



Farklı Deprem İvmeleri Altında Betonarme Yapıların Zemin Yapı Etkileşimi ile Nümerik Analizi

Numerical Analysis of Reinforced Concrete Structures with Soil-Structure Interaction under Different Earthquake Accelerations

Serhat Yıldız^{1*}, Mesut GÖR²

¹ Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, serviltek@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8520-1850>

² Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mgor@firat.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-9278>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 21 Nisan 2025
Revizyon 29 Nisan 2025
Kabul 26 Mayıs 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Zemin, Zemin-Yapı Etkileşimi,
PLAXIS, SAP2000, Deprem

ÖZ

Türkiye, aktif fay hatlarının yoğun olduğu bir ülke olması sebebi ile özellikle bazı bölgelerinde yıkıcı etkilere sahip depremler meydana gelebilmektedir. Bu yıkıcı etkiyi azaltmak ise inşaat mühendisliğinin temel amaçlarından biridir. Yapı tasarımı yapılırken, yapının detayları kadar zeminlerin de özellikleri ve davranışları göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı bodrum kat sayısına sahip 7 katlı betonarme yapıların, deprem etkisi altında analizleri yapılarak, bodrum kat sayısının zemin-yapı etkileşimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Oluşturulan modeller ve analizler için SAP2000 ve PLAXIS 2D programları kullanılmıştır. 7 kata sahip yapının, bodrum sayısı 1, 2 ve 3 olacak şekilde değiştirilerek 3 farklı model oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin 4 farklı deprem etkisi altındaki analizleri yapılarak yapıların yatay ve düşey deplasmanları bulunmuştur. 2 farklı program 3 farklı model ve 4 farklı deprem ivme kaydı kullanılarak toplam 24 analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda bodrum sayısındaki artışın yatay ve düşey deplasmanlar üzerindeki etkisi görülmüş, iki programın sonuçları değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 April 2025
Received in revised form 29 April 2025
Accepted 26 May 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Soil, Soil-Structure Interaction,
PLAXIS, SAP2000, Earthquake

ABSTRACT

Turkey, being a country with a high density of active fault lines, is prone to earthquakes with destructive effects, particularly in certain regions. Reducing these destructive effects is one of the main objectives of civil engineering. When designing structures, it is essential to consider not only the details of the structure but also the properties and behaviors of the soil. In this study, the effects of the number of basement floors on the soil-structure interaction of a seven-story reinforced concrete building under earthquake loading are investigated. The models and analyses were created using the SAP2000 and PLAXIS 2D software. Three different models of the seven-story building were generated, with the number of basement floors set to 1, 2, and 3, respectively. The models were analyzed under four different earthquake records, and the horizontal and vertical displacements of the structures were determined. A total of 24 analyses were conducted, considering two different software, three different models, and four different earthquake ground motion records. The results showed the impact of the increase in the number of basement floors on the horizontal and vertical displacements, and the results from the two software were evaluated.

DOI: 10.24012/dumf.1680953

* Sorumlu Yazar

Giriş

Günümüzde yaşam alanlarının daralması ve nüfusun hızlı bir şekilde artmasına paralel olarak çok katlı yapıların önemi ve sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Ancak, bu hızlı gelişim ile birlikte çeşitli mühendislik problemleri de ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların başında, çok katlı yapıların deprem etkisi altındaki davranışı gelmektedir. Güncel uygulamalarda, yapıların deprem analizleri için oluşturulan sonlu eleman modellerinde, zemin rijit veya neredeyse rijit bir davranış sergilediği varsayılmaktadır [1]. Zemin davranışının rijit ya da rijite yakın olarak değerlendirilmesi, zemin-yapı etkileşiminin ihmal edildiği anlamına gelir [2]. Bu tür bir kabul, zemin etkilerinin yapıların yatay ve düşey deplasmanları üzerindeki etkisini göz ardı eden sonlu eleman modellerini ortaya çıkarmaktadır [3]. Zemin koşulları, yapıların performansı üzerinde etkisi önemli derecede fazladır [4]. Zemin ile yapının etkileşimi göz önünde bulundurularak geliştirilen sonlu eleman modellerinin analizi, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak tanır [5]. Farklı bodrum kat sayıları gibi parametrelerin değiştirilmesiyle oluşturulan sonlu eleman modellerinde, yatay ve düşey deplasman değerlerinin değişen bodrum kat sayılarına göre farklılıklar gösterdiği görülmektedir [6]. Sonlu eleman modellerinin çok katlı yapılar üzerindeki yüklemeleri (rüzgâr, kar, deprem vb.) zemin-yapı etkileşimi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu etkileşimi etkileyen yüklemeler arasında ise deprem kaynaklı yükler ön plana çıkmaktadır. Depremler sırasında, yatay ve düşey deplasmanlardaki değişim oranları artış göstermektedir. Bu nedenle, deprem etkileriyle oluşan sismik yüklemelerin çok katlı yapılar üzerindeki etkisi, zemin-yapı etkileşiminin önemini artırmaktadır [6]. Deprem etkisi altındaki çok katlı yapıların zemin-yapı etkileşiminin incelenmesi için farklı sonlu eleman modelleri oluşturulması gerekmektedir [7].

