



## Yapı-Zemin Etkileşimi Kapsamında Bodrum Kat Sayısının Sismik Davranış Üzerindeki Etkisi

### Effect of Embedded Substructure Levels on The Seismic Response of Buildings Considering Soil-Structure Interaction

Şahin Çağlar Tuna <sup>1\*</sup>, Selim Altun <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yaşar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: caglar.tuna@yasar.edu.tr

#### Öz

Yapı-zemin etkileşimi, özellikle zayıf mühendislik özelliklerine sahip zeminlerde inşa edilen yapılar için kritik bir konudur. Bu çalışma kapsamında, bodrum katlarının, sıg temelli yapıların deprem sırasındaki davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, farklı bodrum kat sayılarına sahip orta katlı betonarme binaların (1, 2 ve 3 bodrum katlı) çok katmanlı zemin tabakası üzerindeki dinamik tepkisi incelenmiştir. Çalışmada, yapı-zemin etkileşimi (SSI) dikkate alınarak sonlu elemanlar programı kullanılmış ve doğrudan yöntemle sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler, TBDY 2018 yönetmeliğinde belirtilen üç farklı deprem yer hareket düzeyi için seçilen zemin hareketleri altında, doğrusal olmayan zaman tanım alanında yapılmıştır. Tekrarlı simülasyonlar sonucunda, tepe noktasındaki yatay yer değiştirme değerleri hesaplanmış ve bodrum kat sayısının yanı sıra deprem düzeyi koşullarına bağlı olarak nasıl değiştiği detaylı şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, bodrum kat seviyelerinin yapıların genel sismik performansı ve zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Çalışmada yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler, deprem yönetmeliklerine uygun olarak bodrum katlı binaların tasarımına ilişkin önemli mühendislik verileri sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı-Zemin Etkileşimi, Bodrum Kat Seviyeleri, Sonlu Elemanlar Modellemesi, Yatay Yer Değiştirme, Sismik Performans

#### Abstract

Soil-structure interaction (SSI) is a critical consideration, particularly for buildings constructed on weak subsoil with poor geotechnical properties. This study aims to investigate the influence of basement levels on the seismic behavior of shallow-founded structures during earthquakes. To this end, the dynamic response of mid-rise reinforced concrete buildings with varying basement levels (1, 2, and 3 basement floors) was analyzed on a multilayered soil profile. The study incorporates SSI and employs a finite element software, conducting numerical analyses using the direct method. The analyses were performed in the nonlinear time domain under selected ground motions corresponding to three different seismic hazard levels, as defined by the Turkish Seismic Design Code (TBDY 2018). Repeated simulations were carried out to evaluate the lateral displacements at the roof level and examine their variations based on the number of basement floors and the seismic hazard level. The findings highlight the impact of basement levels on the overall seismic performance of structures and soil-structure interaction. The comparative assessments presented in this study provide valuable engineering insights for the design of basement-included buildings in compliance with seismic design codes.

**Keywords:** Soil-Structure Interaction, Basement Levels, Finite Element Modeling, Lateral Displacement, Seismic Performance

#### EXTENDED ABSTRACT

##### Introduction

Soil-Structure Interaction (SSI) plays a critical role in assessing seismic behavior, particularly for buildings constructed on weak soils. During an earthquake, the interaction between the structure and the supporting soil significantly alters the dynamic response of the system. In recent decades, embedded basement floors have received increasing attention for their potential to influence seismic demands. This study aims to examine the impact of basement levels on the seismic performance of mid-rise reinforced concrete buildings supported by shallow foundations. To this end, three different structural configurations with varying basement depths (1, 2, and 3 floors) were modeled using 3D finite element analysis. Ground motions corresponding to three seismic hazard levels (DD-1, DD-2, DD-3) as defined in the Turkish Earthquake Code (TBDY, 2018) were applied. The findings are intended to guide engineers and designers in

optimizing seismic performance by accounting for SSI in basement-included designs.

##### Materials and Methods

The study focuses on three buildings with identical superstructures but different basement depths (3 m, 6 m, and 9 m). Dynamic analyses were performed using PLAXIS 3D, a finite element software. The Hardening Soil model was used to represent the nonlinear stress-dependent behavior of soils, while realistic site conditions of Bayraklı, İzmir, were reflected in the stratigraphy. Ground motions representing three seismic design levels (DD-1, DD-2, and DD-3) were scaled to match the site-specific response spectrum. The structural and soil models were fully integrated, allowing SSI to be explicitly represented through the direct method. Lateral displacements, vertical settlements, and acceleration time histories were obtained and compared across different scenarios.

## Results and Discussion

he results demonstrate a clear trend: as the number of basement floors increases, both lateral displacements and vertical settlements decrease. This effect is particularly pronounced under DD-1 seismic loading. The 3-basement configuration exhibited the lowest roof displacements, indicating enhanced global stiffness and energy dissipation due to greater embedment. While similar trends were observed for DD-2 and DD-3 events, the magnitude of improvement was less significant. The study supports existing literature suggesting that deeper basements can reduce seismic demand. However, it also highlights the need to consider potential SSI-induced amplifications at certain frequencies. Comparative graphs show a consistent reduction in seismic response with increasing basement depth across all earthquake levels.

### 1. Giriş

Yapı-zemin etkileşimi, bir binanın ve onu taşıyan zeminin, deprem gibi dinamik yükler altında birlikte hareket ettiği ve birbirlerini karşılıklı olarak etkilediği bir olgu olarak tanımlanmaktadır [1]. Deprem anında, sismik dalgalar zemin içerisinde ilerleyerek yapı-temel sistemine ulaşır ve bu dalgaların bir bölümü temel seviyesinden yansıyarak geri döner. Bununla birlikte, dalgaların belirli bir kısmı üstyapıya aktarılır ve binanın titreşimine neden olduktan sonra tekrar zemine geçiş yapar.

Taşıma gücü az olan ve yüksek oturma potansiyeline sahip zemin formasyonları üzerinde inşa edilen yapıların deprem etkilerine karşı sergilediği davranışların, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak analiz edilmesi son derece önemlidir. 20. yüzyılın sonlarına doğru, nükleer enerji santralleri gibi kritik öneme sahip yapıların depreme dayanıklılığını artırmaya yönelik çalışmalar, yapı-zemin etkileşimi konusunun giderek daha fazla araştırılmasına neden olmuştur.

Temellerin dinamik analizinde sıkça tercih edilen yöntemler, ilk olarak Lysmer [2] tarafından geliştirilerek literatüre dahil edilmiştir. Daha sonraki yıllarda, Richart ve Whitman [3] ile Richart ve Wood [4] bu yaklaşımları geliştirerek kapsamını genişletmiş ve yapı-zemin etkileşimi üzerine önemli katkılarda bulunmuşlardır.

Çeşitli çalışmalar [5-7] yapı-zemin etkileşimi (SSI) etkilerinin, dinamik yapısal tepkiler üzerinde önemli bir rol oynadığını ve bu etkinin yapısal tasarım sürecinde dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Lou ve ark. [8], yapı-zemin etkileşiminin tarihsel gelişimini ve binalar üzerindeki etkisini geniş kapsamlı bir şekilde ele alarak, bu etkileşime bağlı olarak karşılaşılan mühendislik zorluklarına değinmişlerdir. Abdel Raheem ve ark. [9] ise, farklı zemin koşullarında radye temellerle desteklenen orta katlı betonarme yapılar üzerindeki yapı-zemin etkileşimi etkilerini incelemiştir.

