

# Yumuşak Zeminlerde Yapılan Betonarme Binaların Deprem Davranışına Bodrum Kat Etkisi

\*<sup>1</sup>Naci Çağlar, <sup>2</sup>Zehra Şule Garip and <sup>1</sup>Sevil Atasoy

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, Turkey

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Karabuk University, Turkey

## Özet

Bu çalışmada, yumuşak zeminler üzerine inşa edilen betonarme binaların, bodrum katlı yapılması durumunda göstereceği deprem davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, 3-10 katlı yapıların yapı-zemin modeli kurularak, sonlu elemanlar prensibine dayalı olarak çalışan SAP2000 programında, sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapı-zemin modellerinin tamamının zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerin sonuçlarına göre her katın temel seviyesine göre görelî kat ötelemeleri grafikler halinde sunulmuş, ayrıca her yapının son kat noktalarının yer değiştirme-zaman grafikleri de sunularak yapı performansları değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı-zemin etkileşimi, sonlu elemanlar yöntemi

## Abstract

In this study, the effects of basement floor of reinforced concrete structures subjected earthquake were investigated. For this purpose, time history analysis of the soil-structure models are carried out by using the finite element method. The response of basement floor of reinforced concrete structures, 3 to 10 storey buildings that modelled with/without basement floor were analyzed. Dynamic analysis results were presented as graphs. To make better observation of building performance, displacement time histories for all stories were presented in this study.

**Key words:** Soil-structure interaction, Finite element method

## 1. Giriş

Deprem esnasında yapı ve zeminin farklı şekillerde hareket etmesi nedeniyle zemin ve yapı arasında bir etkileşim mevcuttur. Yapılan analizlerde yapı sistemlerinin temellerinde statik yüklemeler altında da çökme ve dönmelerin olduğu bilinmektedir. Deprem gibi dinamik bir yüklemeye altında yapı ve temel birlikte hareket etmekte olup depreme bağlı olarak zıt yönde hareket etmeleri söz konusudur. Temeller dinamik yüklemeye boyunca zemin üzerinde farklı konumlarda bulunabilmektedir. Dolayısıyla temel sistemlerinde ankastre kabulü yapılarak yer değiştirme ve dönmelerin göz ardı edilmesi doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Zemin özellikleri yapının periyot ve mod şekilleri üzerinde etkilidir. Yapı ve zeminin periyotlarının çakışması durumunda yapıda rezonans ortaya çıkacaktır ve üstyapı rezonans etkisi ile büyük zorlanmalara maruz kalacaktır. Türkiye’de özellikle 2007 Deprem Yönetmeliği [1] ile birlikte, yapı-zemin etkileşiminin çözümlenmelerde yer alması gündeme gelmiştir.

Zayıf zeminlerde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması önem arz etmektedir. Yüksek katlı yapıların yumuşak zeminler üzerinde modellenmesi durumunda deprem gibi yatay yüklerin karşılanmasında yetersizlik oluşmaktadır. Yetersizliğin giderilmesi için yapı

---

\*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: [caglar@sakarya.edu.tr](mailto:caglar@sakarya.edu.tr), Phone: +902642955752 Fax: +902642955601

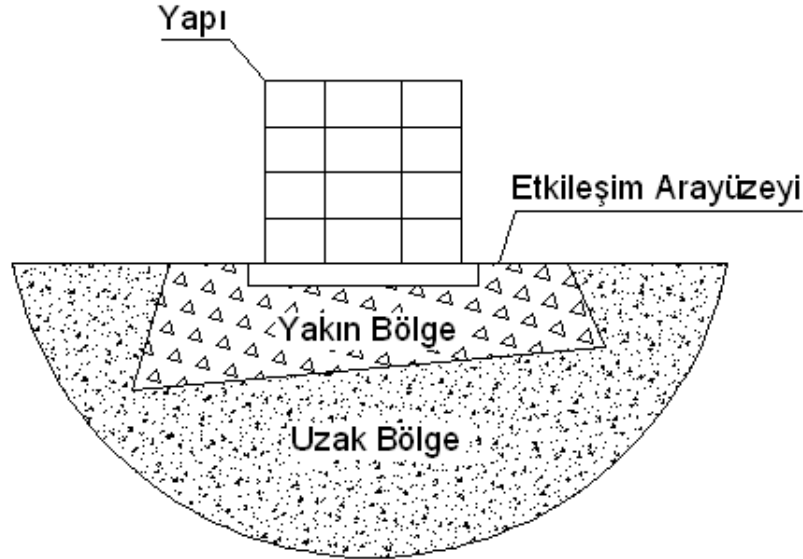
sisteminde bodrum kat teşkilinin uygun olacağı düşünülmektedir. Şiddetli depremler etkisindeki yüksek katlı yapıların görece kat ötelemelerinin azaltılmasında ve deprem davranışında bodrum kat teşkilinin olumlu etki yaptığı bilinmektedir. Literatürde yapı-zemin etkileşimi hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır [2-7].