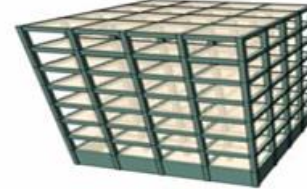
Zemin-yapı etkileşimini incelemek amacıyla farklı modeller geliştirilmektedir. Çok katlı yapılar, doğrudan yöntemle tek bir sistem olarak ele alınıp sonlu eleman modelleri oluşturulmaktadır. Bunun yanı sıra, alt sistem yaklaşımında, üst yapı ve alt yapı için ayrı sonlu eleman modelleri hazırlanmaktadır [8]. Bu tür modellerin oluşturulmasının başlıca nedeni zemin etkileşimi incelendiğinde gerçeğe yakın sonuçlar elde etme gereksinimidir. Çok katlı yapıların farklı bodrum sayılarıyla oluşturulan sonlu eleman modellerinin deprem etkisi altındaki zemin-yapı etkileşimini ele aldığımızda, bodrum kat sayısının artmasının, çok katlı yapının depreme karşı performansını artırdığı görülmektedir. Özellikle, çok katlı yapılarda bodrum kat sayıları azaldıkça yatay ve düşey deplasmanlarda azalmaların meydana geldiği görülmektedir [8].

Bu çalışmada, 1, 2, 3 bodrum kat adedine sahip 7 katlı betonarme yapı modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller üzerinde analizler yapılarak zemin-yapı etkileşimi incelenmiştir. PLAXIS 2D ve SAP2000 programları kullanılarak, her model için analiz yapılmıştır. PLAXIS 2D ve SAP2000 programları için toplam 24 farklı analiz yapılmıştır. Analizler neticesinde ortaya çıkan yatay ve düşey deplasman değerlerinde, bodrum ve normal kat sayısına göre değerlendirmeler yapılmıştır.

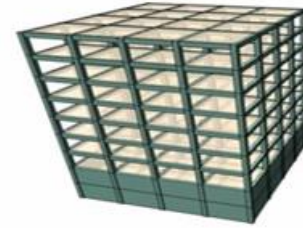
2. Gereç ve Yöntem

2.1. Genel Bilgiler

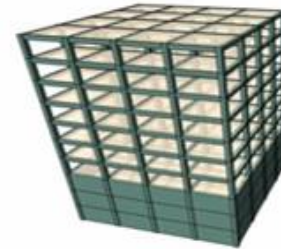
Betonarme yapılar, farklı bodrum kat sayıları (1, 2, 3) ve normal kat sayısı da 7 olacak şekilde modellenmiştir. Oluşturulan yapı modellerinin her katının alanı 400 m²'dir. Tasarımlarda, her modelin bodrum kat yükseklikleri ve normal kat yükseklikleri 3.0 m olacak şekilde kullanılmıştır. Betonarme yapılar çerçeve sistem olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 1).



