



**Makale
(Article)**

Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi

Turan KARABÖRK

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Aksaray

Özet

17 Ağustos 1999 Marmara Depremi sonrasında bölgede yapılan incelemelerde bir çok yapıda zemin özelliklerinin kötü olmasına rağmen yapısal hasarların daha az olduğu gözlenmiştir. Yumuşak zeminlere oturan yapılar büyük düşey oturmalar yaparken yapısal hasarların az olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, zemin özelliklerinin deprem etkisindeki betonarme yapıların dinamik davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla aynı plan ve rijitliğe sahip üç, altı ve on katlı yapı modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin yumuşak ve sert olmak üzere iki farklı zemin türü için, üç farklı deprem yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Analizler Sap2000 programı yardımıyla zaman tanım alanı yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çözümleme sonucunda farklı modeller için elde edilen yer değiştirmeler, iç kuvvetler ve periyot değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: : Zemin-Yapı Etkileşimi, Zaman Tanım Alanı Yöntemi, 3 Boyutlu Dinamik Analiz

Nonlinear 3D Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Structures by Means of Soil-Structure Interaction

Abstract

Earthquakes cause time-dependent displacement motion due to dynamic effect on structures. Response of structures to these effects is based on the subgrade soil properties. Investigations after 17 August 1999 Marmara Earthquake revealed that structural damage is less than expected level on many buildings despite of their worse subgrade soil properties. In this study, the effects of soil properties on dynamic behaviors of reinforced concrete buildings under influence of earthquakes are investigated. Thus, the structure models with 3, 6, 10 stories which have the same plan and rigidity are formed. Behaviors of these models are examined for two different soils, namely soft and hard soils under the effect of three different earthquakes. Dynamic analysis is performed by using time history analyses of SAP 2000 computer program. Results from different models were compared in terms of displacements, internal forces and period responses.

Keywords: Soil-Structure Interaction, Time History Method, 3D Dynamic Analysis

1. GİRİŞ

Deprem yer kabuğunun bir titreşimi olduğu için, yapıların mesnetlerinde zamana bağlı bir yer değiştirme hareketi doğurarak dinamik bir etki oluşturur. Yapısal analizlerde genellikle temeller ankastre kabul

Bu makaleye atf yapmak için

KARABÖRK T., "Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi" *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2009, 5 (1) 25-36

How to cite this article

KARABÖRK T., "Nonlinear 3D Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Structures by Means of Soil-Structure Interaction" *Electronic Journal of Construction Technologies*, 2009, 5 (1) 25-36

edilerek çözüm yapılmakta ve temellerde yer değiştirme ve dönme olmadığı kabul edilmektedir. Gerçekte ise, temellerde çökme ve dönmeler oluşmaktadır. Yapılara etkiyen deprem gibi dinamik bir yükleme durumunda, yapı ve zemin birlikte hareket etmekte bu sırada da birbirlerinin davranışını etkilemektedirler [1-5].

Yumuşak zemin tabakaları üzerindeki yapıların deprem etkisindeki davranışları yapı-zemin etkileşimi probleminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu durumda yapı-zemin etkileşiminin önemli ölçüde dikkate alınması gerekir. Bu tür yapıların deprem hesabında, zemin ortamının şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan dinamik bir sistem olarak ele alınması gerekmektedir [6, 7].

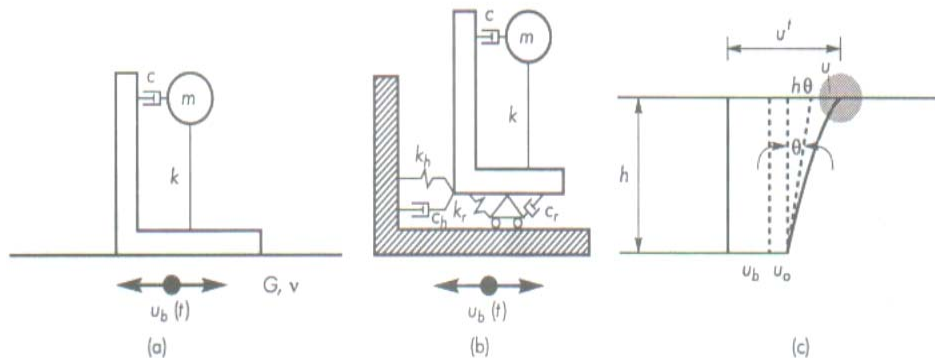
Zeminin yapıya etkisine karşılık, yapı da zemini hem kinematik hem de dinamik bakımdan etkilemektedir. Yapının var olmadığı durumlarda yalnız zeminin kendi içindeki dinamik davranışının bir sonucu olan deprem verisi, yapının varlığı sonucu daha karmaşık bir yer hareketine dönüşmektedir. Depremler sırasında alınan kayıtlar, aynı bölgedeki yapı bulunan zemin ile üstünde yapı bulunmayan zeminden elde edilen sonuçların farklı olduğunu göstermiştir [8, 9]. Bu farklılıklar depremin yapıya etkisine karşılık, yapının da zemini ve dolayısıyla deprem kaydını etkilediğini kanıtlamaktadır .

2. ZEMİN YAPI ETKİLEŞİMİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Zemin yapı etkileşiminin göz önüne alınması genellikle zaman alıcı ve pahalıdır. Öncelikle etkileşimin hesaplara katılıp katılmamasına karar verilir. Klasik yapı sistemlerinde olduğu gibi yapının zemine rijit bağlı olduğunun kabul edilmesinin sonuçlara olan etkisinin tahmin edilebilmesi gerekir. Bazı araştırmalarda [1, 2, 8, 9] zemin yapı etkileşiminin,

$$V_s / (fh) < 20 \quad (1)$$

için göz önüne alınması tavsiye edilmiş ve ancak bu durumda etkileşimin yapının davranışını önemli sayılabilecek şekilde değiştirdiği görülmüştür. Burada; V_s : Zemindeki kayma dalgası hızı, f : Yapının zemine rijit bağlı kabulü ile bulunan serbest titreşim frekansı ve h : Yapı yüksekliği olarak belirtilmiştir. Zemin- yapı etkileşiminin en önemli etkilerini ifade etmede basit bir model yeterli olacaktır. Elastik bir zemin üzerinde oturan, rijit, kütsüz, L şekilli bir temele (Şekil 1) monte edilmiş basit bir tek serbestlik dereceli sistemi göz önüne alalım. Yapı, kütlesi m , rijitliği k ve sönümlenme katsayısı c ile karakterize edilmektedir.