## 2. Yapı Zemin Etkileşimi

Yapı-zemin etkileşimi çeşitli sistemlerin bir kısmının veya tamamının iç içe ya da üst üste gelmesi ile oluşan birleşik sistemlerdir. Birleşik sistemler ise aralarında zayıf veya kuvvetli bağlantılar bulunan ve birbirleriyle etkileşim halinde bulunan sistemlerdir. Birleşik sistemleri analiz edebilmek için sistemin her parçası ayrı ayrı analiz edilir ve bu parçaların (sistemlerin) birbirleriyle olan etkileri göz önüne alınır. Bu sistemler hesaplanırken herhangi bir alan (sistem) diğerinden ayrı çözülmez ve herhangi bir bağımsız değişken diferansiyel denklem düzeyinde yok edilemez [8].

Yapı-zemin etkileşimi problemlerinde aslında iki önemli bileşen vardır. Bunlar; sonlu bir boyuta sahip olan yapı ve sonsuza uzanan zemindir. Bu tip problemlerin analizinde, yaygın olarak kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir.

Yapı-zemin etkileşim sistemlerinde yüklemeler ve kuvvetler ortamlar aracılığıyla iletilir ve problemler çözülürken, hesaplarda kolaylık sağlayabilmek amacıyla bu ortamlar da çeşitli gruplara (Sınırsız Ortam, Sınırlı Ortam, Etkileşim Ara Yüzeyi) ayrılır [9]. Bu sistemlere ait modeller genelleştirilerek Şekil 1.'deki gibi idealize edilmektedir.



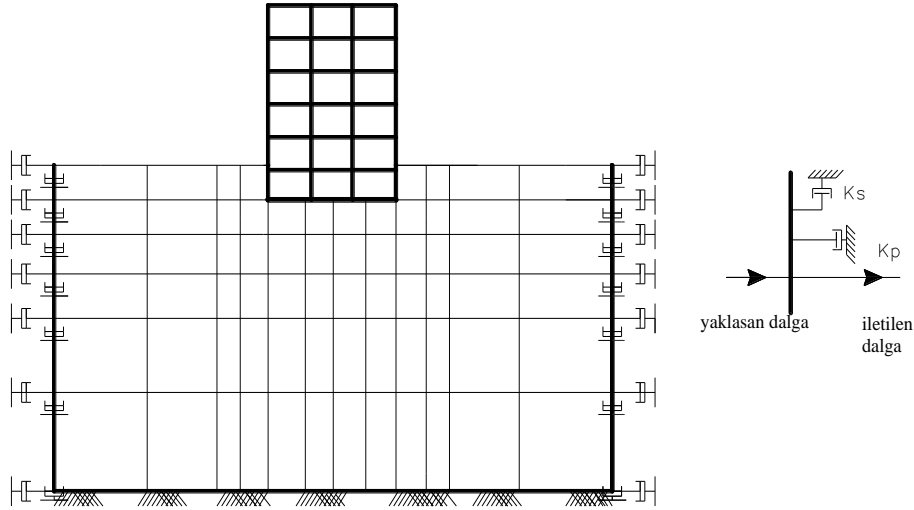
Şekil 1. Dinamik Sınırsız Ortam-Yapı Etkileşimi [10]

Üst yapı, deprem kaynağı, zemin şartları ve temelin özellikleri yapının sismik davranışı ile yakından ilgilidir. Yapı ve zeminin karşılıklı etkileşimi, üst yapı ve yerel zeminin dinamik karakteristiklerini etkiler. Kavramsal olarak yapı-zemin etkileşimi (YZE), yapıda kütle ve rijitlik dağılımını etkileyerek sistemin bütününde frekans ve mod şekillerinin değişimine neden olur. YZE analizi için ele alınan zemin ortamı, yay, kayma kirişi, yarı sonsuz ortam olarak modellenmektedir.