a) 1 bodrum katlı



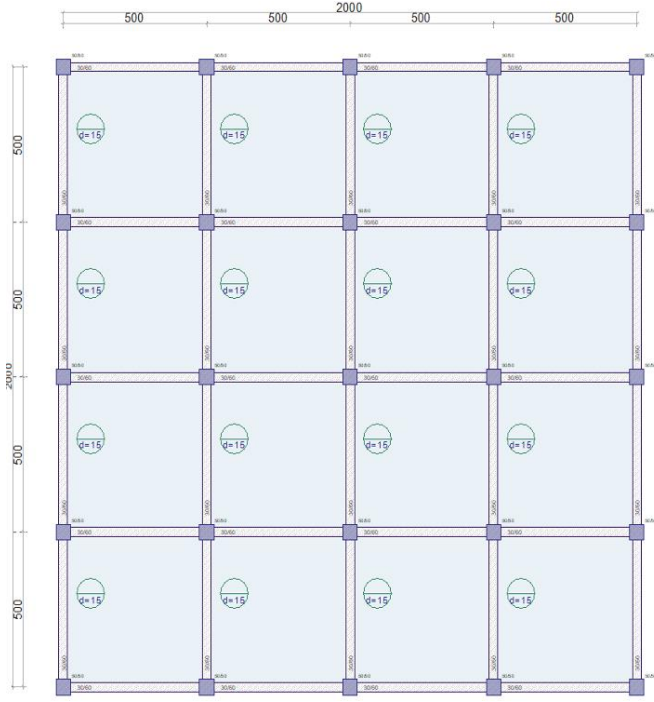
b) 2 bodrum katlı



c) 3 bodrum katlı

Şekil 1. 7 katlı betonarme binaların 3 boyutlu modelleri

Betonarme yapı modellerinde, döşeme kalınlığı 15 cm, kolon boyutları 50x50 cm, kiriş boyutları 30x60 cm, radye temel kalınlığı 100 cm ve bodrum perde kalınlıkları ise 30 cm olarak tasarlanmıştır. Betonarme yapılar planda x ve y yönü için 20.0 m uzunluğa sahiptir. Kolonlar arası mesafe ise 4.0 metredir (Şekil 2). Betonarme yapılarda kullanılan elemanların malzeme özellikleri ve kesitleri Tablo 1'de verilmiştir.



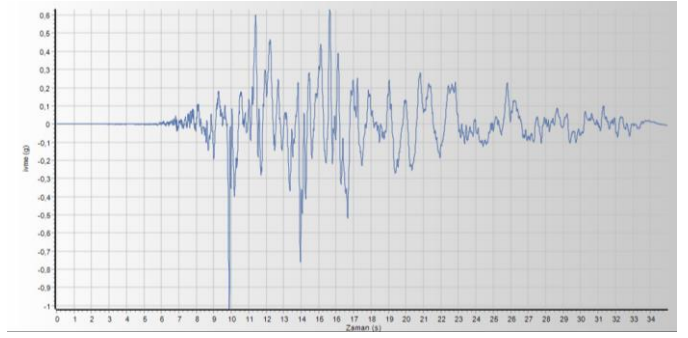
Şekil 2. 7 katlı betonarme yapıların kat planı

Tablo 1. Betonarme yapılarda kullanılan elemanların malzeme özellikleri ve kesitleri

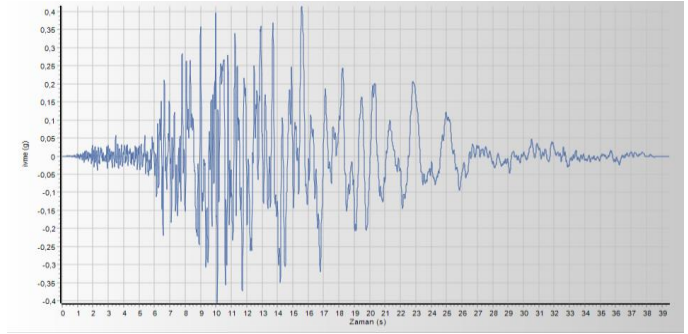
Parametreler	Değerler
Kat Yüksekliği (cm)	300
Bodrum Kat Yüksekliği (cm)	300
Kolon Boyutları (cm)	50x50
Kiriş Boyutları (cm)	30x60
Döşeme Kalınlığı (cm)	15
Perde Kalınlığı (cm)	30
Radye Temel Kalınlığı (cm)	100
Beton Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	25
Beton Elastisite Modülü (kN/m ²)	32000000
Betonun Poisson Oranı	0.20