Şekil 1. a) Bir Elastik Zemin Üzerinde Tek Serbestlik Dereceli Sistem
b) Taban Uyumunun Kaymalı ve Dönmeli Yay ve Söndürücüler ile Gösterildiği Ayırık Sistem
c) Tabanın ve Kütlenin Hareketinin Bileşenleri

Klasik yapı sistemlerinde, temelin rijit kabul edilmesi durumunda doğal frekans,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

histerik sönüm oranı ise,

$$\xi = \frac{c\omega_0}{2k} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir.

Temel sönümleyicisi iki farklı sönüm kaynağını ifade eder. Bunlardan birincisi temel altındaki zeminin elastik olmamasından kaynaklanan malzeme sönümlemesi, ikincisi ise yapıdaki dinamik kuvvetlerin zemini deforme etmesi sırasında oluşan ve zeminden uzaklaşan türde gerilme dalgaları üreten radyasyon sönümlemesidir. Malzeme sönüm miktarı zeminde oluşan birim deformasyon düzeyine bağlı olarak değişmektedir. Yapı yer değiştirmeleri, yapı kütlelerinin toplam yer değiştirmesi u_t ve yapı tabanı yer değiştirmesi u_o^t olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u^t = u_b + u_o + h\theta + u \quad (4)$$

$$u_o^t = u_b + u_o \quad (5)$$

Zemindeki malzeme sönümlemesinin ihmal edilmesi durumunda temel tarafından zemine uygulanan yük,

$$P_x = k_x u_o + c_x \dot{u}_o \quad (6)$$

Buradaki x simgesi $\xi_g=0$ şartları için yatay yönü işaret eder. w frekansındaki harmonik uyarı için denklem aşağıdaki gibidir.

$$P_h = k_x (1 + 2\xi_x + i2\xi_g) u_o \quad (7)$$

$$P_h = k_h u_o + c_h \dot{u}_o \quad (8)$$

olduğu hatırlanırsa, yatay rijitlik ve sönümleme katsayıları,

$$k_h = k_x \quad (9)$$

$$c_h = c_x + \frac{2}{\omega} \xi_g k_x \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. 10 eşitliğinin sağ tarafındaki ilk terim radyasyon sönümlemesine ve ikincisi de malzeme sönümlemesine karşılık gelir. Sistemde yapının rijit olması ($k=\infty$) ve temelde dönmeye karşı tutulmuş olması halinde ötelenme hareketinin doğal frekansı şu şekilde olur.

$$\omega_h = \sqrt{\frac{k_h}{m}} \quad (11)$$

Aynı işlemler beşikleme titreşim modu için tekrar edilirse,

$$k_r = k_\theta \quad (12)$$

$$c_r = c_\theta + \frac{2}{\omega} \xi_g k_\theta \quad (13)$$

eşitlikleri elde edilir. Buradaki θ alt simgesi malzeme sönümlemesinin olmadığını ifade eder. Yapının rijit olması ve temelde kaymaya elverişsiz olması ($k_h=\infty$) halinde, beşikleme için doğal frekans aşağıdaki gibi olur:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{mh^2}} \quad (14)$$

Şekil 1'deki sistemle aynı tarzda tepki veren eşdeğer tek serbestlik dereceli bir sistem için harmonik hareketin denklemi aşağıdaki gibi yazılır:

$$(m\omega^2 + i\omega\omega_e + k_e)u = u\omega^2 U_b \quad (15)$$

U_b : eşdeğer sismik girdi hareketidir. Eşdeğer sistem için,

$$k_e = m\omega_e^2 \quad (16)$$

$$\xi_e = \frac{c_e\omega}{2k_e} \quad (17)$$

yazılabilir. Eşdeğer modelin doğal frekansı ω_e , eşdeğer sistem tepkisinin $\xi_e=0$ durumunda sonsuz olduğu frekanstır. Bu durum,

$$\frac{1}{\omega_e^2} = \frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\omega_h^2} + \frac{1}{\omega_r^2} \quad (18)$$

olduğunda, veya,

$$\omega_e = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + k/k_h + k_h^2/k_r}} \quad (19)$$

olduğu zaman gerçekleşir. 19 eşitliği eşdeğer sistemin doğal frekansının sabit tabanlı yapınınkinden daima küçük olduğunu ifade eder. Başka bir deyişle, zemin-yapı etkileşiminin önemli bir etkisi, zemin-yapı sisteminin doğal frekansının sabit taban şartlarında yapınınkinden daha düşük bir değere azaltılmasıdır. Zemin yapı etkileşiminin bir diğer önemli etkisi de efektif sönümleme oranının yapının kendisinininkinden daha yüksek bir değere çıkmasıdır.