Dinamik yapı zemin sisteminin analizi genel olarak, Direkt (Doğrudan) Yöntem ve Alt Sistemlere Ayırma Yöntemi olmak üzere iki farklı yaklaşımla ele alınmaktadır [11]. Bu çalışmada zemin sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla modellendiğinden direkt yöntem kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli ile üst yapı ve zeminin tek bir sistem olarak idealize edildiği ve taban kayasında tanımlanan deprem hareketinin etkisi altında analiz edildiği yönetime direkt (doğrudan) yöntem denir. Bu yöntemde dinamik yükleme etkisi altında yapı-zemin sisteminde, kesit tesirleri, yer değiştirme ve mod şekilleri zaman ve frekansa bağlı olarak tek adımda SEM kullanılarak bulunmaktadır.

Yapılan parametrik çalışmalar, zemin sonlu eleman ağının, özellikle geometrik sönümün (radyasyonun) önemli olduğu yüksek frekanslı yer hareketlerinde ve zeminin sönümünün büyük olması gibi özel durumlarda, yapı temel taban genişliğinin sağ ve solunda 8~10 katına kadar uzatılmasının yeterli olacağı belirtilmektedir [12]. Direkt Yöntem kullanılarak yapılan bu çalışma, zeminin yapıdan belli bir mesafe sonra kesilen sınır yüzeylerine viskoz sınır şartı uygulanarak analiz edilmiştir. Kaynaktan saçılan dalgalar zeminin kesim noktalarındaki yapay sınırlara çarparak bir kısmının tekrar zemin ortamına yansımaları durumuna neden olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için de viskoz sınır şartları kullanılmaktadır.

Viskoz sınır şartının kullanılabilmesi için, düzlem dalga yayılışının izotrop ve lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir. Yakın bölgenin sonlu elemanlar kullanılarak yapılan temsili bir modeli Şekil 2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Direkt Yöntemde Sınır Şartları (Viskoz Sınırlar)

Dinamik analizlerde modellenen viskoz sınır şartı efektif rijitlik ve efektif sönüm değerleri tanımlanmıştır. Efektif rijitlik tanımlanırken ilgili noktanın bir birimlik yer değiştirmesi için gereken kuvvet alınmıştır. Efektif sönüm:

$$c = \rho V_s A \quad (1)$$

formülüyle hesaplanır. Burada,  $\rho$ , birim hacim ağırlık,  $V_s$ , zeminin kayma dalga hızı ve  $A$  ise etkili alandır. Zeminin kayma dalgası;

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada  $G$ , zeminin kayma modülüdür ve bu değer;

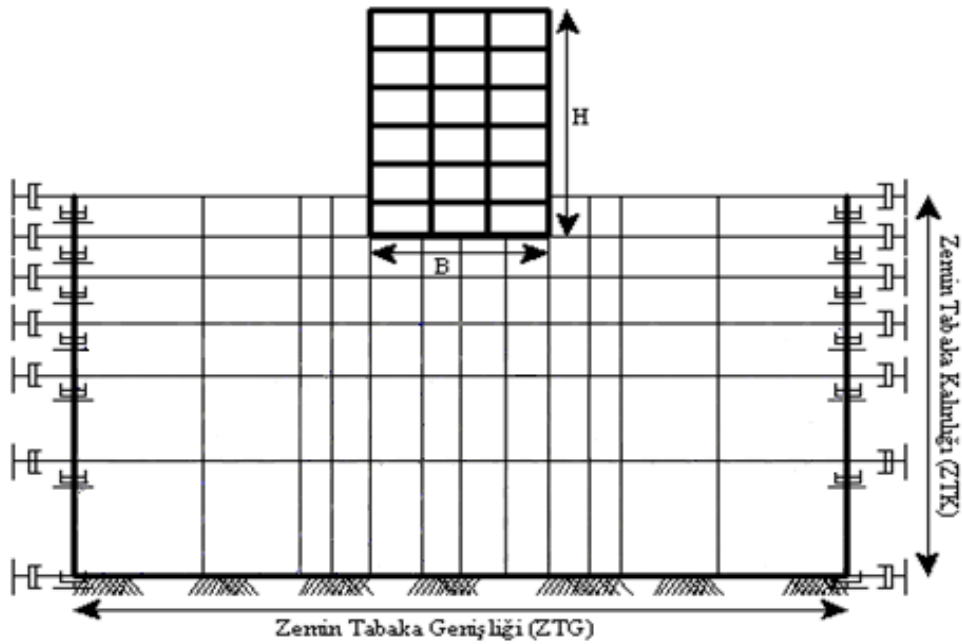
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada  $E$ , zeminin elastisite modülüdür [13].