2.1.2. Model Analizlerinde Kullanılan Deprem Kayıtları

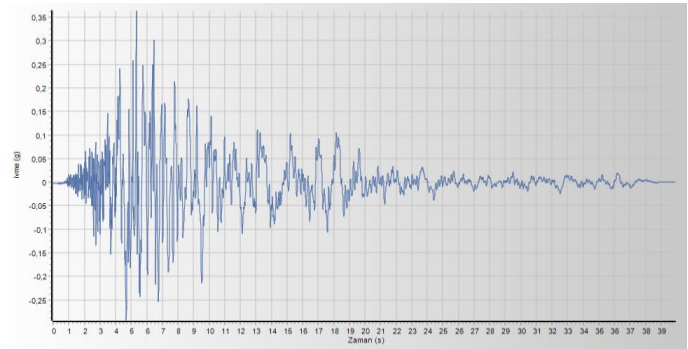
Modeli oluşturulan yapıların, zemin-yapı etkileşiminin deprem yüklemesi altındaki davranışını görmek için farklı depremlere ait 4 ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 3-6). Deprem yüklemesi için deprem kaydı seçilirken büyüklük olarak farklı depremler seçilmiştir. Farklı büyüklükteki depremlere ait deprem ivme kayıtlarının seçilmesinin nedeni, farklı bodrum kat sayılarına sahip yapıların farklı büyüklükteki deprem etkileri altında nasıl davranış sergilediği ve zemin-yapı etkileşimi araştırmaktır. DD-1 için Kocaeli (1999) deprem kaydı, DD-2 için Imperial Valley (1999) deprem kaydı, DD-3 için Loma Prieta (1989) deprem kaydı, DD-4 için Hollister (1974) deprem kaydı seçilmiştir. Deprem kayıtları, SeismoMatch programı kullanılarak tasarım ivme spektrumları ile uyumlu hale getirilmiştir [9].



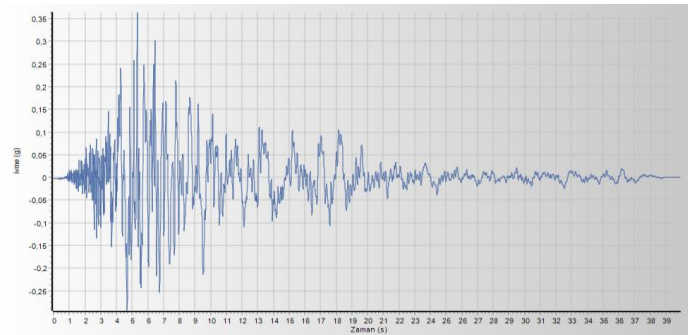
Şekil 3. Kocaeli (1999) depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 4. Imperial Valley (1999) depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 5. Loma Prieta (1989) depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 6. Hollister (1974) depremi ivme-zaman grafiği

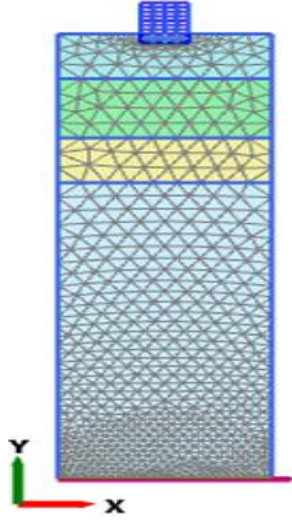
2.2. Sonlu Elemanlar Programları ile Yapılan Modellemeler

2.2.1. SAP2000 Programı ile Modellemeler

Modeller, SAP2000 programında oluşturularak farklı deprem ivme kayıtları altında analiz edilerek değerlendirilmiştir. Tablo 3'te ki Kil-1 malzemesine ait parametreler zemin modelin olarak programa atanmıştır. Zeminin dış kısımlarına sınırlayıcılar eklenerek, zemine ait sınır şartları sağlanmıştır.

2.2.2. PLAXIS 2D Programı ile Modellemeler

Program olarak PLAXIS 2D kullanılarak modellenen zemin-yapı modeline ait sistem, sonlu elemanlara ayrılmıştır. Sonlu elemanlara ayırma işlemi yapılırken, sıklık derecesi olarak en yüksek sıklık tercih edilmiştir. Şekil 7’de oluşturulan sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir.