4. ANALİZ YÖNTEMLERİ

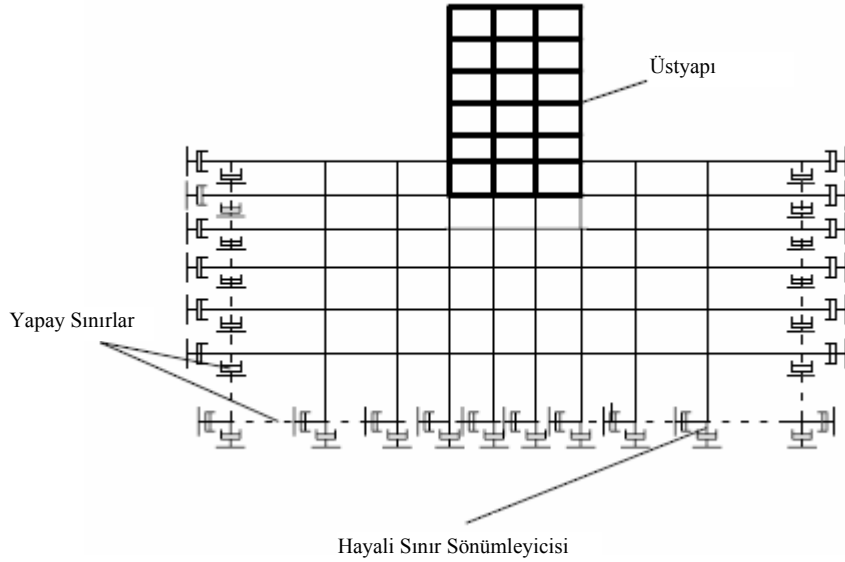
Deprem sırasında dinamik zemin yapı etkileşimi analizleri ve modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile başladı. Bir çok çözüm yolu olmasına rağmen en çok kullanılan iki belirgin yöntem öne çıktı. Doğrudan yöntem ve çok adımlı yöntem [1,2, 10-15]. Doğrudan yöntemde yapı ve altındaki zemin birlikte modellenir. Çok adımlı yöntemde ise zemin-yapı sistemi sınırsız zemin ve yapıya yakın bölgedeki doğrusal olmayan zemin olmak üzere kendi içinde iki altyapıya ayrılır[16].

Doğrudan yöntemde, zemin yapı etkileşimi problemlerinin çözümünde iyi kurulmuş bir yapı dinamiği algoritması kullanılarak zaman tanım aralığında çözüme gidilir. Fakat bu yöntemde radyasyon etkisi her adımda dikkate alınmaz. Oysa çok adımlı yöntemde bu etkiler frekans tanım aralığında dikkate alınır. Doğrudan yöntemde zemin-temel-yapı sistemi tek adımda modellenir ve analiz edilir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, açık arazi girdi hareketleri modelin tabanında ve yanlarında tanımlanır. Bu hareketten etkilenen sistemin harekete karşı gösterdiği tepki (bir sonlu eleman modeli için) aşağıdaki hareket denkleminde hesaplanır.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K^*]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_{fr}(t)\} \quad (20)$$

$\{\ddot{u}_{fr}(t)\}$: sınır düğüm noktalarında tanımlanmış açık arazi ivmeleridir.

Zemin yapı etkileşimi problemlerinde doğrudan yöntemin kullanılabilmesi için zemin ve yapının ikisinin birden davranışının eşit kuvvette ele alabilecek bir bilgisayar programı gerekmektedir.



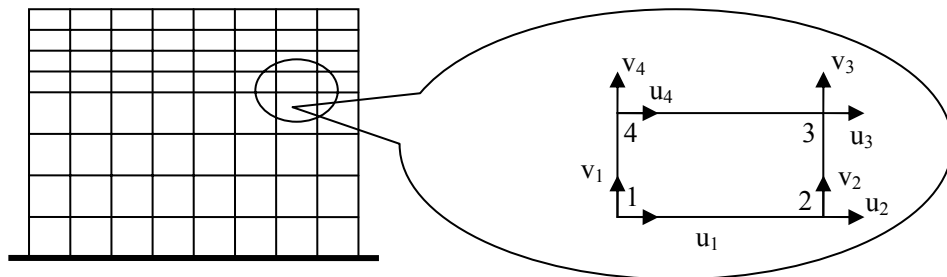
Şekil 2. Zemin Yapı Etkileşim Analizinin Doğrudan Yöntemi

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Geçmişte sonlu elemanlar yöntemi (FEM) uygulamalarında sadece yakın bölgeler dikkate alınmış, uzak bölgelerin etkisi ihmal edilmiştir. Bu yöntem statik problemler için oldukça iyi olsa da dinamik problemlerde ihmal edilen yapay sınırlardan yansıyan dalgalar sonuçların hatalı olmasına yol açmıştır. Geçmiş 30 yıl boyunca ihmal edilmiş sınırlar ötesindeki enerji yayılmasını gösterebilmek için pek çok yapay sınır modeli geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu modeller; viskoz sınır [14,17], geçişli sınır [18-19], karma modeller [20], sınır eleman [21], sınır koşulları çözümü [22-25], ölçekli sınır koşulları [26] ve sonsuz elemanlar modeli [27-29] olarak özetlenebilir. Sonlu elemanlar yöntemi; bir bütünü, sınırları düğüm noktaları ile tanımlanan, ayrı elemanlardan oluşan bir topluluk olarak ele alır ve bütünün tepkisinin düğüm noktalarının tepkisi ile tanımlanabileceğini kabul eder.

Sonlu elemanlar yönteminde söz konusu problem önce Şekil 3’de görüldüğü gibi elemanlarına ayrılır. Bir eleman içinde herhangi bir noktadaki zemin yer değiştirmesi; $\{v\} = \{u, v\}$, düğüm noktası yer değiştirmesi; $\{q\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4\}$ olmak üzere,

$$\{v\} = [N] \{q\} \quad (21)$$



Şekil 3. Zemin Parçasının Sonlu Elemanlara Ayrılması

şeklinde ifade edilir. Burada, $[N]$, şekil fonksiyonları matrisidir. Birim deformasyon-yer değiştirme matrisi $[B]$ birim deformasyonların düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerden hesaplanmasını sağlar:

$$\{\epsilon\} = [B] \{q\} \quad (22)$$

Malzeme matrisi [D] de gerilmelerle birim deformasyonları şu şekilde ilişkilendirir:

$$\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\} \quad (23)$$

Eřdeđer doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu elman modellerinin ikisinin tepkisi de sonlu elemanlara ayrılma şeklinden etkilenir. Kısa dalga boylu frekans bileşenleri geniş aralıklı dūğümlerle modellenemediğinden, özellikle seyrek ağlı sonlu eleman modellerinin kullanılması durumunda yüksek frekans bileşenleri ihmal edilir. Modelde kullanılan elemanın maksimum boyutu, analizde kullanılan en kısa dalga boyunun sekizde biri ile onda biri arasında sınırlandırılmalıdır [12]. Hesaplama kolaylığı bakımından sonlu eleman analizindeki eleman sayısı olabildiğince az tutulmaya çalışılır. Elemanların maksimum boyutları genellikle dalga yayılma hızı ve belirli bir frekans aralığı ile kontrol edildiğinden, elemanların sayısının azaltılması demek çalışılan bölgenin boyutunu küçültmek anlamına gelir. Bu bölgenin boyutu küçüldükçe de, sınır şartlarının etkisi daha büyük olur. Birçok dinamik tepki ve zemin yapı etkileşimi probleminde rijit veya anakaya gibi yaklaşık rijit sınırlar, özellikle yatay yönde problemin ele alındığı bölgeden oldukça uzakta tutulmaya çalışılır. Sınır özellikleri tanıtılmaya çalışılırken en önemli amaç iletilen deprem dalgalarının sınırlardan yansıyıp tekrar problemin ele alındığı bölgeye dönmesini önlemektir [30]. Bu sorun sonlu-sonsuz eleman modelleriyle aşılabilmektedir [31,32].

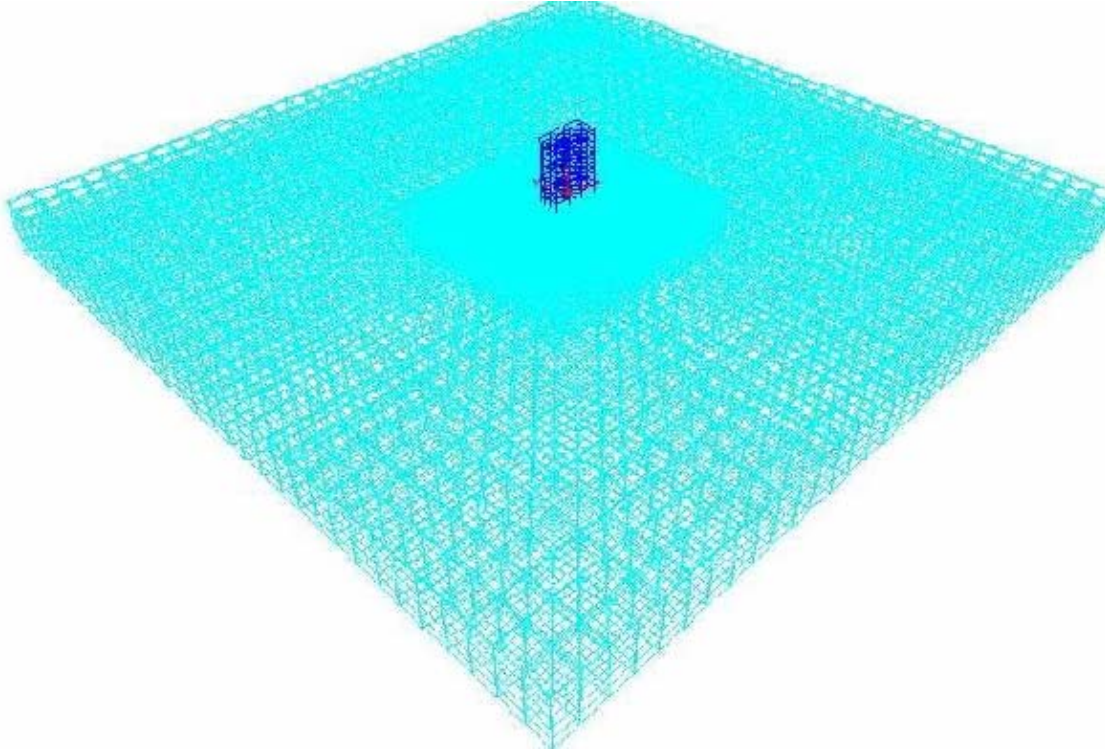
6. SAYISAL ÇALIşMA

Bu çalışmada, zemin özelliklerinin deprem yükleri altındaki çok katlı yapıların dinamik davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Sap2000 bilgisayar paket programında zemin-yapı modelleri oluşturulmuştur. 3, 6 ve 10 katlı olmak üzere üç farklı yapı modelinin, sert ve yumuşak olarak iki farklı zemin modeli ve üç farklı deprem etkisi için analizleri yapılmıştır. Zemin üç boyutlu katı eleman olarak modellenmiş ve katı elemana zemini temsil edebilecek iki farklı zemin türü için o zeminlere ait farklı karakteristikler yüklenmiştir. Tablo 1’de zemin özellikleri görülmektedir. Sert ve yumuşak zemin olarak tarif edilen zeminler için bu değerler, gerçek zemin özelliklerine uygun olarak alınmıştır [7].

Tablo 1. Zemin Özellikleri

Zemin Türü	Elastisite Modülü (KN/m ²)	Sönüm Oranı	Kesme Modülü (KN/m ²)	Poisson Oranı	Birim Hacim Ağırlık(KN/m ³)
Sert	400000	0,01	166666,67	0,2	28
Yumuşak	20000	0,30	7142,85	0,4	25

Zemini temsil eden katı eleman büyüklüğü, yatayda X ve Y yönünde, yapının o doğrultularındaki boyutunun yaklaşık 8-10 katı arasında alınmıştır. Seçilen zemin modelinin büyüklüğü arttıkça gerçek davranışa yaklaşılmaktadır. Z yönündeki derinliğı ise 25m olarak seçilmiştir. şekil 4’de sonlu eleman ağı görülmektedir. Yapı tabanı ve çevresinde daha sık iken yapıdan uzaklaştıkça ađ aralıkları da genişletilmiştir. Küçük katı elemanlardan oluşan zemin modelinin tabanında, her noktaya ankastre bağlantılar atanmıştır. Böylece gerçek zeminin tabanda anakayaya olan rijit bağlantısı sağlanmıştır. Dış kenarlarda ise tutulu sınırlar oluşturularak kenarlara ulaşan deprem dalgalarının tekrar zemin ortamına dönmesi engellenmiştir. Yapı modelleri ise 3, 6 ve 10 katlı olarak düzenlenmiştir.