Bunun yanı sıra, [10-13] tarafından yapılan son araştırmalar, yapı-zemin etkileşiminin (SSI), zemin türünden bağımsız olarak bodrum katları bulunan yüksek binalarda yapısal talepleri (örneğin yatay deplasmanlar, kesme kuvvetleri ve iç kuvvetler) artırabileceğini ortaya koymuştur.

El Hoseny ve ark. [14], farklı bodrum kat yüksekliklerine sahip betonarme binalarda bodrum katların üstyapının yatay deplasmanlarını azalttığını ortaya koymuştur. Pinto vd. [15] ise bodrum derinliği, bina yüksekliği ve zemin özellikleri gibi parametrelerin sismik performans üzerindeki belirleyici etkilerini incelemiş, özellikle katlar arası öteleme ve doğal frekanslarda önemli değişimlere yol açtığını göstermiştir. Tehranizadeh ve Barkhordari [16] de, bodrum kat sayısı ve

## Conclusion

This study confirms that increasing basement depth improves the seismic performance of mid-rise RC buildings on shallow foundations. Greater embedment enhances stiffness, reduces lateral displacements, and improves overall dynamic behavior. These benefits are most significant under strong ground motions (DD-1), whereas under moderate and frequent earthquakes (DD-2 and DD-3), the impact is limited. The findings emphasize the importance of accounting for SSI and basement embedment in seismic design. Seismic codes should encourage detailed modeling for basement-included structures, moving beyond rigid base assumptions. Future work should include experimental validations and more complex SSI scenarios involving variable soil profiles and structural irregularities.

bodrum duvarlarındaki açıklıkların, yapı-zemin sisteminin taban seviyesi tanımında dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Literatürde de belirtildiği üzere, rijit temel varsayımı özellikle yüksek bodrum katlı binalarda yapı davranışını olduğundan daha güvenli tahmin edebilir. Örneğin El Hoseny ve ark. [14] analizlerinde sabit temel varsayımının çatı seviyesindeki deplasmanları, SSI içeren modele göre %35-65 oranında farklı gösterdiği; Zhang ve Far [17] ise SSI etkilerinin bazen temeldeki kayma kuvvetlerini önemli ölçüde artırabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca Bapir ve Abrahamczyk [18], rijit temel yaklaşımının yalnızca çok rijit zeminlerde geçerli olabileceğini vurgulamaktadır. Dolayısıyla, SSI'nin dikkate alınmaması potansiyel olarak hem güvenliği aşırı tahmin edebilir hem de yapısal tepkilerin gerçekçi değerlendirilmesini engelleyebilir.

Bu literatür çalışmaları, bodrum katlarının SSI bağlamında yapıların sismik davranışını belirleyen önemli bir faktör olduğunu ve doğru şekilde modellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

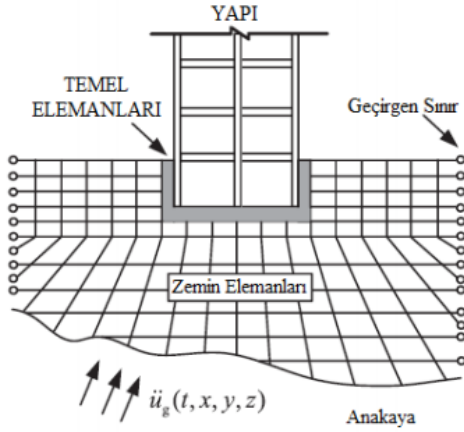
Bilal ve Fahjan [19] tarafından yapılan çalışmada, üstyapının modelde yer aldığı ve almadığı durumlarda ortaya çıkan temel tepki spektrumlarının değişimi, gömme derinliği ile ilişkili olarak incelenmiştir.

Buna ek olarak, Jagan ve Visuvasam [20] tarafından gerçekleştirilen sayısal analizler, yapı-zemin etkileşiminin yüzzer kolonlu yapılar üzerindeki sismik performansa etkisini araştırmıştır. Çalışma sonuçları, SSI etkilerinin yüzzer kolonlu yapıların hasar alma olasılığını artırdığını göstermektedir.

Bir yapının tasarım sürecinde bu etkileşim dikkate alınmadığında, deprem sırasında hem temel sisteminin hem de üstyapının dinamik tepkisinin doğru bir şekilde belirlenmesi mümkün olmayabilir. Bu sebeple, yapı-zemin etkileşiminin deprem koşullarındaki davranışı, deprem mühendisliği alanının temel araştırma konularından biri olmuştur.

Yapı-zemin etkileşimi, genellikle iki ana yöntemle incelenmektedir: doğrudan (direkt) yöntem ve alt sistem yöntemi [1]. Her iki yaklaşım da farklı avantajlar sunarak, yapıların deprem performansını daha doğru bir şekilde analiz etmeye olanak tanımaktadır.

Doğrudan (direkt) yöntem, yapı ve zemini birbirinden bağımsız ele almak yerine, bütünsel olarak değerlendiren bir analiz yaklaşımıdır. Bu yöntemde, deprem etkisi doğrudan bu birleşik sisteme uygulanır ve yapı ile zemin arasındaki etkileşim doğal olarak modellenmiş olur (Şekil 1).



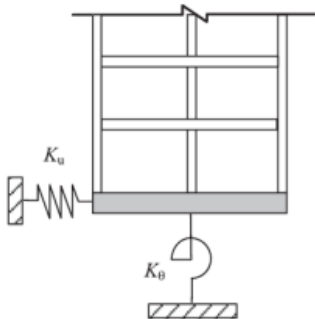
**Şekil 1.** Direkt yöntem ile analiz modeli.[21]

**Figure 1.** Analysis model by direct method. [21]

Buna karşılık, alt sistem yaklaşımı ise üstyapı ve altyapının ayrı sistemler olarak ele alındığı bir modelleme tekniğidir. Bu yöntemde, yapı ve temel ayrı ayrı incelenir ve aralarındaki etkileşim, belirlenen sınır koşulları doğrultusunda hesaplanarak analiz edilir [22]. Her iki yöntem de yapı-zemin etkileşiminin doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlarken, seçilecek yöntemin doğruluğu ve uygulanabilirliği zemin koşulları, yapı özellikleri ve analiz gerekliliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Alt sistem yöntemi, yapı-zemin dinamik etkileşimini iki temel bileşene ayırarak inceler (Şekil 2). Kinematik etkileşim analizlerinde, üç boyutlu olarak oluşturulan sisteme etkileyen zaman tanım alanında ivme hareketi tanımlanarak doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri yapılır. Bu analiz yaklaşımında, üstyapının eylemsizlik etkileri ihmal edilip temel rijit kabul edildiğinden dolayı, kinematik etkileşim üstyapıda iç kuvvet oluşumuna neden olmaz.

Eylemsizlik etkileşimi aşamasında, analizler üstyapının dinamik özellikleri göz önüne alınarak gerçekleştirilir. Bu yaklaşımda, üstyapı temel seviyesinde elde edilen etkin deprem hareketleri, temelde tanımlanmış eşdeğer dinamik rijitlik matrisine bağlı yaylar aracılığıyla üstyapıya iletilir [1]. Bu yöntem ile üstyapının sismik hareketi ve dinamik davranışı ayrıntılı biçimde incelenmektedir.



**Şekil 2.** Alt sistem yöntemi. [21]

**Figure 2.** Subsystem method.[21]

Alt sistem modellenmesi kapsamında sonlu elemanlar yöntemini ilk kez kullanan çalışmalar Vaish ve Chopra [23] tarafından yapılmıştır. Devam eden araştırmalarda ise Guitierrez ve Chopra [24], alt sistem formülasyonunu geliştirerek, özellikle zemin içine

gömülü temellerin modellenmesini kapsayacak şekilde genişletmişlerdir.