Şekil 7. PLAXIS 2D programı ile oluşturulan zemin-yapı modelinin sonlu elemanlara bölünmüş hali

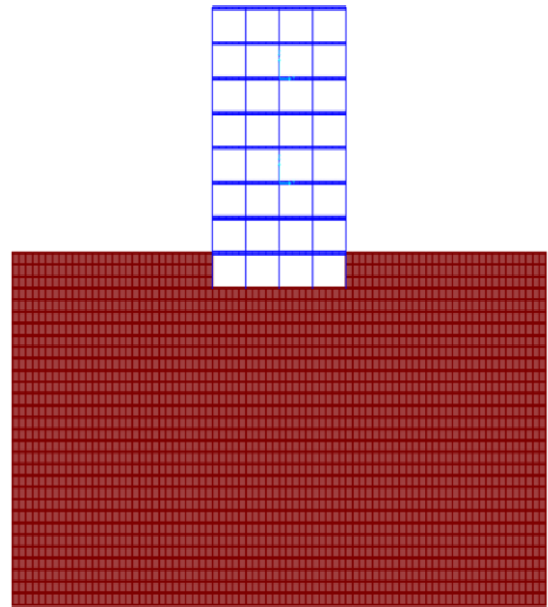
PLAXIS 2D programı için zemin modelinin, yapıya uygun olacak şekilde sınır koşulları belirlenmiştir. Bu sınır koşulları, 80.0 m x 300.0 m olarak belirlenmiştir [10]. 0.0-30.0 m derinliğe kadar Kil-1, 30.0-70.0 m derinliğe kadar Kum, 70.0-100.0 m derinliğe kadar Kil-2, 100.0-300.0 m derinliğe kadar Kil-3 zeminine ait değerler PLAXIS 2D programına aktarılmıştır. Sistemdeki taşıyıcı elemanlara ait değerler ise Tablo 2’de verilmiştir. PLAXIS 2D programında zeminlere ait seçilebilecek farklı matematiksel modeller bulunmaktadır. Bu modeller sayesinde, farklı şartlar ve ortamlarda bulunan zeminlere ait gerilme, şekil değiştirme davranışları tanımlanabilmektedir. Bu 4 farklı model, Mohr-Coulomb Zemin Modeli, Doğrusal Elastik Zemin Modeli, Pekleşen Zemin Modeli ve Yumuşak Zemin Modelidir. Analiz yapılırken tercih edilen zemin modeli, Pekleşen Zemin Modelidir. Zemin-yapı etkileşimi için belirlenen ortam sınır şartları, PLAXIS 2D programı yardımıyla kolaylıkla yapılabilmektedir. Her doğrultuda bulunan sınırlara ait bir sınır koşulu bulunmalıdır. Bir probleme ait sınır koşulları tanımlanmazsa eğer, probleme ait deplasman durumları belirsiz hale gelmektedir [10]. PLAXIS 2D için mevcutta bulunan standart sınır koşulları tercih edilmiştir. Standart sınır koşulları, zemin modelinin en altında z düşey ve y yatay deplasmanların oluşmasını engellemekte ($u_y=0$, $u_z=0$), zemin modelinin kenarlarında ise, sadece düşey harekete izin verilmektedir ($u_x=0$, $u_y=serbest$). Tercih edilen bu sınır koşulları zemin modellerine ait problemlerin birçoğunda geçerli olmaktadır [8].

Tablo 2. Taşıyıcı elemanları boyutları ve malzeme özellikleri

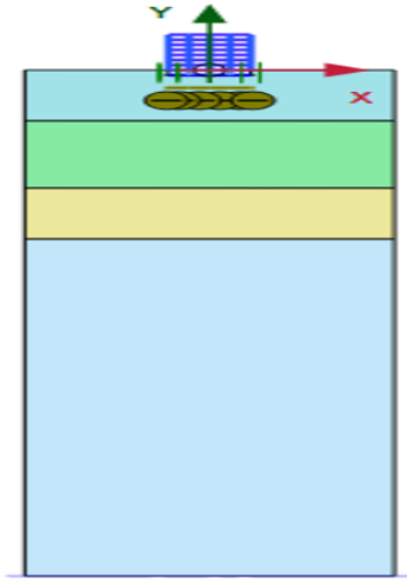
Parametre	Kolon	Bodrum Perdesi	Radye Temel	Döşeme
Kalınlık (cm)	50	30	100	15
EA_1 (kN/m)	$16E^6$	$9.6E^6$	$32E^6$	$4.8E^6$
EI (kN/m ² /m)	333400	72000	2667000	9000
Poisson Oranı	0.20	0.20	0.20	0.20