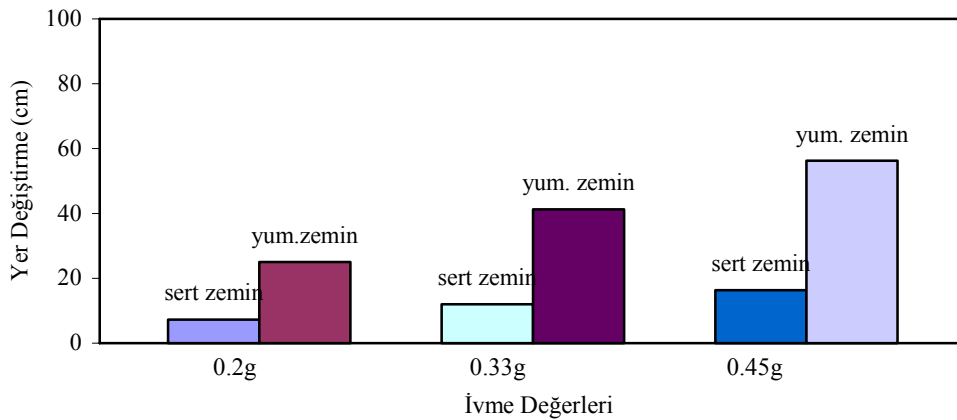


Şekil 4. Oluşturulan Zemin-Yapı Modeli

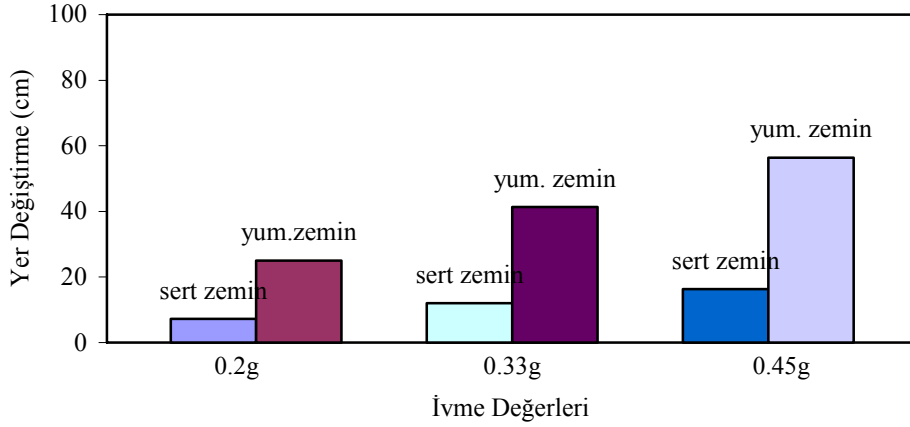
Sap 2000 paket programında, zaman-tanım alanında yapılan analizlerde 1999 Marmara Depreminin Yarımca-Petkim' den alınan 0.33g şiddetindeki maksimum ivme kayıtlarının Kuzey-Güney ve Doğu-Batı bileşenleri kullanılmıştır. Z yönündeki düşey bileşen için ise Kuzey-Güney bileşeninin 0.07 katı alınmıştır [33]. Bu ivme değerleri 0.20g ve 0.45g ile ölçeklendirilerek analizler düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç farklı deprem etkisi için yapılmıştır. Analizlerde 135 sn olan deprem süresinin tamamı dikkate alınıp, çözümleme 0.1 saniye aralıklarla toplam 1350 adımda tanımlanmıştır.

7. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

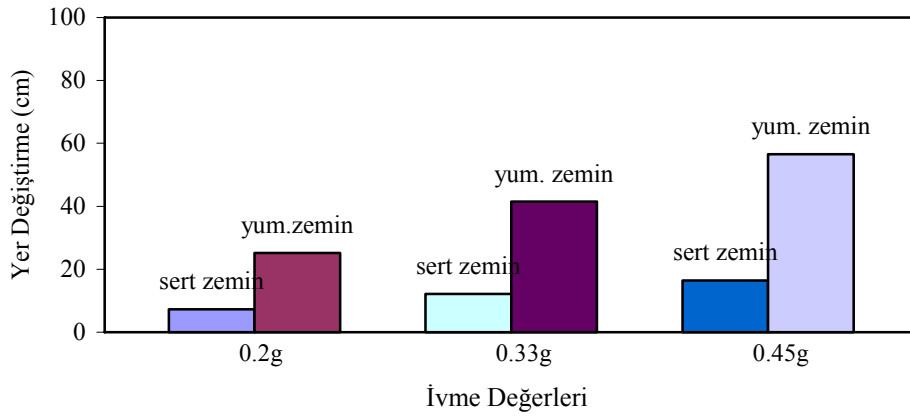
Şekil 5, 6 ve 7 de sırasıyla 3, 6, ve 10 katlı yapı modelleri için farklı şiddetteki deprem etkileri altında, yapı modellerinin sert ve yumuşak zemin üzerine oturması hallerinde temel seviyesinde oluşan X yönündeki taban yer değiştirmelerinin karşılaştırılması görülmektedir. Yapı modellerinin yumuşak zemine oturması halinde meydana gelen temel seviyesindeki yer değiştirmeler sert zemine oturması haline oranla belirgin derecede artış göstermektedir.