Zemin, yapıya etkileyen deprem ivmesini büyütürken hasarın da büyümesine neden olur. Bu olay zeminin büyütme etkisi (amplifikasyon) olarak tarif edilir. Yerel zemin kalınlığı üst yapı elemanlarındaki yer değiştirme, ivme gibi değerlerin yanında maksimum taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentini de etkilemektedir. Kayma dalgası hızı, deprem yükleri sırasında zemin tabakalarının meydana getireceği büyütme hesaplanmasında kullanılan en önemli dinamik zemin parametresidir.

### 3. Sayısal Çalışma

Bu çalışmada, yumuşak zeminler üzerinde bodrum katlı olarak modellenen betonarme binaların deprem davranışı incelenmiştir. Yapı-zemin modeli (Şekil 3) kurularak, sonlu elemanlar prensibine dayalı olarak çalışan SAP2000 programında, problemin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapı-Zemin modellerinin tamamının dinamik analizleri zaman tanım alanında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Yapı-Zemin Modeli

Dinamik analizlerde 28 farklı üstyapı modellenmiş olup üstyapı modellerinin tamamında elastisite modülü  $E = 28\text{GPa}$ , poisson oranı  $\nu = 0.20$  ve birim hacim ağırlığı  $\rho =$

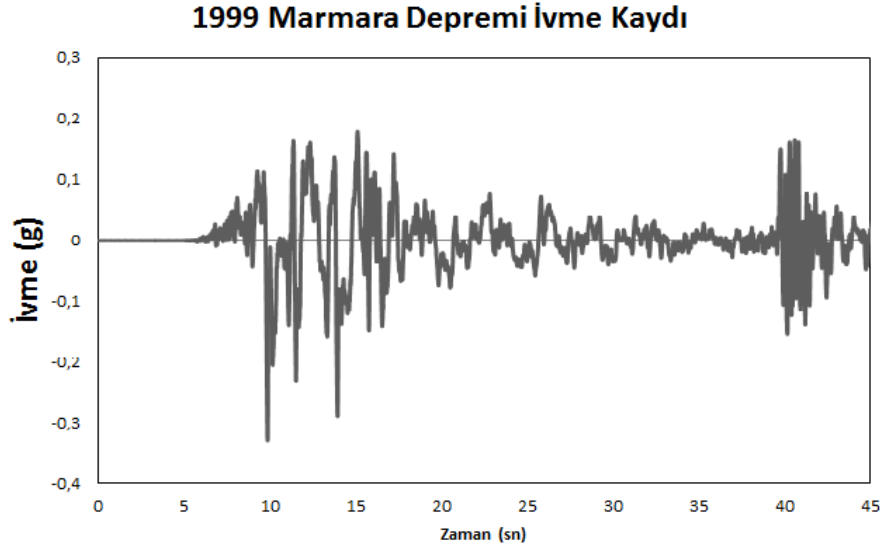
25 kN/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir. Yapı modellenirken seçilen kolon boyutları 50×50 cm, perde boyutları 40×300 cm, kiriş boyutları ise 25×50 cm'dir. Yapıdaki sabit yük 2.0 kN/m<sup>2</sup> ve hareketli yük de 1.5 kN/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Kat yüksekliği zemin kat için 5m, diğer katlar için ise 3m alınmıştır.

Zemin alt yapı modelleri oluşturulurken yumuşak zemin literatürden [14] seçilmiş ve bu zeminde bulunan yer altı su seviyesi (YASS) dikkate alınmıştır. YASS etkisi dikkate alınırken zeminlerin elastisite modülleri 1/10 oranında azaltılmıştır.

Sert zemin modeli oluşturulurken yumuşak zemin modeli temel alınmış ve zemin katman kalınlıklarının aynı olduğu ayrıca, YASS bulunmadığı ve zemin modelinin sert kil, killi kum ve yoğun kum ve çakıl gibi zeminlerden oluştuğu varsayımları yapılmıştır.

Dinamik analizlerin tamamında aşağıda verilen varsayımlar kullanılmıştır;

1. 1999 da meydana gelen Marmara depreminin yapı-zemin sonlu eleman modellerinin tamamına aynı şiddette etki ettiği (Şekil 4),
2. Yapı-zemin sisteminde sönümün %5 olduğu,
3. Kolon ve kiriş kesitlerinin dikdörtgen ve kat yüksekliği boyunca sabit olduğu,
4. Zeminin izotrop ve homojen olduğu.