2.2.3. Model Zemin Özellikleri

Zemin modeli tasarlanırken, PLAXIS 2D ve SAP2000 programları için farklı modellenmiştir. Modellemelerden sonra analizler için sonlu elemanlara ayırma yöntemi kullanılmıştır [11]. SAP2000 programı kullanım amacı olarak direkt zemine yönelik bir program olmadığı için sonlu elemanlara ayırmada, zemin boyutunun büyüklüğü işlem süresini çok etkilemektedir. İşlem süresinin ideal olması için SAP2000 programında zemin modeli x yönünde 80.0 m, y yönünde 80.0 m ve z yönünde 30.0 m olarak tasarlanmıştır (Şekil 8.a). PLAXIS programında, 2 boyutlu model oluşturulduğundan, yatayda 80.0 m genişliğe sahip düşey de ise 300.0 m derinliğe sahip zemin modellenmiştir (Şekil 8.b). Oluşturulan zemin modellerinde kullanılan zemin parametreleri Tablo 3’te verilmiştir [8].



(a)



(b)

Şekil 8. SAP2000 ve PLAXIS programlarında oluşturulan zemin modelleri

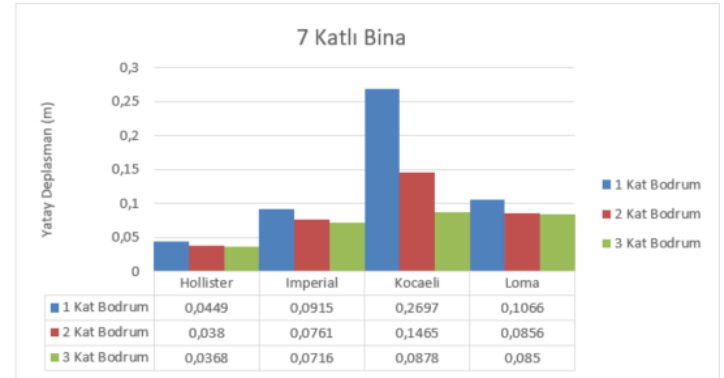
Tablo 3. PLAXIS programında kullanılan zemin parametreleri

Parametre	Kil-1	Kum	Kil-2	Kil-3
Derinlik (m)	0-30.0	30.0-70.0	70.0-100.0	100.0-300.0
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Doygun B.H.A. (kN/m ³)	18.0	19.0	20.0	20.0
Doğal B.H.A. (kN/m ³)	17.0	18.0	19.0	19.0
Poisson Oranı	0.20	0.20	0.20	0.20
Elastisite Modülü (kN/m ²)	10000	20000	70000	80000
Kohezyon (kN/m ²)	7.0	2.0	12.0	15.0
İçsel Sürtünme Açısı (°)	27.0	33.0	30.0	30.0
K ₀ Katsayısı	0.5460	0.4554	0.5000	0.5000