Deprem anında, yapı ve zemin birbirleriyle etkileşim içinde olmasına rağmen, bazı durumlarda yapıların statik ve dinamik tasarım süreçlerinde bu etkileşim göz ardı edilebilmektedir. Zemine kısmen gömülü olan yapılar, bodrum katları içeren binalar veya tünel gibi altyapı sistemleri, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumlarda hatalı mühendislik çözümlerine ve yanlış projelendirmelere neden olabilmektedir.

Bu tür yapılarda, deprem yükleri altında oluşan dinamik tepkilerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yapı-zemin etkileşimi mutlaka analiz edilmelidir. Özellikle, zemine gömülü yapı elemanlarının sismik performansı, üstyapı ile zemin arasındaki karşılıklı etkileşimin dikkate alınmadığı durumlarda eksik veya hatalı değerlendirilebilir. Bu nedenle, bu tür yapıların deprem davranışını anlamak ve güvenli tasarım ilkelerini uygulamak adına yapı-zemin etkileşiminin göz önünde bulundurulması kritik bir gerekliliktir.

Yapı-zemin-deprem etkileşimi, özellikle zayıf zemin koşullarına sahip alanlarda inşa edilen yapılar için kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, yüzeye yakın (sığ) temeller üzerine inşa edilen binaların sismik performansına bodrum kat sayısının etkisini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, farklı analiz modelleri oluşturulmuş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deprem yükleri altında kapsamlı olarak analiz edilmiştir.

Bu analizler kapsamında, deprem dalgalarının zemin ortamında yayılması, temel sistemine iletilmesi ve üstyapının bu hareketlere verdiği tepkiler detaylı olarak değerlendirilecektir. Böylece, bodrum kat seviyelerinin yapıların deprem davranışı üzerindeki rolü belirlenerek, tasarım ve mühendislik uygulamalarına yönelik öneriler sunulacaktır.

Bu çalışmanın asıl amacı, sığ temelli binalarda bodrum kat yüksekliğinin yapı-zemin etkileşimine etkisini belirlemektir. Bu kapsamda farklı bodrum kat seviyelerine sahip yapılar PLAXIS 3D yazılımında modellenmiş ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [22] belirtilen üç farklı deprem yer hareketi seviyesi altında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Çalışma kapsamında, yalnızca bodrum kat yüksekliği değiştirilerek üç farklı model oluşturulmuş olup, bu modeller 1, 2 ve 3 bodrum katlı (sırasıyla 3,6 ve 9 metre yüksekliğinde) yapı tiplerinden oluşmaktadır. Dinamik analizler sonucunda, farklı bodrum kat seviyelerine sahip binaların belirli noktalarındaki yer değiştirme değerleri, farklı deprem senaryoları altında karşılaştırılmış ve aralarındaki farklılıklar detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Sismik Deprem Verisi

İzmir ili, Batı Anadolu'da aktif tektonik hareketlerin yoğun olduğu bölgelerden biri olup, tarih boyunca sıkça deprem olaylarına maruz kalmıştır. Bölge, aktif graben faylarının yanı sıra bunlarla kesişen doğrultu atımlı faylar içermekte olup, oluşan depremlerin büyük bölümü Ege Denizi kaynaklıdır [25].

Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından İzmir ili merkez kabul edilerek, 50 km yarıçaplı bir alanda yapılan çalışmalarda 13 adet aktif fay belirlenmiştir. Bu fay hatları içerisinde önemli bir konuma sahip olan İzmir fayı, Karaburun Yarımadası ile Bayraklı arasında uzanmakta olup, önemli bir kısmı Ege Denizi altında kalmaktadır ve İzmir Körfezi'nin oluşumunda temel rol oynamıştır. Körfezin kuzey kısmı zaman içerisinde Gediz Nehri'nin taşıdığı delta malzemesiyle dolarak günümüzdeki düzlük görünümünü kazanmıştır [26].

Bu çalışmada kullanılan zemin profili, söz konusu İzmir fay zonunun etkilediği Bayraklı bölgesine ait jeoteknik verilere dayanmaktadır. Bayraklı bölgesinin zemini, altta siltli kil tabakaları ve üstte dolgu malzemelerinden oluşmakta olup [27-36], bu stratigrafi çalışmada modellenen zemin profiline doğrudan temel oluşturmuştur. Çalışmada kullanılan jeoteknik parametreler ise, bölgedeki zemin etüt raporları ve ilgili literatürde sunulan laboratuvar deneylerinden elde edilmiştir [28]

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [22] kapsamında aşağıda verilen yer hareketi düzeyleri tanımlanmıştır.

- DD-1 Deprem Yer Hareketi, 50 yıl içinde aşılma olasılığı %2 olan ve yaklaşık 2475 yıl tekrarlanma periyoduna sahip çok seyrek rastlanan bir deprem hareketini ifade etmektedir. Bu seviyedeki deprem yapısal tasarım ve güvenlik değerlendirmelerinde kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir.

- DD-2 Deprem Yer Hareketi, 50 yıl içinde aşılma olasılığı %10 olan ve 475 yıl tekrarlanma periyoduna sahip seyrek rastlanan bir deprem hareketini ifade etmektedir. Bu deprem seviyesi, yapısal tasarımda kullanılan standart deprem hareketi olarak kabul edilmekte olup, binaların güvenliğini sağlamak için temel alınan hesaplama değerlerinden biridir.

- DD-3 Deprem Yer Hareketi, 50 yıl içinde aşılma olasılığı %50 olan ve 72 yıl tekrarlanma periyoduna sahip sık karşılaşılan bir deprem hareketini tanımlamaktadır. Bu seviyedeki depremler, yapıların kullanım ömrü boyunca birden fazla kez maruz kalabileceği sismik hareketleri ifade etmektedir.

Yapılan çalışmalar kapsamında proje sahasına özel ve farklı deprem seviyeleri için ölçeklendirilmiş tepki spektrumu ile uyumu deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiş, (DD-1) yer hareketi için, Tabas (1978); DD2 ve DD3 yer hareketi düzeyleri için ise Loma Prieta (1989) deprem kayıtları seçilmiştir. Seçilen kayıtlarına ait detaylı özellikler, Tablo 1 ve Şekil 3'te verilmiştir.

**Tablo 1.** Analizler için seçilen deprem kayıtları.

**Table 1.** Selected earthquake records for analyses.

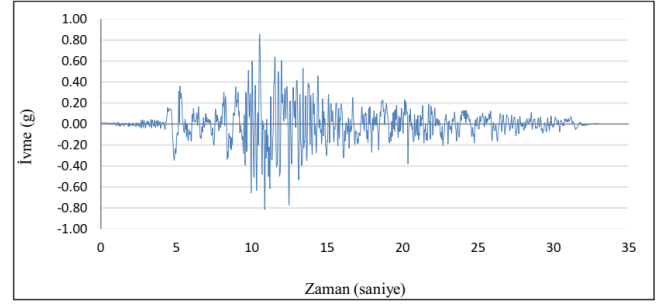
| Deprem Adı  | Moment Büyüklük (Mw) | Fay Mekanizması       | İstasyon             | Deprem Odak Noktasına Uzaklık (km) | Faya En Yakın Mesafe (km) |
|-------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Tabas, İran | 7.35                 | Ters Atımlı           | Tabas                | 1.79                               | 2.05                      |
| Loma Prieta | 6.93                 | Oblik atımlı ters fay | Gilroy Array #1      | 8.84                               | 9.64                      |
| Loma Prieta | 6.93                 | Oblik atımlı ters fay | SF - Pacific Heights | 75.96                              | 76.05                     |