Şekil 5. 3 Katlı Yapı Modeline ait Taban Yer Değiştirmeleri

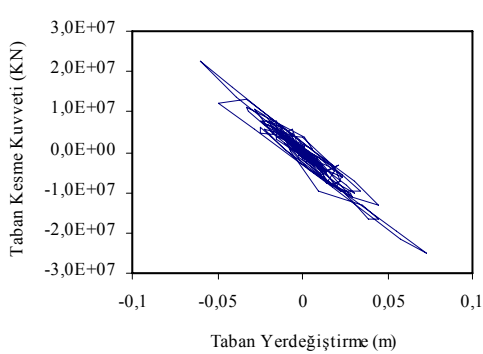


Şekil 6. 6 Katlı Yapı Modeline ait Taban Yer Değiştirmeleri

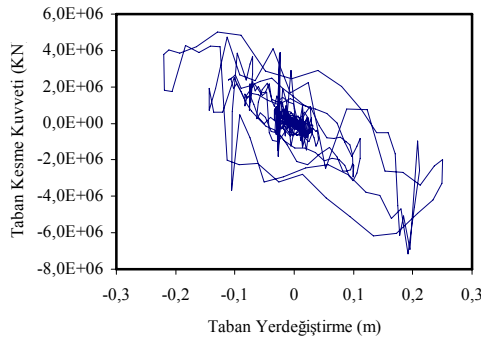


Şekil 7. 10 Katlı Yapı Modeline ait Taban Yer Değiştirmeleri

Yumuşak zeminlerde oluşan yatay deplasmanların büyük olmasına bağlı olarak, zemin temel seviyesinde doğal bir sönümleyici gibi davranmaktadır. Şekil 8.a ve 8.b'de sert ve yumuşak zemine ait histerik (tekrarlı yükleme) eğriler görölmektedir. Bu eğrilerin içinde kalan alan temel seviyesindeki sönümü ifade etmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yumuşak zeminlerde grafik alanı, yani temel seviyesindeki sönüm miktarı sert zeminlere oranla daha fazladır. Bunun sonucu olarak yumuşak zemin üzerine inşa edilen yapılarda deprem enerjisinin büyük bir kısmı temel seviyesinde sönümlenmekte üst yapıya iletilen deprem ivmeleri daha düşük değerlerde kalmaktadır.



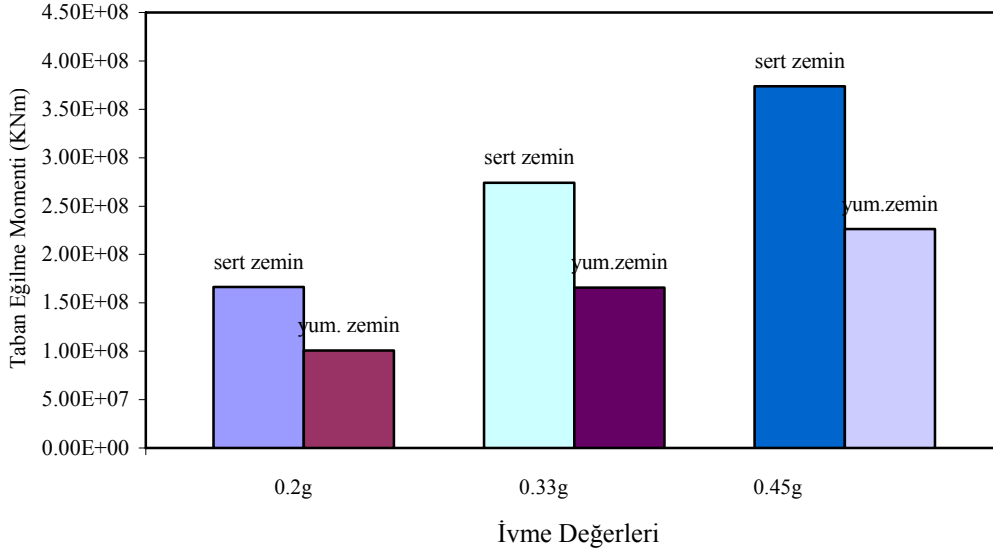
(a)



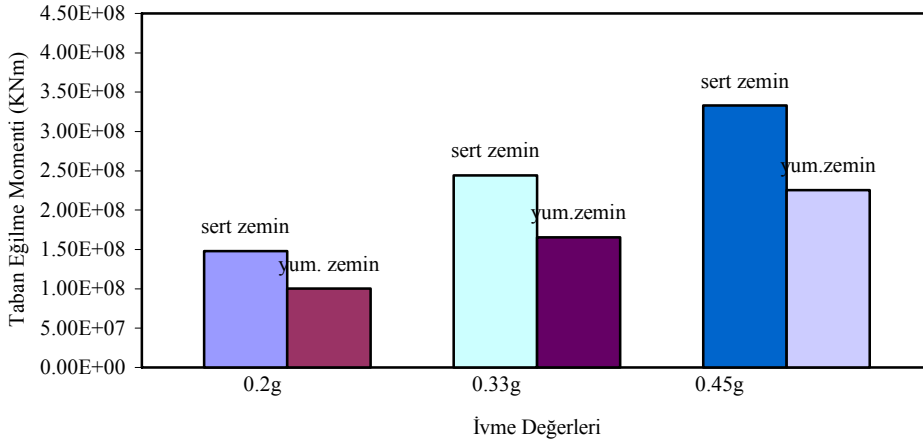
(b)

Şekil 8. 3 Katlı Yapı Modeli İçin Sert (a) ve Yumuşak Zemin (b) Modellerine ait Histerik Eğriler