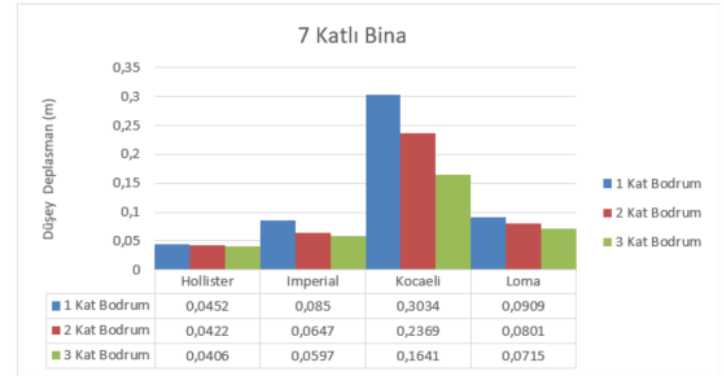
3. Bulgular ve tartışma

3.1. SAP2000 ile Elde Edilen Analiz Sonuçları

Analizlerin neticesinde bulunan deplasman değerleri Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde, bodrum kat sayısındaki değişime bağlı olarak yatay ve düşey deplasman değerlerinin değiştiği sonucu ortaya çıkmıştır. Yatayda meydana gelen en büyük deplasman, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.2697 m olarak hesaplanmıştır. Meydana gelen en düşük yatay deplasman ise Hollister depremi yüklemesinde ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.0368 m olarak hesaplanmıştır.



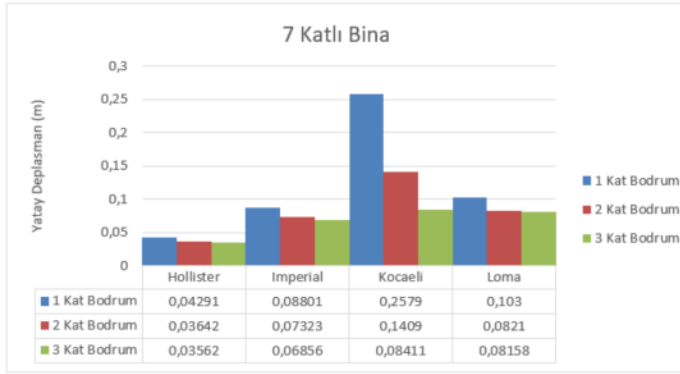
Şekil 9. 7 katlı betonarme yapının yatay deplasman değerleri



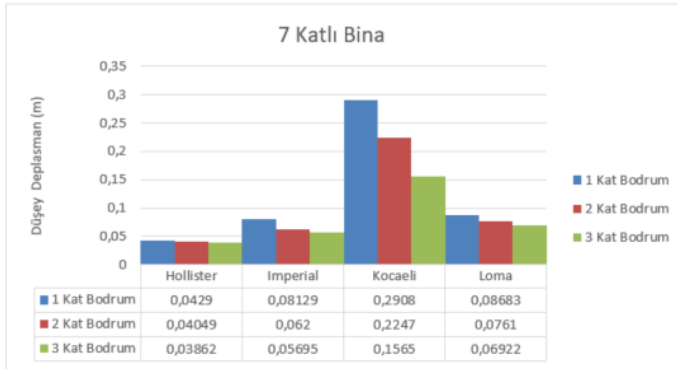
Şekil 10. 7 katlı betonarme yapının düşey deplasman değerleri

3.2. PLAXIS 2D ile Elde Edilen Analiz Sonuçları

Analizlerin neticesinde bulunan deplasman değerleri Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde, bodrum kat sayısındaki değişime bağlı olarak yatay ve düşey deplasman değerlerinin değiştiği sonucu ortaya çıkmıştır. Yatayda meydana gelen en büyük deplasman, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.2579 m olarak hesaplanmıştır. Meydana gelen en düşük yatay deplasman ise Hollister depremi yüklemesinde ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.03562 m olarak bulunmuştur.



Şekil 11. 7 katlı betonarme yapının yatay deplasman değerleri



Şekil 12. 7 katlı betonarme yapının düşey deplasman değerleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, 7 katlı betonarme binalar için, zemin-yapı etkileşimi, büyüklük olarak farklı depremler ve bodrum kat sayısındaki değişime göre incelenmiştir. Bu amaçla, farklı bodrum kat sayısına (1, 2, 3) ve 7 normal kat sayısına sahip sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin SAP2000 ve PLAXIS 2D sonlu elemanlar programları kullanılarak, 4 farklı deprem ivme kaydı altında dinamik analizleri yapılmıştır. Dinamik analizlerin neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

-SAP2000 programı için düşeyde oluşan en büyük deplasman değeri, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.3034 m olarak hesaplanmıştır. En küçük düşey deplasman değeri ise Hollister depremi altında ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.0406 m olarak hesaplanmıştır.