## 2.2. Sonlu Elemanlar Metodu

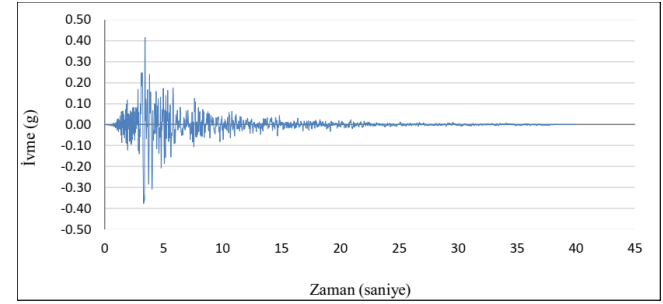
Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik alanlarında 30 yılı aşkın süredir yaygın olarak kullanılmasına rağmen, geoteknik mühendisliğinde bu yöntemin benimsenmesi görece daha yeni bir gelişmedir. Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan karmaşık problemlerin çözümünün ancak son yıllarda mümkün hale gelmesi, bu yöntemin diğer mühendislik disiplinlerine kıyasla daha geç yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada, analizlerin yürütülmesi amacıyla PLAXIS 3D [29] yazılımı kullanılmıştır. PLAXIS 3D, temel sistemlerinin üç boyutlu deformasyon analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilmiş, sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir mühendislik programıdır. Oluşturulan modellerde PLAXIS 3D'nin varsayılan sınır koşulları uygulanmıştır.

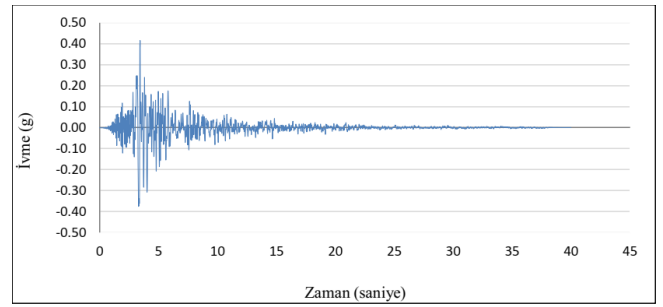
Gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek adına, zeminin gerilme bağımlı davranışı dikkate alınmıştır. Yapı ile zemin arasındaki etkileşim,



(a)



(b)



(c)

**Şekil 3.** Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarına ait ivme-zaman verileri a) Tabas - İran Depremi b) Loma Prieta (Gilroy Array#1) Depremi c) Loma Prieta (SF-Pacific Heights) Depremi.

**Figure 3.** Acceleration-time data of earthquake records used in analyses a) Tabas - Iran Earthquake b) Loma Prieta (Gilroy Array #1) Earthquake c) Loma Prieta (SF-Pacific Heights) Earthquake.

temel sistemleri aracılığıyla meydana gelmektedir. Zemin koşulları ve inşaat sürecindeki aşamalar, zemin üzerinde farklı seviyelerde oturmalar ve deformasyonlara neden olabilmektedir. Bu deformasyonlar, yapı-zemin etkileşiminin doğru bir şekilde tanımlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Analizlerde kullanılan yapı malzemelerine ait özellikler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Pekleşen zemin modeli, zemin davranışını daha doğru şekilde temsil etmek amacıyla geliştirilmiş ileri düzey bir modeldir. Mohr-Coulomb modeline benzer limit gerilme durumu temsili olmakla beraber bu modelin önemli bir avantajı, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen rijitlik parametrelerinin kullanılabilmesi sayesinde zeminin rijitliğinin daha hassas bir şekilde tanımlanabilmesidir.

**Tablo 2.** Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.**Table 2.** Material parameters used in analysis.

| Parametreler    | Sembol   | Döşemeler           | Perdeler            | Birim             |
|-----------------|----------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Kalınlık        | d        | 0.2                 | 0.3                 | m                 |
| Birim Hacim Ağ. | $\gamma$ | 15                  | 33.33               | kN/m <sup>3</sup> |
| Bünye Denklemi  |          | Elastic, İzotroprik | Elastic, İzotroprik | -                 |
| Elastik Modülü  | E        | $3 \times 10^4$     | $3 \times 10^4$     | kN/m <sup>2</sup> |
| Poisson O.      | $\nu$    | 0.15                | 0.15                | -                 |

Pekleşen zemin modeli, Mohr-Coulomb modelinden farklı olarak, zeminin rijitliğinin basınca bağlı olarak artmasını sağlayan bir yaklaşıma sahiptir. Her ne kadar pekleşen zemin modeli birçok farklı zemin türü için uygun olsa da, viskoz etkiler gibi bazı özel zemin davranışlarını dikkate almaz. Özellikle büzülme, gerilme gevşemesi ve zamana bağlı sıkışma davranışları model kapsamında değerlendirilememektedir. Bu tür zeminlerde, Soft-Soil-Creep Yumuşak Zemin Sünme) Modeli kullanılarak daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Analizlerde kullanılan jeoteknik parametreler, Bayraklı bölgesine ait zemin etüt raporları ile literatürde yayımlanmış saha ve laboratuvar verilerinden [28] alınmıştır. İleri düzey bünyesel parametreler ise literatürde önerilen çeşitli korelatif ilişkiler ve deneysel çalışmalardan elde edilen ampirik bağıntılar yardımıyla belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan idealize edilmiş zemin profili (Tablo 3) ile zemin modeli (Tablo 4) aşağıda verilmiştir.

**Tablo 3.** İdealize edilmiş zemin profili.**Table 3.** Idealized soil profile.

| Zemin Sınıfı | Tabaka | Zemin Özellikleri                                                                                      |
|--------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0-15         | Kil-1  | $\gamma$ doğal = 18 kN/m <sup>3</sup> , $Q' = 26^\circ$<br>$c = 6$ kN/m <sup>2</sup> , $E = 12$ E3     |
| 15-25        | Kum    | $\gamma$ doğal = 19 kN/m <sup>3</sup> , $Q' = 34^\circ$<br>$c = 3$ kN/m <sup>2</sup> ; $E = 22$ E3     |
| 25-35        | Kil-2  | $\gamma$ doğal = 19 kN/m <sup>3</sup> , $Q' = 31^\circ$<br>$c = 12$ kN/m <sup>2</sup> ; $E = 32$ E3    |
| 35-70        | Kil-3  | $\gamma$ doğal = 19.5 kN/m <sup>3</sup> , $Q' = 32^\circ$<br>$c = 5$ kN/m <sup>2</sup> ; $E = 45$ E3   |
| 70-130       | Kil-4  | $\gamma$ doğal = 19.50 kN/m <sup>3</sup> , $Q' = 32^\circ$<br>$c = 15$ kN/m <sup>2</sup> ; $E = 75$ E3 |
| 130-300      | Kil-5  | $\gamma$ doğal = 19.50 kN/m <sup>3</sup> , $Q' = 32^\circ$<br>$c = 16$ kN/m <sup>2</sup> ; $E = 85$ E3 |