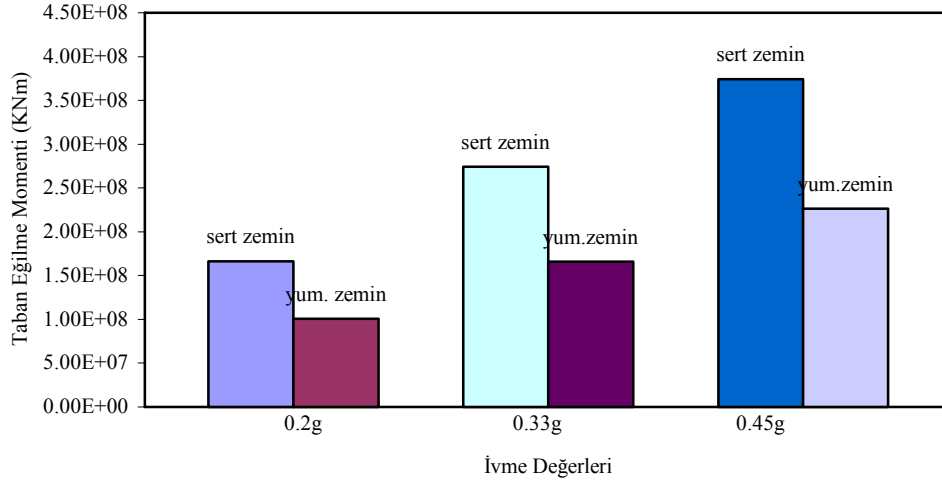
Şekil 9, 10 ve 11’de sırasıyla 3, 6, ve 10 katlı yapı modelleri için farklı şiddetteki deprem etkileri altında, yapı modellerinin sert ve yumuşak zemin üzerine oturması halinde oluşan X yönündeki taban eğilme momentlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi değişik yükseklikteki yapılarda ve değişik deprem ivmelerinde sert zemine oturan yapı modellerinde moment değerleri yumuşak zemine oturan yapı modellerine oranla oldukça yüksektir. Deprem şiddeti arttıkça sert ve yumuşak zeminlere ait modellerde oluşan moment değerleri arasındaki farkta artmaktadır. Aynı sonuçlar kesme kuvveti değerlerinde de gözlenmektedir. Periyot değerinin değişimi Şekil 12’de görülmektedir. Yumuşak zemin üzerine oturan yapı modellerindeki periyot değerleri sert zemine oturan modellere oranla daha yüksek çıkmaktadır.



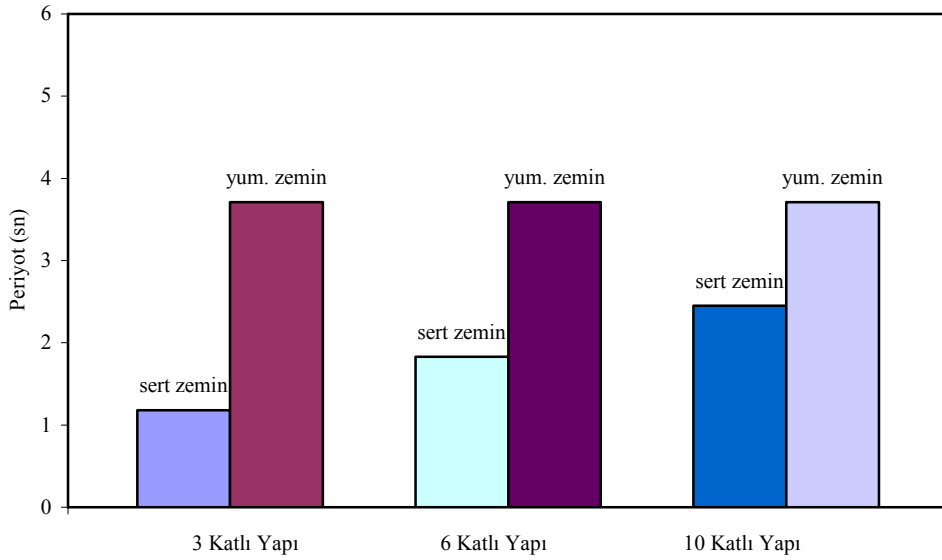
Şekil 9. 3 Katlı Yapı Modeline ait Taban Eğilme Momentleri



Şekil 10. 6 Katlı Yapı Modeline ait Taban Eğilme Momentleri



Şekil 11. 10 Katlı Yapı Modeline ait Taban Eğilme Momentleri



Şekil 12. Değişik Yüksekliklerdeki Yapı Modellerine ait Periyot Değerleri

8. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalar sonunda sert ve yumuşak zemine oturan aynı plan ve rijitlikteki yapı modellerinde sabit deprem etkisi altında farklı yer değiştirmeler ve farklı kesit tesirleri meydana geldiği gözlenmiştir. Yumuşak zemin üzerine oturan yapı modellerinde sert zemin üzerine oturan yapı modellerine göre, taban eğilme momenti değerleri X yönünde %40, Y yönünde % 32 oranında, taban kesme kuvveti değerleri ise X yönünde %77 Y yönünde %61 oranında azalma göstermiştir. Buna karşılık temel seviyesinde oluşan yatay yer değiştirme değerleri X yönünde %71, Y yönünde %78 oranında artış göstermiştir. Periyot değerlerindeki değişim ise sert zemin üzerine oturan yapılarda yumuşak zemin üzerine oturan yapılara oranla; 3 katlı yapı modellerinde %68, 6 katlı yapı modellerinde %50 ve 10 katlı yapı modellerinde %33 oranında azalma şeklindedir. İncelenen en önemli kriterlerden biride temel ile en üst kat arasındaki görelî yer değiştirme değerleridir. Bu değer yapının yanal rijitliğinde bir ifadesi olduğundan yapısal hasar oluşması konusunda en önemli parametreyi oluşturmaktadır. Sert zemin üzerine oturan yapı modellerinde yumuşak zemin üzerine oturan yapı modellerine oranla daha yüksek görelî yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu ise sert zemin üzerine oturan yapı sistemlerinde daha fazla yapısal hasar meydana geleceğini ifade etmektedir.

Yumuşak olarak nitelendirdiğimiz taşıma gücü daha düşük olan zeminler deprem sırasında doğal bir sönümleyici gibi davranarak daha fazla enerji yutabilmektedir. Dolayısıyla üst yapıya iletilen deprem ivmeleride daha düşük değerlerde kalmaktadır. Bunun sonucu olarak bu tür zeminler üzerindeki yapılarda daha az yapısal hasar meydana gelmektedir. Ancak burada söz edilen yapısal hasar can kaybına neden olan hasarlardır. Kesinlikle yumuşak zeminlerin daha iyi olduğu, bu tür zeminler üzerinde yapı inşa etmenin daha doğru olduğu sonucunu doğurmamaktadır. Yumuşak zemin üzerine oturan yapı sistemlerinde çok yüksek yer değiştirmelere bağlı olarak yapılarda batma veya yan yatma gibi davranışlar görülebilmektedir. Bu nedenle bu tür yapılarda deprem sonrasında tamamen tehlikeli ve kullanılamaz durumda kalmaktadır.