-PLAXIS 2D programı için düşeyde oluşan deplasman değeri en fazla, Kocaeli depremi yüklemesinde ve 7 katlı (1 bodrum katlı) yapıda 0.2908 m olarak hesaplanmıştır. En az düşey deplasman değeri ise Hollister depremi altında ve 7 katlı (3 bodrum katlı) yapıda 0.03862 m olarak bulunmuştur.

-Deplasman değerlerindeki azalma, bodrum kat sayısındaki artışa bağlı olduğu tespit edilmiştir. Farklı bodrum kat sayıları, en çok Kocaeli depremindeki deplasman değerlerini değiştirmiştir.

-SAP2000 programı kullanılarak yapılan analizler neticesinde bulunan, yatay ve düşey deplasman değerlerinin, PLAXIS 2D programı kullanılarak yapılan analizler neticesinde bulunan deplasman değerlerine göre %5-10 daha

büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu deplasman değerleri farklılıklarının, SAP2000 sonlu elemanlar programının üst yapıyı ve deprem etkilerini, PLAXIS 2D programına göre daha detaylı bir şekilde modelleyebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, PLAXIS 2D sonlu elemanlar programının ise SAP2000 programına göre zemin modeli ve zemin sınır şartlarını daha detaylı modellemesi de oluşan deplasman değerlerinin farklılığının nedenleri arasında olabilir. İki programda yapılan analizlerden elde edilen sonuçların arasındaki farklılıkların oluşmasındaki etkenlerin daha iyi anlaşılması için çok daha detaylı çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, “Çok katlı yapıların farklı deprem etkileri altında zemin-yapı etkileşiminin nümerik analizi” tezi kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, tez savunma jürisine kıymetli katkılarından dolayı teşekkür eder.

Yazar katkısı

Mesut GÖR, çalışmayı planlamış, tasarlamış ve kontrol etmiştir. Serhat YILDIZ ise çalışma hakkında verileri toplamış ve gerekli analizleri yaparak makaleyi yazmıştır.

Kaynakça

- [1] E. Aydın, B. Öztürk, A. Bogdanovic, E. N. Farsangi, “Influence Of Soil-Structure Interaction (SSI) On Optimal Design Of Passive Damping Devices,” Structures, Volume 28, Pages 847-862, ISSN 2352-0124, 2020.
- [2] V. Anand, S. R. S. Kumar, “Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review,” Structures, Volume 16, Pages 317-326, ISSN 2352-0124, 2018.
- [3] Y. Yönet, “Yapı-Zemin Etkileşiminin Binaların Deprem Davranışına Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, 2022.
- [4] W. Al Agha, W. A. Almorad, N. Umamaheswari, A. Alhelwani, “Study The Seismic Response Of Reinforced Concrete High-Rise Building With Dual Framed-Shear Wall System Considering The Effect Of Soil Structure Interaction,” Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 2, 2021, Pages 2182-2188, ISSN 2214-7853, 2021.
- [5] M. Alitalash, H. Shahnazari, M. H. Baziari, “Parametric Study On Seismic Topography-Soil-Structure Interaction; Topographic Effect,” Geotech Geol Eng., doi10.1007/s10706-018-0489-8, 2018.
- [6] W. S. Hall, G. Oliveto, “Boundary Element Methods for Soil-Structure Interaction,” Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2004.
- [7] G. A. L. Jimenez, D. Dias, “Dynamic Soil-Structure Interaction Effects In Buildings Founded On Vertical Reinforcement Elements,” CivilEng, 3, 573-593, 2022.
- [8] Z. K. Erginsoy, “Sığ Temelli Binalarda Bodrum Kat Adedinin Deprem-Zemin-Yapı Etkileşimi Bakımından İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, 2019.
- [9] S. Yıldız, “Çok Katlı Yapıların Farklı Deprem Etkileri Altında Zemin-Yapı Etkileşiminin Nümerik Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, 2023.
- [10] T. Liang, B. H. Maula, L. Xianzhang, S. Lei, S. “Numerical Simulations Of Shake-Table Experiment For Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction In Liquefiable Soils,” Earthq Eng & Eng Vib, 13: 171-180, 2014.
- [11] M. Gör, “Kazıklı Temellerin Statik Düşey Yükler Etkisi Altında Modellenmesi,” Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2019.