**Tablo 4.** İdealize edilmiş zemin modeli.**Table 4.** Idealized soil model.

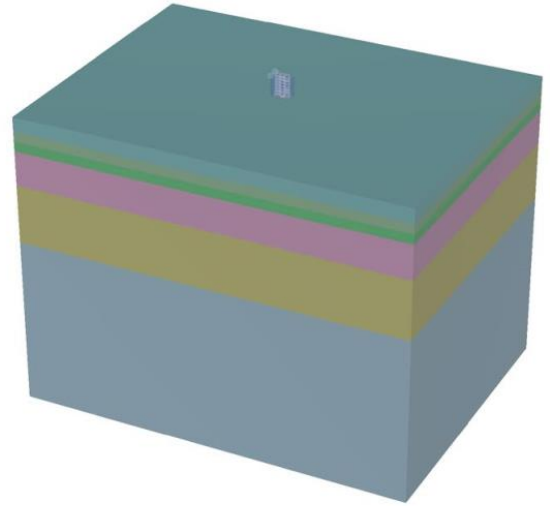
| Parametre                          | Kil-1         | Kum           | Kil-2         | Kil-3         | Kil-4         | Kil-5         |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Genel</b>                       |               |               |               |               |               |               |
| Malzeme Modeli                     | H.Soil Modeli | H.Soil Modeli | H.Soil Modeli | H.Soil Modeli | H.Soil Modeli | H.Soil Modeli |
| Drenaj Türü                        | Drenajlı      | Drenajlı      | Drenajlı      | Drenajlı      | Drenajlı      | Drenajlı      |
| Doygun B.H.A. (kN/m <sup>3</sup> ) | 18.00         | 19.00         | 19.00         | 20.00         | 20.00         | 20.00         |
| Doğal B.H.A. (kN/m <sup>3</sup> )  | 17.00         | 18.00         | 18.00         | 19.00         | 19.00         | 19.00         |
| <b>Parametreler</b>                |               |               |               |               |               |               |
| Poisson Oranı                      | 0.20          | 0.20          | 0.20          | 0.20          | 0.20          | 0.20          |
| Elastisite Modülü                  | 1.00E+04      | 2.00E+04      | 3.00E+04      | 4.00E+04      | 7.00E+04      | 8.00E+04      |
| Kohezyon (kN/m <sup>2</sup> )      | 7.00          | 2.00          | 10.00         | 6.00          | 12.00         | 15.00         |
| İçsel Sürtünme Açısı (°)           | 27.00         | 33.00         | 30.00         | 31.00         | 30.00         | 30.00         |
| Ko Katsayısı                       | 0.55          | 0.46          | 0.50          | 0.49          | 0.50          | 0.50          |

Meydana gelen deformasyonların doğru ve kapsamlı olarak belirlenmesi amacıyla üç boyutlu elemanlar ile PLAXIS 3D yazılımında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak detaylı analizler yapılmıştır. Proje sahasında yapılan jeofizik çalışmalar

sonucunda 300 m derinlikte  $V_s > 750$  m/sn değerleri elde edilmiş olup, bu seviye mühendislik ana kayası olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle model alt sınırı 300 m olarak seçilmiş ve deprem kayıtları da bu seviyeye göre ölçeklendirilmiştir.

Modelin boyutları, yapı-zemin etkileşimini yansıtacak şekilde belirlenmiş; yapı 7 katlı ve  $10 \times 20$  m taban ölçülerinde modellenmiş, zemin profili ise  $400 \times 300$  m yatay boyutlarda ve 300 m derinlikte oluşturulmuştur. Modelin alt sınırı mühendislik ana kayasında rijit sınır koşulu ile tanımlanırken, yan sınırlar dalga yayılımını doğru şekilde temsil edebilmek için sönümleyici sınır koşulları ile modellenmiş, üst yüzey serbest yüzey olarak bırakılmıştır [30-33].

Analizlerde izlenen aşamalar şu şekilde sıralanabilir: (i) zemin profili ve yapı geometrisinin oluşturulması, (ii) jeoteknik ve yapısal malzeme parametrelerinin atanması, (iii) ağ (mesh) boyutlarının belirlenmesi ve zaman adımının tanımlanması, (iv) seçilen deprem kayıtlarının modelin alt tabanına giriş hareketi olarak uygulanması. Bu kapsamda, ağ boyutları Kuhlemeyer ve Lysmer [34] tarafından önerilen dalga yayılım kriterine uygun şekilde seçilmiş, zaman adımı ise giriş hareketinin süresi ve adım sayısı dikkate alınarak otomatik olarak tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan modelin şematik görünümü Şekil 4'te sunulmuştur.

**Şekil 4.** Analize esas 3B model.**Figure 4.** 3D model used for analysis.

### 3. Yapılan Analizler ve Elde Edilen Sonuçlar

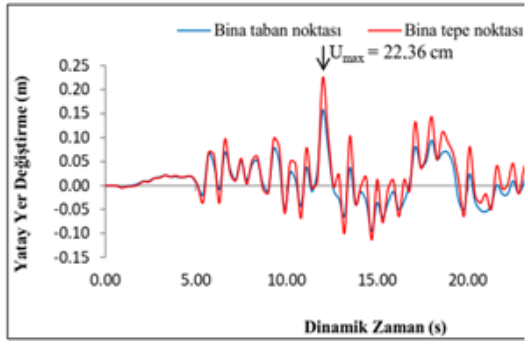
Analizde değişken parametre olarak bodrum kat yüksekliği ele alınmış olup, farklı bodrum kat sayılarına karşılık gelen 3, 6 ve 9 metre yüksekliğinde üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Yapıların bodrum kat yüksekliklerinin yapı-zemin etkileşimine olan etkilerini değerlendirmek için, farklı bodrum kat seviyelerine sahip binaların tepe noktasının relatif yatay yer değiştirmeleri, oturmalar ve ivme-zaman ilişkileri grafikler halinde sunulmuştur.

#### 3.1. DD-1 Deprem Düzeyi İçin Yapılan Analizler

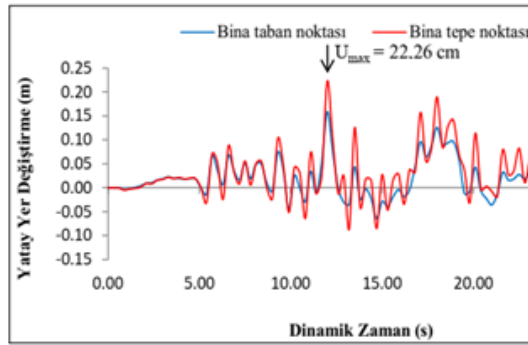
Şekil 5'te gösterildiği gibi, bodrum kat sayısı arttıkça genel olarak yapının deprem davranışının olumlu yönde etkilendiği gözlemlenmiştir.

Grafikte, binanın tepe noktasındaki yatay sapma değerinin, bodrum kat yüksekliğinin artışıyla birlikte azaldığı ve yapının daha stabil bir davranış sergilediği görülmektedir. Bununla beraber, daha fazla bodrum katlı yapıların salınımlarının daha

düzenli olduğu ve bu durumun yapının dinamik performansı açısından olumlu bir sonuç yarattığı belirlenmiştir.



(a)



(b)

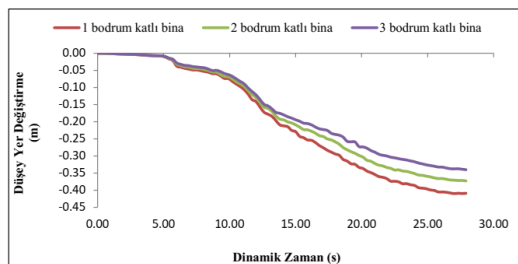


(c)

**Şekil 5.** DD-1 Deprem düzeyi için: a) 1 bodrum katlı, b) 2 bodrum katlı, c) 3 bodrum katlı binadaki yer değiştirmeler.

**Figure 5.** Horizontal displacements at the base and top of a building with: a) 1 Basement floor, b) 2 Basement floors, c) 3 Basement Floors for DD-1 Earthquake Level.