Şekil 4. Marmara Depremi Yarımca Petkim Kuzey-Güney İvme-Zaman Grafiği

Zemin alt yapısında viskoz sınır şartını uygulayabilmek için ilgili noktalara bir birimlik yer değiştirme yaptıracak olan kuvvet uygulanmış ve bu da efektif rijitlik olarak alınmıştır. Zemin alt yapı modeli seçilirken zemin tabaka genişliği yapı tabanından 10 kat her iki tarafa uzatılmak suretiyle 315m, zemin tabaka kalınlığı da, 15m olarak seçilmiştir.

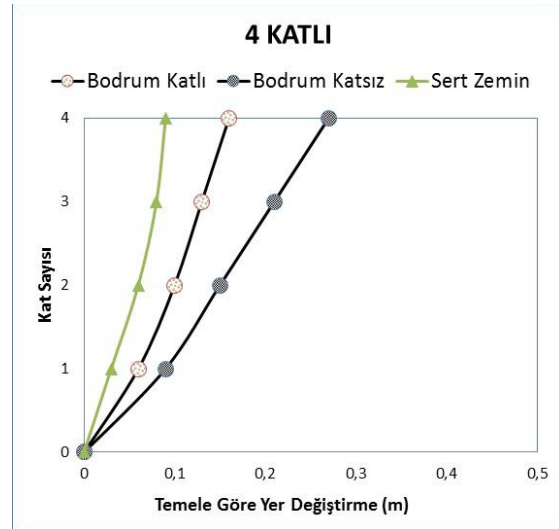
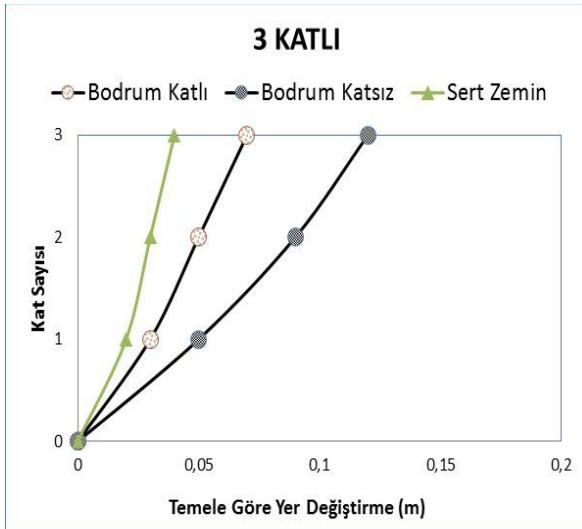
Çalışmanın tamamında, yumuşak zemin üzerinde inşa edilen betonarme yapıların davranışına bodrum katın katkısını belirlemek amacıyla yumuşak zemin üzerindeki bodrumlu (BDL) ve bodrumsuz (BDZ) betonarme yapılar, sert zemin (SZ) üzerinde inşa edilen aynı özellikteki bodrumsuz yapılarla karşılaştırılmıştır. Yapı-zemin modellerinin zaman tanım alanında dinamik analizleri yapılarak üstyapının kat yer değiştirmeleri bulunmuştur. Ayrıca, yapıların deprem davranışı değerlendirilirken DBYBHY 2007'de verilen görelî kat ötelemeleri

sınırlamaları da dikkate alınmıştır.

