



## Temeli izole edilen yapılarda dinamik yapı-zemin etkileşimi

**Turan KARABÖRK<sup>1</sup>, İbrahim Ö. DENEME<sup>1</sup>, R. Pelin BİLGEHAN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray

<sup>2</sup>Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Aksaray

### **Anahtar Kelimeler**

Temel izolasyon sistemleri,  
Yapı-zemin etkileşimi,  
1999 Marmara Depremi,  
Zaman-tanım aralığı yöntemi.

### **ÖZET**

Bu çalışmada, yumuşak zemin üzerinde bulunan ve temeli yüksek sönümlü kauçuk izolatör (HDRB) kullanılarak izole edilmiş çok katlı yapıların yapı-zemin etkileşimi etkisindeki dinamik davranışları araştırılmıştır. Dinamik yük olarak Marmara depreminin Yarımca-Petkim istasyonundan alınan kuzey-güney ivme kayıtlarının kullanılmıştır. SAP2000 paket programı ile yapılan analizlerde üst yapı ve zemin doğrusal olarak, HDRB ise doğrusal olmayan malzeme olarak modellenmiştir. Analizler sonucunda yapı-zemin etkileşimi dikkate alınan temeli izole edilmiş ve izolasyonsuz yapı modelleri için periyot, kat ivme değerleri, görelî yapı yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri, ve bir eleman için eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri karşılaştırılmıştır. Temeli izole edilmiş betonarme yapıların deprem yükleri altında klasik yapılar göre üstünlükleri ortaya konulmuştur.

## Dynamic soil structure interaction analysis for base isolated structures

### **ABSTRACT**

The motional behavior of multi-storey structures with base isolation systems which were built on soft soil were analyzed via high damping rubber bearing (HDRB) in terms of their dynamic behavior in the present study. N-S component of Yarımca station of Marmara earthquake was simulated during the ground motion analyses. Superstructure and soil were modeled linearly and HDRB as non-linearly by using SAP 2000 package program. Analysis of structure-soil interaction for both with and without base isolated structures were carried out for the following parameters; periods, storey accelerations, relative displacements, base shear forces, a selected frame element axial forces, shear forces and bending moments. As a result, advantages of isolated reinforced concrete structures are shown against fixed-base structures under earthquake loading.

### **Keywords**

Base isolation system,  
Soil-structure interaction,  
1999 Marmara earthquake,  
Time history analysis method.

\* Sorumlu yazar (Corresponding author) e-posta: [turankarabork@gmail.com](mailto:turankarabork@gmail.com)

**1. GİRİŞ**

Son yıllarda, deprem tehlikesinin daha iyi anlaşılması olması, yapı dinamiğini inşaat mühendisliğinin en önemli konularından biri haline getirmiştir. Bununla birlikte bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler dinamik analizler için gerekli olan karmaşık hesapların kısa sürede yapılabilmesini mümkün hale getirmiştir. Yapı sistemlerinin analizi yapılırken genellikle yapı ile zemin arasındaki etkileşim göz önüne alınmadan, depremin belirli bir mesnet hareketi olduğu kabul edilerek sadece yapı sistemleri incelenmektedir.

Deprem mühendisliği açısından, yapı ile zemin arasındaki etkileşim önemli bir konuyu teşkil etmektedir. Yeraltında meydana gelen depremler veya patlamalar gibi olaylardan dolayı yeryüzündeki yapılarda oldukça önemli etkiler oluşmaktadır. Sonsuz ortamın dışından veya içinden etkimekte olan dinamik yüklere ve sismik dalgalara karşı, yapıların emniyetli bir şekilde tasarlanmaları gerekmektedir.

Yapılardaki deprem zararlarının çevresel ve ekonomik etkilerini en aza indirmek mühendisler için önemli bir görev olmuştur. Sismik kuvvet iletimi azaltmak için üstyapı ve altyapı arasına yerleştirilen sismik izolasyon sistemlerinin kullanımı depreme dayanıklı tasarımında popüler bir yöntem olarak görülmektedir. Sismik izolatörlerin serbest titreşim periyodunu artırması ve enerji absorbe etme özellikleri sayesinde yapılara etkileyen deprem kuvvetlerinin etkisi azalmaktadır. Sismik izolasyon sistemleri kullanıldığında izolasyon sistemlerinin yatay rijitliğinin düşük olması sebebiyle yapı serbest titreşim frekansı, ankastre mesnetli yapıların serbest titreşim ve baskın deprem frekanslarına göre daha büyük değerlere kaydırılmaktadır. Ayrıca enerji absorbe etme özelliği ile üst yapıya iletilen ivmenin azaltılması sağlanmaktadır.