Şekil 6'da deprem etkisi altındaki düşey yer değiştirme (oturma) davranışları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



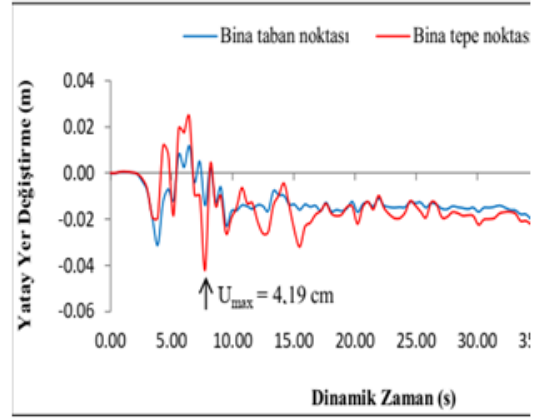
**Şekil 6.** DD-1 Deprem düzeyi için binada meydana gelen oturmalar.

**Figure 6.** Settlement of the building for DD-1 earthquake level.

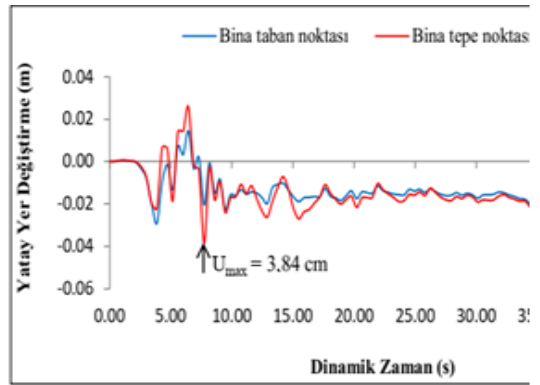
Bu veriler, bodrum kat yüksekliğinin artmasının, düşey oturma miktarını azalttığını ve zemin üzerindeki deformasyonu olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

### 3.2. DD-2 Deprem Düzeyi İçin Analiz Sonuçları

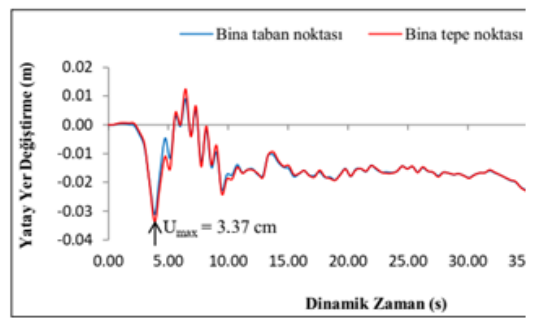
Şekil 7'de DD-2 deprem düzeyi için yapılan analiz sonuçlarında elde edilen farklı bodrum katlı yapılara yatay yer değiştirmeleri verilmiştir. Şekil 8'de aynı deprem etkisi ile düşey deplasman değişimleri görülmektedir.



(a)



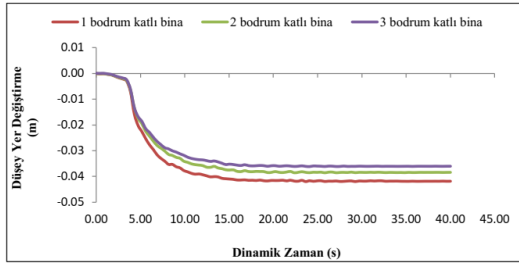
(b)



(c)

**Şekil 7.** DD-2 Deprem düzeyi için: a) 1 bodrum katlı, b) 2 bodrum katlı, c) 3 bodrum katlı binadaki yer değiştirmeler

**Figure 7.** Horizontal displacements at the base and top of a Building with: a) 1 Basement Floor, b) 2 Basement Floors, c) 3 Basement Floors for DD-2 Earthquake Level



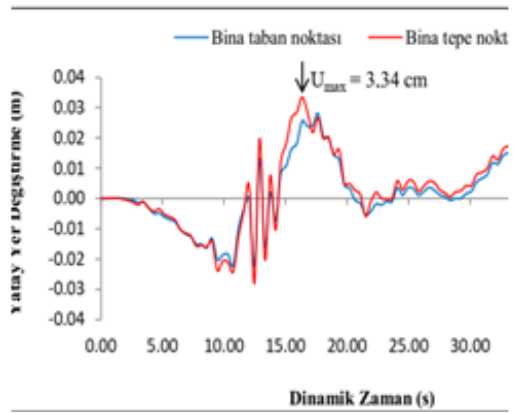
**Şekil 8.** DD-2 deprem düzeyi için binada meydana gelen oturmalar.

**Figure 8.** Settlement of the building for DD-2 earthquake level.

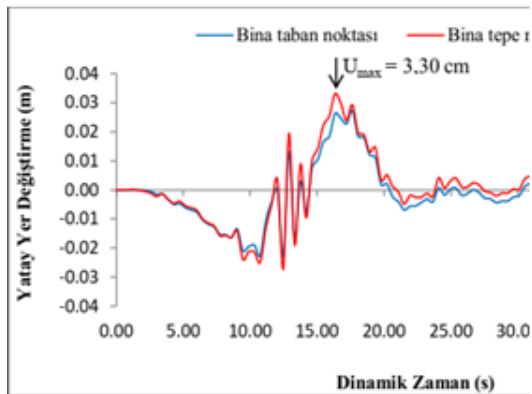
DD-1 deprem düzeyi verilerine elde edilen sonuçlara benzer şekilde, DD-2 deprem düzeyi etkisi altında da bodrum yüksekliğinin yatay ve düşey deplasmanları pozitif olarak etkilediği görülmektedir.

### 3.3. DD-3 Deprem Düzeyi İçin Analiz Sonuçları

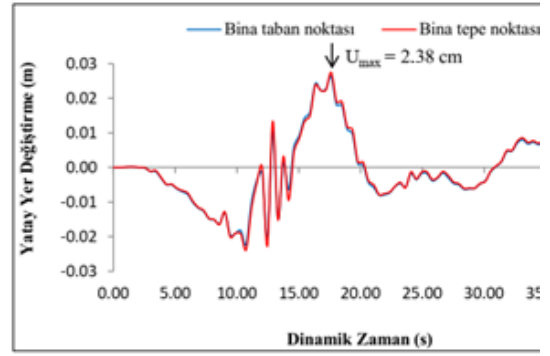
Şekil 9'da DD-3 deprem düzeyi için yapılan analiz sonuçlarında elde edilen farklı bodrum katlı yapılara yatay yer değiştirmeleri verilmiştir. Şekil 10'da aynı deprem etkisi ile düşey deplasman değişimleri görülmektedir.



(a)



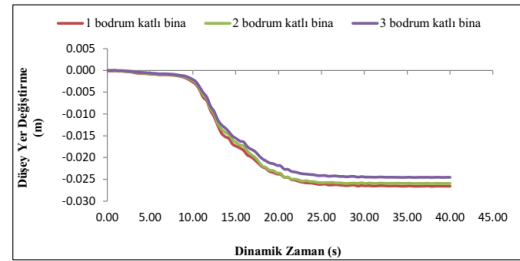
(b)



(c)

**Şekil 9.** DD-3 Deprem düzeyi için: a) 1 bodrum katlı, b) 2 bodrum katlı, c) 3 bodrum katlı binadaki yer değiştirmeler.

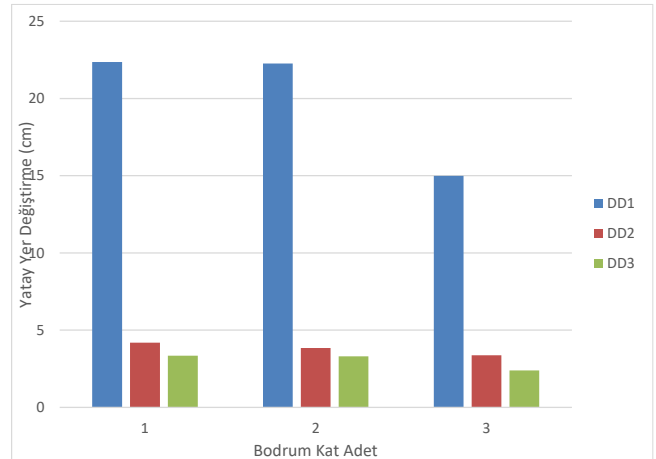
**Figure 9.** Horizontal displacements at the base and Top of a Building with a)1 Basement Floor, b) 2 Basement Floors, c) 3 Basement Floors for DD-3 Earthquake Level.