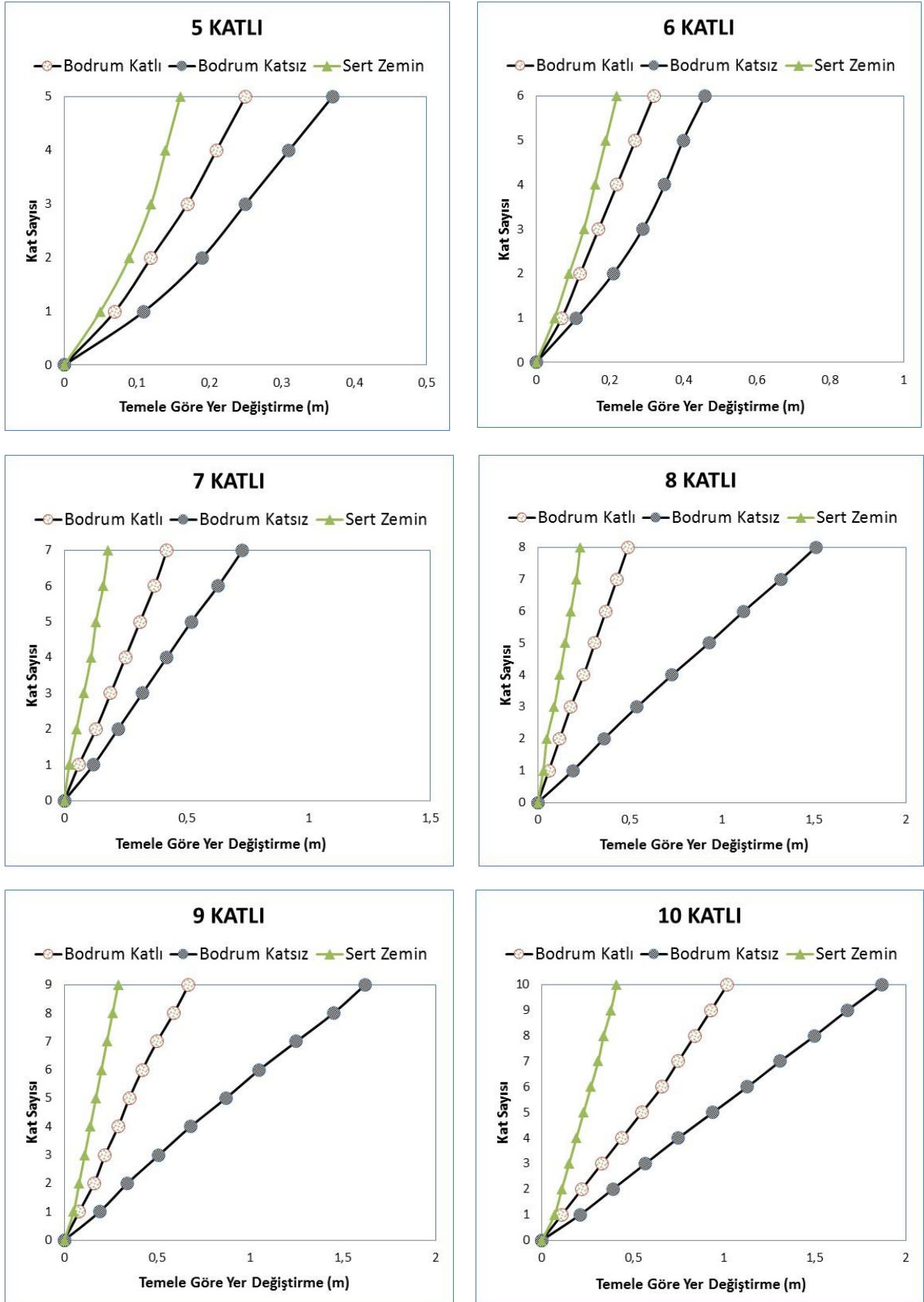
Yapı davranışının belirlenebilmesi amacıyla, betonarme yapının temeline göre görece kat ötelemeleri her bir yapı-zemin modeli için tablo ve grafikler halinde sunularak değerlendirilmiştir. Bodrum katlı yapı modeli, yumuşak ve sert zeminlerdeki bodrum katlı yapı modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılarında bodrum kat teşkil edilmesinin deprem davranışına etkisini göstermiştir.

**Tablo 1.** Son Kat Yer Değiştirmeleri

Kat Sayısı	Sert Zeminde Bodrum Katsız	Yumuşak Zeminde Bodrum Katsız	Yumuşak Zeminde Bodrum Katlı	Bodrum Katın Yapı Davranışına Olumlu Etki Oranı
3	4 cm	12 cm	7 cm	%41
4	9 cm	28 cm	16 cm	%42
5	16 cm	37 cm	25 cm	%33
6	19 cm	46 cm	32 cm	%31
7	20 cm	73 cm	42 cm	%42
8	23 cm	151 cm	49 cm	%67
9	29 cm	162 cm	67 cm	%59
10	41 cm	187 cm	102 cm	%45