9. KAYNAKLAR

1. Wolf, J. P.,1985, “Dynamic Soil –Structure Interaction”, Prentice-Hall,Englewood Cliffs, NJ.
2. Wolf, J. P.,1988, ”Soil –Structure Interaction Analysis in Time Domain”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
3. Aydınoğlu, M. N.,1981, “ÜstYapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi,İstanbul.
4. Mihailo, D. T., Maria, I. T.,Tzong-Yin, H., 2001, “Full-Scale Experimental Studies of Soil-Structure Interaction”, In: Proceedings of The 2nd US-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction, Tsukuba City, Japan.
5. John, P. W., Chongmin, S., 2002, “Some Cornerstones Of Dynamic Soil-Structure Interaction”,Engineering Structure,Vol.24,s.13-28.
6. Koçak, S., Mengi, Y., 2000, “A Simple Soil-Structure Interaction Model”,Applied Mathematical Modelling, Vol.24,s.607-635.
7. Karabörk, T., Doğuş, S., 2005, “Zemin Özelliklerinin Çok Katlı Yapıların Dinamik Davranışı Üzerine Etkisi”, Kocaeli Deprem Sempozyumu,Kocaeli.
8. Kramer, S. L., 2003. “Geoteknik Deprem Mühendisliği”, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,Fersa Matbaacılık,Ankara,s.321-334.
9. Celep, Z., Kumbasar, N., 1993, “Deprem Mühendisliğine Giriş”, İstanbul Teknik Üniversitesi,Sema Matbaacılık,İstanbul, s.40-48.
10. Wolf, J. P., Oberhuber, P., 1985, “Non-Linear Soil-Structure Interaction Analysis Using Dynamic Stiffness or Flexibility of Soil in the Time Domain”,Earthquake Engineering and Structural Dynamics,Vol.13,s.195-212.
11. Parmelee, R. A., 1967, “Building-Foundation Interaction Effects”,Journal of Engineering Mechanics Division, Vol.93,s.131-152.
12. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. L., 1969, “Finite Dynamic Model or Infinite Media”, Journal of Engineering Mechanics Division,Vol. 95,s.859-877.
13. Veletos, A. S., Meek, J. V., 1974, “Dynamics Behaviour of Building-Foundation Systems”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics,Vol.3,s.121-138.
14. Lysmer, J.,Udaka, T., Tsai, C., Seed, H. B., 1975, “FLUSH : A computer Program for Approximate 3D Dynamic Analysis of Soil–Structure Problems”,Report of Earthquake Engineering Research Center,University of California,Berkeley, Report No. EERC75-30.
15. Gutierrez, J. A., 1976, “Substructure Method for Earthquake Analysis of Soil–Structure Interaction”, Report of Earthquake Engineering Research Center,University of California,Berkeley,Report No. EERC76-9.

16. Wegner, J. L., Yao, M. M., Zhang, X., 2005, "Dynamic Wave-Soil-Structure Interaction Analysis in the Time Domain", *Computers and Structures*, Vol.83,s.22106-2214.
17. White, W., Valliapan, S., Lee, I. K., 1969, "Unified Boundary for Dynamic Model", *J. Engineering Mech. Div. ASCE*, Vol.103,s.160-74.
18. Werkle, H., 1986, "Dynamic Finite Element Analysis of Three Dimensional Soil Models with Transmitting Element", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.14,s.41-60
19. Tassoulas, J. L., 1983, "Elements For Numerical Analaysis of Wave Motion in Layered Media", *Internat J. Numer. Methods Eng.*, Vol.19,s.1005-32.
20. Tzong, T. J., Penzien, J., 1983, "Hybrid Modelling of Soil-Structure Interaction in Layered Media", *Report of Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, Report No. EERC-83/22.
21. Chen, C. H., Penzien, J., 1986, "Dynamic Modelling of Axisymmetric Foundation", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.14,s.823-40.
22. Luco, J. E., 1974, "Impedance Function for a Rigid Foundation on Layered Medium", *Nuclear Eng.*, Vol.31,s.207-17.
23. Wong, H. L., Luco, J.E., 1976, "Dynamic Response of Rigit Foundation of Arbitrary Shape", *Earthquake Eng. Struct. Dyn*, Vol.4,s.579-87.
24. Wong, H. L., Luco, J.E., 1985, "Tables of Impedance Function for Square Foundation on Layered Media", *Soil Dynamic Earthquake Eng.*, Vol.4,s.64-81.
25. Liou, G. S., 1989, "Analytical Solutions for Soil-Structure Interaction in Layered Media", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.18,s.667-86.
26. Song, C. M., Wolf, J. P., 1998, "The Scaled Boundary Finite-Element Method: Analytical Solution in Frequency Domain", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.164,s.249-64.
27. Bettles, P., 1977, "Infinite Element", *Internat J. Numer. Methods Eng.*, Vol.11,s.54-64.
28. Medina, F., Taylor, R. L., 1983, "Finite Element Techniques for Problems of Unbounded Domains", *Internat J. Numer. Methods Eng.*, Vol.19,s.1209-26.
29. Choi, J. S., Yun, C. B., Kim, J. M., 2001, "Earthquake Response Analysis of the Hualien Soil-Structure Interaction System on Based Updated Soil Properties Using Forced Vibration Test Data", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.30,s.1-26.
30. Yerli, H. R., Kaçın, S., Koçak, S., 2003, "A Paralel Finite-Infinite Element Model for Two-Dimensional Soil-Structure Interction Problems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.23,s.249-253.
31. Yerli, H. R., Temel B., Kiral, E., 1999, "Multi-Wave Transient And Harmonic İnfinite Elements For Two-Dimensional Unbounded Domain Problems", *Computers and Geotechnics*, Vol. 24,s. 185-206.
32. Yerli, H. R., Temel B., Kiral, E., 1998, "Transient İnfinite Elements For 2D Soil-Structure Interaction Analysis", *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124,s. 976-988.
33. Karabörk, T., 2001, "Titreşim Kontrol Sistemleri ve Yüksek Sönümlü Kauçuk Yatak Uygulamaları", *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi*.