**Şekil 10.** DD-3 deprem düzeyi için binada meydana gelen oturmalar.

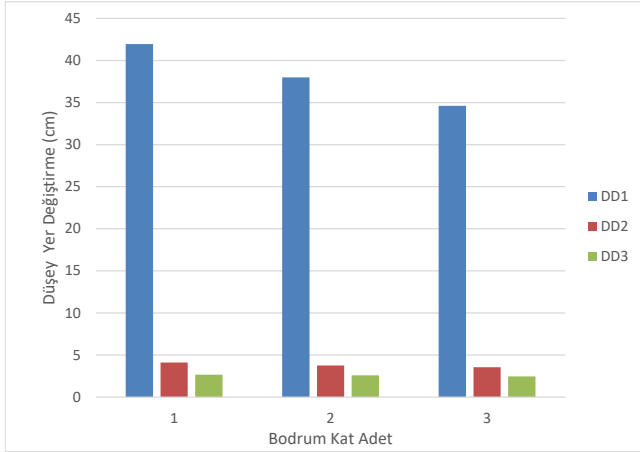
**Figure 10.** Settlement of the building for DD-3 earthquake level.

DD-3 deprem düzeyi için de daha önceki farklı deprem seviyelerindeki sonuçlara benzer şekilde, bodrum kat sayısının yatay ve düşey deplasmanları pozitif olarak etkilediği görülmektedir. Şekil 11 ve Şekil 12'de, farklı deprem düzeyleri ve bodrum kat sayılarına göre elde edilen sonuçlar özet olarak sunulmuştur.



**Şekil 11.** Farklı Deprem düzeyleri ve bodrum kat sayıları için karşılaştırmalı yer değiştirme grafiği.

**Figure 11.** Comparative horizontal displacements for different earthquake levels and number of basement floors.



**Şekil 12.** Farklı deprem düzeyleri ve bodrum kat sayıları için karşılaştırmalı düsey oturmalar.

**Figure 12.** Comparative settlements for different earthquake levels and number of basement floors.

DD-1 seviyesinde yatay deplasmanların belirgin şekilde büyük olmasının ana sebebi, yüksek spektral büyüklüklü deprem hareketlerinin yapıya etki eden kuvvetleri artırması, zemin deformasyonlarının büyümesi, yapı-zemin etkileşimi etkilerinin daha belirgin hale gelmesi ve uzun süreli sismik hareketlerin rezonans etkisi yaratabilmesidir. Bu nedenle, DD-1 gibi büyük depremler için yapılan analizlerde yapı rijitliği, temel sistemleri ve SSI etkileri dikkatle değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürde rapor edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Özellikle bodrum kat yüksekliğinin artışıyla birlikte tepe noktasındaki yatay yer değiştirmelerin azalması, El Hoseny ve ark. [14] tarafından yapılan çalışmada da benzer şekilde vurgulanmıştır. Pinto ve ark. [35] ise bodrum katlarının zemin-yapı etkileşimi üzerindeki belirleyici rolüne dikkat çekmiş olup, bu çalışmada elde edilen sonuçlar da benzer şekilde bodrum katlarının yapı rijitliğini ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak sismik talepleri azalttığını göstermektedir. Ayrıca, Tehranizadeh ve Barkhordari [16] tarafından vurgulanan bodrum konfigürasyonlarının SSI davranışındaki önemi, bu çalışmada farklı deprem düzeyleri için elde edilen sonuçlarla desteklenmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen bulgular literatürde rapor edilen sonuçlarla uyumlu olmakla birlikte, bodrum kat derinliğinin deprem düzeyine bağlı etkilerini sistematik biçimde ortaya koyması açısından literatüre ek katkı sunmaktadır.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, aynı zemin ve üstyapı koşullarına sahip, ancak değişken sayıda bodrum katlı binalar, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) göre tanımlanan üç farklı deprem yer hareketi düzeyine maruz bırakılarak, üç boyutlu dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, tepe kat ötelemelerinin ve oturmaların en yüksek değerinin 1 bodrum katlı binada meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, bodrum kat yüksekliğinin sismik davranış üzerindeki etkisini öne çıkarmaktadır. Bodrum kat yüksekliği arttıkça, zemine gömülü kısmın derinliği artmakta ve bodrum katın karşılayabildiği yanal yük miktarı da yükselmektedir. Bu etki, yapı genelinde daha fazla rijitlik sağlayarak tepe kat ötelemelerini azaltmaktadır.

Farklı deprem yer hareketi seviyeleri altında incelenen binalarda, en büyük spektral ivmelere sahip olan Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1) senaryosunda, bodrum kat yüksekliğinin en

belirgin faydayı sağladığı görülmüştür. Örneğin, DD-1 altında 1 bodrum katlı yapının tepe noktasındaki yatay yer değiştirmesi yaklaşık %32 oranında azalarak 22 cm'den 15 cm'ye düşmüştür. Benzer şekilde, düsey oturma değerleri 42 cm'den 35 cm'ye gerileyerek yaklaşık %17 oranında azalma göstermiştir. Buna karşılık, DD-2 ve DD-3 deprem düzeylerinde bodrum kat artışının etkisi daha sınırlı olmuş ve değişimler %5-10 aralığında kalmıştır.

Elde edilen bulgular aşağıda özet olarak verilmiştir.

- Bodrum kat sayısının artışı, yapının genel rijitliğini artırarak tepe noktası deplasmanlarını azaltmıştır. Bodrum katları, yapıların enerji sönümleme kapasitesini artırmış ve rezonans etkisini azaltmıştır. Bununla birlikte, farklı deprem senaryolarında yapının doğal frekansının deprem hareketinin baskın frekansıyla çakışması durumunda, bodrum seviyelerinde lokal dinamik taleplerin artabileceği değerlendirilmektedir.

- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1), en büyük spektral ivmeye sahip olduğu için, yapıların en büyük yatay yer değiştirmeye maruz kaldığı sismik senaryo olmuştur.

- Bodrum kat tasarımında, sadece taşıyıcı sistem rijitliği değil, yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınmalıdır. Yüksek bodrum katları, yapının rijitliğini artırırken zemin üzerindeki dinamik etkileri değiştirdiği için, farklı deprem senaryolarına göre optimize edilmelidir.

- Deprem yönetmeliklerinde (TBDY 2018 gibi), bodrum katlı yapıların SSI etkisini içeren detaylı modellemelerin yapılması önerilmektedir. Rijit temel varsayımının özellikle yüksek bodrum katlı binalarda yapı davranışını olduğundan daha güvenli tahmin edebileceği değerlendirilmiştir.

İleriki çalışmalarda, bodrum katlarının deprem performansına etkisini değerlendirmek için rijit temel varsayımı ve SSI etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, ayrıca deneysel ve sayısal analizlerin birleştirilerek daha kapsamlı araştırmalar yapılması önerilmektedir.

#### Yazar katkı beyanı

Şahin Çağlar Tuna: Çalışmanın kavramsallaştırılması, metodolojinin oluşturulması, sayısal modelleme, analizlerin yürütülmesi, bulguların yorumlanması ve makale taslağının hazırlanması. Selim Altun: Bulguların değerlendirilmesi, teknik gözden geçirme, sonuçların yorumlanması ve makalenin son kontrolü.