**Şekil 5.a.** Yapıların görece kat yer değiştirmeleri (Tek Bodrumlu Yapılar)

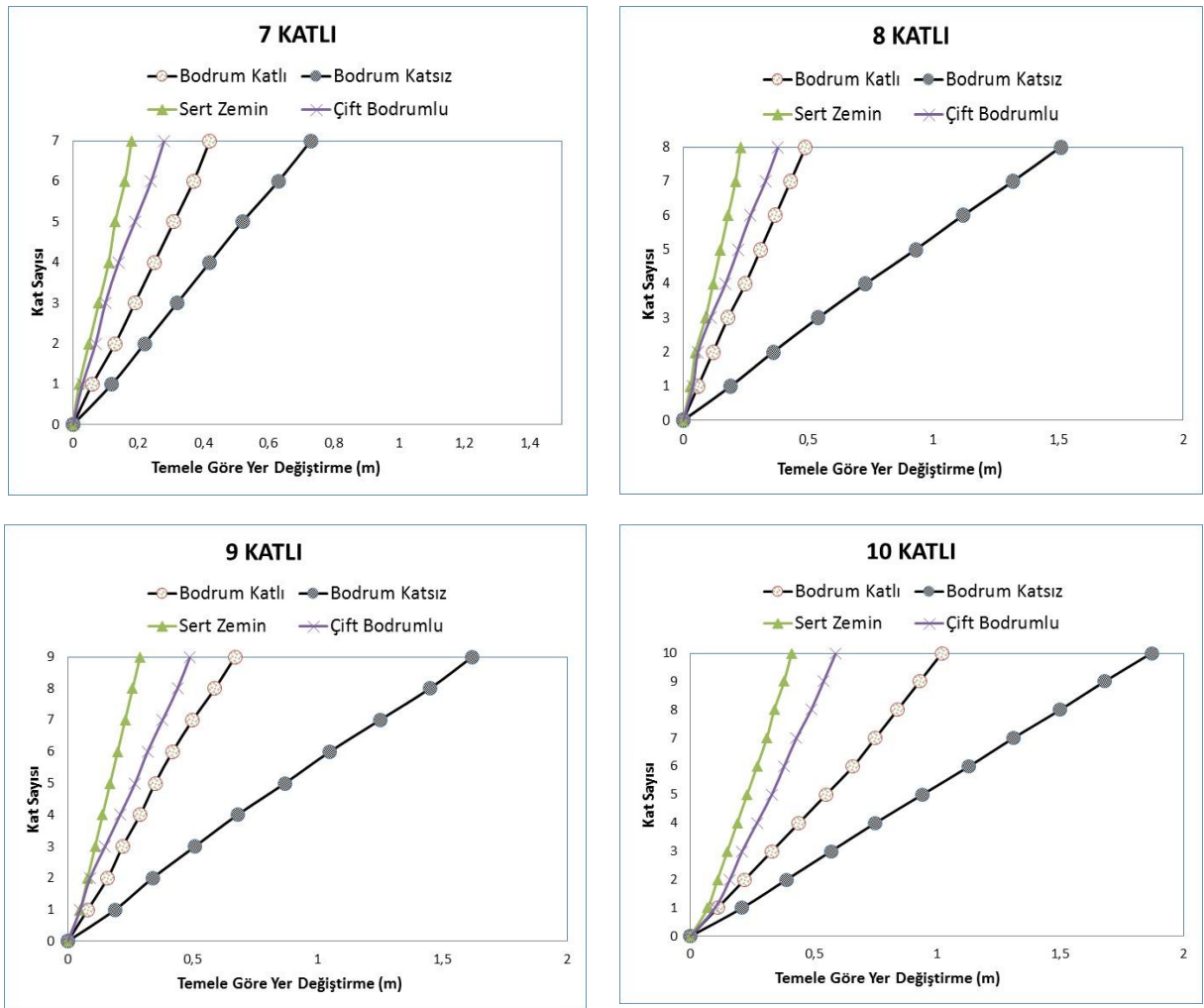


Şekil 5.b. Yapıların görel kat yer değiştirmeleri (Tek Bodrumlu Yapılar)

Yumuşak zemin üzerinde bodrum katlı olarak modellenen yapılarda oluşan deplasmanları azaltabilmek için 7-10 kat arası modellenen yapılar iki bodrumlu olarak tasarlanmış, dinamik analizleri yapılmış ve sonuçların karşılaştırılması tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

**Tablo 2.** Son Kat Yer Değiştirmeleri

Kat Sayısı	Yumuşak Zeminde Bodrum Katsız	Yumuşak Zeminde İki Bodrum Katlı	İki Bodrum Katlı Yapı Davranışına Olumlu Etki Oranı
7	73 cm	28 cm	%62
8	151 cm	38 cm	%74
9	162 cm	49 cm	%70
10	187 cm	59 cm	%69



**Şekil 6.** Yapıların görece kat yer değiştirmeleri (Çift Bodrumlu Yapılar)

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, yapıların tepe noktasının yapı temeline göre görece kat yer değiştirmeleri açısından değerlendirilmiş ve yapıların deprem davranışı yer değiştirmeler açısından ele alınmıştır. Sert zemin üzerinde yapılan yapılara göre yumuşak zeminlerdeki



yapıların deprem davranışına bodrum katın etkisi araştırılmıştır. Dolayısıyla, yumuşak zeminlerdeki bodrum katsız ve bodrum katlı yapıların sert zemin üzerindeki yapı davranışına yer değiştirmeler açısından ne kadar yaklaştığı araştırılmıştır.

