerik analizlerde değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, bu nümerik değerlendirmeler iyileştirilmiş zemin üzerindeki binaların sismik performansına ilişkin kritik ön bulgular sağlasa da sistemin tam olarak doğrulanması için büyük ölçekli sarsma masası testleri ve saha deneyleri hayati önem taşımaktadır. Zemin iyileştirme etkinliği, binanın kat sayısına ve açıklık sayısına son derece duyarlıdır. Geogrid yerleşim geometrisi doğru optimize edildiğinde, bu yöntem özellikle gelişmekte olan ülkelerde az katlı yapı stoklarının sismik direncini artırmak için oldukça etkili, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır.

# KAYNAKLAR

Burnwal, M.L. ve Raychowdhury, P. (2023), "Rocking Shallow Foundations on Geogrid-reinforced Ganga Sand Bed: An Experimental Study", Journal of Earthquake Engineering, Vol 27, No 2, 434–450.

Çalıkoğlu, M. (2017). Experimental Study on Foundation Isolation Using Geosynthetics. Master's Thesis, Department of Earthquake Engineering, Boğaziçi University, Türkiye.

Das, B.M., Maji, A. ve Shin, E.C. (1998), "Foundation on Geogrid-Reinforced Sand — Effect of Transient Loading", Geotextiles and Geomembranes, Vol 16, 151-160.

Edinçliler, A., ve Çalıkoğlu, M. (2017). Improvement of the Seismic Performance of Low-Rise Buildings Using Geosynthetics: An Experimental Study. Seventh National Geosynthetics Conference (G7), İstanbul.

Edinçliler, A., Toksoy, Y.S. ve Yıldız, Ö. (2017), "Geogrid-Donatılı Zemin Üzerine İnşaa Edilen Orta Katlı Binaların Sismik Performansına Deprem Karakteristiklerinin Etkisi", 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (UDMSK), Eskişehir, Türkiye, 11-13 Ekim.

Edinçliler, A. ve Toksoy, Y.S. (2019), "Effects of Geogrid Reinforcement to Mitigate Earthquake Hazards of Medium-Rise Buildings Under Different Earthquake Motions", Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol 3, No 2, 9-22.

Patra, C.R., Das, B.M. ve Atalar, C. (2005), "Bearing Capacity of Embedded Strip Foundation on Geogrid-Reinforced Sand", Geotextiles and Geomembranes, Vol 23, No 5, 454-462.