#### Etik kurul onayı

Bu çalışma için etik kurul izni gerekmemektedir.

#### Çıkar çatışması beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder.

#### Kaynaklar

- [1] Aydınoglu N. Zayıf zeminlerde yapılan binalarda dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi için uygulamaya yönelik bir hesap yöntemi. Rapor No: 2011/1. İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı; 2011.
- [2] Lysmer J. Vertical motions of rigid foundations [PhD thesis]. Ann Arbor, MI: University of Michigan; 1965.
- [3] Richart FE, Whitman RV. Comparison of footing vibration test with theory. J Soil Mech Found Div ASCE 1967;93:143-168.
- [4] Richart FE, Woods RD. Vibrations of soils and foundations. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Inc.; 1970.
- [5] Bielak J. Earthquake response of building-foundation systems. California Institute of Technology 1971;71(4):1-148.
- [6] Veletsos AS, Meek JW. Dynamic behaviour of building-foundation systems. Earthq Eng Struct Dyn 1978;3(2):121-138. doi:10.1002/eqe.4290030203.
- [7] Galal K, Naimi M. Effect of soil conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near-fault earthquakes. Struct Des Tall Build 2008;17(3):541-562. doi:10.1002/tal.365.

- [8] Lou M, Wang H, Chen X, Zhai Y. Structure-soil-structure interaction: literature review. *Soil Dyn Earthq Eng* 2011;31(12):1724-1731. doi:10.1016/j.soildyn.2011.07.008.
- [9] Abdel Raheem SE, Ahmed MM, Alazrak TM. Soil-raft foundation-structure interaction effects on seismic performance of multi-story MRF buildings. *Eng Struct Technol* 2014;6(2):43-61. doi:10.3846/2029882X.2014.972656.
- [10] Scarfone R, Morigi M, Conti R. Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: a 3D numerical approach. *Soil Dyn Earthq Eng* 2020;128:105864. doi:10.1016/j.soildyn.2019.105864.
- [11] Asadi Ghoozhdi H, Attarnejad R, Masoodi AR, Majlesi A. Seismic assessment of irregular RC frames with tall ground story incorporating nonlinear soil-structure interaction. *Structures* 2022;41:159-172. doi:10.1016/j.istruc.2022.05.001.
- [12] Kant R, Al-Agha W, Almorad WA, Thakur MS, Umamaheswari N. Study on seismic performance of reinforced concrete multi-storey building considering soil-structure interaction effect. *Mater Today Proc* 2022;56:2158-2166. doi:10.1016/j.matpr.2021.11.475.
- [13] Requena-Garcia-Cruz MV, Bento R, Durand-Neyra P, Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. *Structures* 2022;38:599-617. doi:10.1016/j.istruc.2022.02.024.
- [14] El Hoseny M, Ma J, Josephine M. Effect of embedded basement stories on seismic response of low-rise building frames considering SSI via small shaking table tests. *Sustainability* 2022;14(3):1275. doi:10.3390/su14031275.
- [15] Pinto FJ, Dashti S, Ledezma C, Abell JA. How do tall buildings affect seismic earth pressures on their basement walls? *Soil Dyn Earthq Eng* 2023;171:107968. doi:10.1016/j.soildyn.2023.107968.
- [16] Tehranizadeh M, Barkhordari MS. Effect of peripheral wall openings in basement and number of basement floors on the base level of braced framed tube system. *Int J Civ Eng* 2018;16:1157-1173. doi:10.1007/s40999-017-0270-z.
- [17] Zhang X, Far H. Beneficial and detrimental impacts of soil-structure interaction on seismic response of high-rise buildings. *Adv Struct Eng* 2024;27(0):1-25. doi:10.1177/13694332241255747.
- [18] Bapir B, Abrahamczyk L, Wichtmann T, Prada-Sarmiento LF. Soil-structure interaction: a state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Front Built Environ* 2023;9:1120351. doi:10.3389/fbuil.2023.1120351.
- [19] Bilal O, Fahjan Y. Dinamik yapı-kazık-zemin etkileşimi bağlamında temel gömme derinliğinin spektral tepki üzerindeki etkisi. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg* 2024;30(1):44-52. doi:10.5505/pajes.2023.05046.
- [20] Jagan P, Visuvasam JA. Inelastic seismic behaviour of RC buildings with floating columns considering soil-structure interaction. In: *Symposium in Earthquake Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2022, p. 313-324.
- [21] Jennings PC, Bielak J. Dynamics of building-soil interaction. *Bull Seismol Soc Am* 1973;63(1):9-48. doi:10.1785/BSSA0630010009.
- [22] TBDY. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar. Ankara; 2018.
- [23] Vaish AK, Chopra AK. Earthquake finite element analysis of structure-foundation systems. *J Eng Mech Div ASCE* 1974;100(6). doi:10.1061/JMCEA3.0001956.
- [24] Gutierrez J, Chopra AK. A substructure method for earthquake analysis of structures including structure-soil interaction. *Earthq Eng Struct Dyn* 1978;6:51-69.
- [25] Emre T. Gediz Grabeni'nin jeolojisi ve tektoniği. *Turk J Earth Sci* 1996;5(3):171-185.
- [26] Hakyemez HY, Erkal T, Göktaş F. Late Quaternary evolution of the Gediz and Büyük Menderes grabens, Western Anatolia, Turkey. *Quat Sci Rev* 1999;18(4-5):549-554. doi:10.1016/S0277-3791(98)00096-1.
- [27] Emre Ö, Özalp S, Doğan A, Özaksoy V, Yıldırım C, Göktaş F. İzmir yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri. MTA Rapor No: 10754. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü; 2005.
- [28] Çetin KO, Altun S, Askan A, Akgün M, Sezer A, Kınal C, et al. The site effects in İzmir Bay of October 30, 2020, M7.0 Samos earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng* 2022;152:107051. doi:10.1016/j.soildyn.2021.107051.
- [29] Brinkgreve RJB, editor. PLAXIS user manual. 3D. Delft: Delft University of Technology and PLAXIS; 2002.
- [30] Lysmer J, Kuhlemeyer RL. Finite dynamic model for infinite media. *J Eng Mech Div ASCE* 1969;95(4). doi:10.1061/JMCEA3.0001144.
- [31] Brinkgreve RJB, Swolfs WM, Engin E. PLAXIS user's manual. The Netherlands: PLAXIS; 2011.
- [32] Forcellini D. A 3-DOF system for preliminary assessments of the interaction between base isolation (BI) technique and soil structure interaction (SSI) effects for low-rise buildings. *Structures* 2024;59. doi:10.1016/j.istruc.2023.105803.
- [33] Massimino MR, Abate G, Fiamingo A, Pitilakis D. Seismic risk and environmentally friendly solutions: the geotechnical point of view. *Lect Notes Civ Eng* 2023;322. doi:10.1007/978-3-031-26879-3\_1.
- [34] Kuhlemeyer RL, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems. *J Soil Mech Found Div ASCE* 1973;99(5). doi:10.1061/JSEFAQ.0001885.
- [35] Pinto FJ, Ledezma C, Abell JA, Astroza R, Dashti S. Soil-basement interaction effects on the seismic response of tall buildings with basement levels. *Eng Struct* 2022;263:114406. doi:10.1016/j.engstruct.2022.114406.
- [36] METU Report. The October 30, 2020 İzmir-Seferihisar offshore (Samos) earthquake (Mw=6.6): reconnaissance observations and findings. Report No: METU/EERC 2020-03. Ankara; 2020.