Elde edilen grafikler incelendiğinde, 3 ve 4 katlı yapılarda oluşan yer değiştirmeler her üç modelde de (SZ, BDL, BDZ) DBYBHY 2007’de belirlenen sınırlar içerisinde olduğu ve güvenlik koşullarını sağladığı gözlemlenmiştir. Sert zeminde 7-10 katlı olarak modellenen yapılarda oluşan yer değiştirmelerin DBYBHY 2007’de belirlenen sınırlar içerisinde olduğu ancak bodrum katsız modellenen yapıda oluşan deplasmanların sınır değerlerini aştığı belirlenmiştir. Bodrum katlı olarak modellenen 7 ile 10 kat arası yapıların %50 civarında daha iyi deprem performansı sergilediği gözlemlenmiştir.

Sert ve yumuşak zemindeki yapılar karşılaştırıldığında yumuşak zeminde bodrum katlı olarak modellenen yapının bodrum katsız olarak modellenen yapıya oranla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiş ancak sert zemin üzerinde modellenen yapının yer değiştirme oranına yaklaşmadığı belirlenmiştir. Yumuşak zemindeki yapılarda oluşan ötelenmeleri aza indirebilmek için 7-10 kat arası yumuşak zeminde modellenen yapılar iki bodrumlu olarak tasarlanmış ve analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde çift bodrumlu olarak tasarlanan yapıların tek bodrumlu olarak tasarlanan yapılara oranla deprem davranışı açısından sert zeminde tasarlanan yapılara yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ayrıca yumuşak zeminde modellenen çift bodrumlu yapının bodrumsuz olarak modellenen yapıya oranla %70 civarında daha iyi deprem davranışı sergilemiştir.

Bu çalışmada analizler lineer elastik olarak yapılmış olup ileride yapılacak çalışmalarda non lineer olarak yapılabilir. Yürürlükte olan Deprem Yönetmeliğinde zemin şartlarının yapının performansına olan etkisi yeterince detaylı dikkate alınmamaktadır. Bu konuda deprem yönetmeliğinde ek şartlar eklenerek düzenleme yapılmalıdır.

## 6. Kaynaklar

- [1] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007.
- [2] GUITERREZ JA, CHOPRA AK. A Substructure Method for Earthquake Analysis of Structures Including Structure Soil Interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 6, 51-69, 1978.
- [3] AYDINOĞLU MN. “Yapı-Zemin Dinamik Etkileşiminin Genel Formülasyonu ve Zemine Gömülü Yapılar için bir Altsistem Yöntemi” Doçentlik Tezi, 1981.
- [4] YERLİ, H, R, “İki ve Üç Boyutlu Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu-Sonsuz Elemanlar Kullanarak Analizi”, Doktora Tezi, ÇÜ FBE, Adana , 1998.
- [5] GENEŞ C., ”İki ve Üç Boyutlu Zemin Yapı Etkileşim Problemlerinin Sonsuz Elemanlarla Analizi”, Doktora Tezi ÇÜ FBE, Adana, Haziran, 2001.
- [6] GARIP Z.S. “Deprem Etkisindeki Betonarme Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşimi” , Yüksek Lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, 2005.
- [7] ALA, N. “Adapazarı Zemininde Yapılan Betonarme Yapılarda Yapı-Zemin Etkileşimi” , Yüksek Lisans Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, 2007.
- [8] ZIENKIEWICZ, O.C. and TAYLOR, R. L “The Finite Element Method”, Mc-Graw Hill, 1991.
- [9] GRIFFITHS. D. V. “Numerical Studies of Soil Structure Interaction Using a Simple Interface Model”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, pp 158-162, 1988.

- [10] PALA, M., “Zemin Yapı Dinamik Etkileşiminin Yapay Sinir Ağları ile Analizi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004
- [11] WOLF, J.P., and SONG, C., "Dynamic Stiffness Matrix of Unbounded Soil by Finite Element Multi-Cell Cloning", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, pp. 233-250, 1994.
- [12] GÜRSOY, Ş., DURMUŞ, A. “Betonarme İstinat Duvarlarının Zemin Etkileşimini de Dikkate Alarak Çeşitli Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi., Bildiriler Kitabı, Sayfa 228-237, 21-22 Ekim, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir (2002).
- [13] ÇELEBİ, E., ve GÜNDÜZ, A.N., “Dynamic Response of Multistory Buildings Including Soil-Structure Interaction in Elastic Layered Media” ECCM’99 European Conference on Computational Mechanics August 31-September 3 München, Germany 1999.
- [14] ÖNALP, A., Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazari, Turkey, 2002.