Sonsuza uzanan bölgelerin modellenmesi dinamik yapı-zemin etkileşimi ve dalga yayılımı problemlerinde önemli bir konudur. Yapı-zemin etkileşimi problemleri zemin içerisindeki dalga yayılmalarından oluştuğu için sonsuza uzanan ortamın, belirli bir kısmının göz önüne alınmasıyla, zemin için yapay bir sınır belirlenerek sonsuza uzanan zemin sonlu bir bölge gibi modellenmektedir. Bu da zemin içerisinde yayılan dalgaların sonlu bölgede hapsedilmesine neden olmaktadır. Bu davranış, gerçek dalga hareketini idealize etmediği için, gerçekçi olmayan sonuçlar elde edilmektedir. Yapı-zemin etkileşimi problemlerinin analizinde sonlu eleman modeli [1,2] ve sınır eleman modeli

[3,4] en sık kullanılan sayısal yöntemlerdir. Yapı-zemin etkileşimi problemleri incelenirken sonsuza uzanan zemin iki bölgeye (yakın ve uzak bölge) ayrılmaktadır. Yapıya yakın bölge sonlu elemanlar ile kolayca modellenmektedir. Ancak, uzak bölge için kullanılan sonlu elemanlara uygun, kesilmiş sınırlar için özel yapay sınır şartları veya özel etkileşim elemanları kullanılabilir. Yakın bölgenin sınırlarına uygulanan model, dalga yayılma şartlarını sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Yapı-zemin etkileşimi problemlerinde bu şartları sağlayan farklı modeller uygulanmaktadır. Zemin için seçilen sonlu bölgenin sınırlarında geçiren yapay sınırlar kullanılmaktadır [5, 6]. Yakın bölge için sonlu elemanlar yöntemi, uzak bölge için sınır eleman yöntemi kullanılmaktadır [7, 8]. Yapı-zemin etkileşimi problemleri çözümünde kullanılan diğer bir yöntem ise yakın bölge sonlu elemanlar, uzak bölge ise sonsuz elemanlarla modellenmesidir [9–11].

Literatüre bakıldığında temeli izole edilmiş yapılarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, Constantinou ve Kneifati [12] çalışmalarında temeli izole edilmiş yapılarda yapı-zemin etkileşiminin göz önüne alınması durumunda yapının dinamik özelliklerini incelemişlerdir. Tsai ve ark. [13] çalışmalarında zeminde oluşan yerdeğiştirmeler (kompleyans) ve sönümün tabanı izole edilmiş yapıların analizinde dikkate alınması gerektiğini önermişlerdir. FPS kullanarak izole edilen yapıların sayısal analizinin yapıldığı çalışmada yapı-zemin analizinde daha büyük yer değiştirmelerin ve yapının bazı bölümlerinde daha büyük kesme kuvvetlerinin çıktığını belirtmektedirler. Spyarakos ve ark. [14] çalışmalarında yapı-zemin etkileşimi etkisindeki tabanı izole edilmiş yapıların davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada frekansın zemin rijitliğinden ve sönümleme sabitlerinden bağımsız olduğu varsayarak hareket denklemleri frekans uzayında formüle edilmiştir. Tian ve Li [15] çalışmalarında tünel patlaması ile meydana gelen zemin sarsıntılarında çok katlı yapıların sürgülü taban izolasyon sistemi kullanılan ve kullanılmayan durumlarda dinamik davranışlarını incelemişlerdir.

**1.1. Çalışmanın Amacı**

Klasik çözüm yöntemlerinde yapının rijit bir temel üzerine oturduğu ve depremin belirli bir mesnet hareketi olduğu kabul edilir. Fakat ağır ve rijit yapıların analizinde zeminin yapıya olan etkisinin mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir. Bu

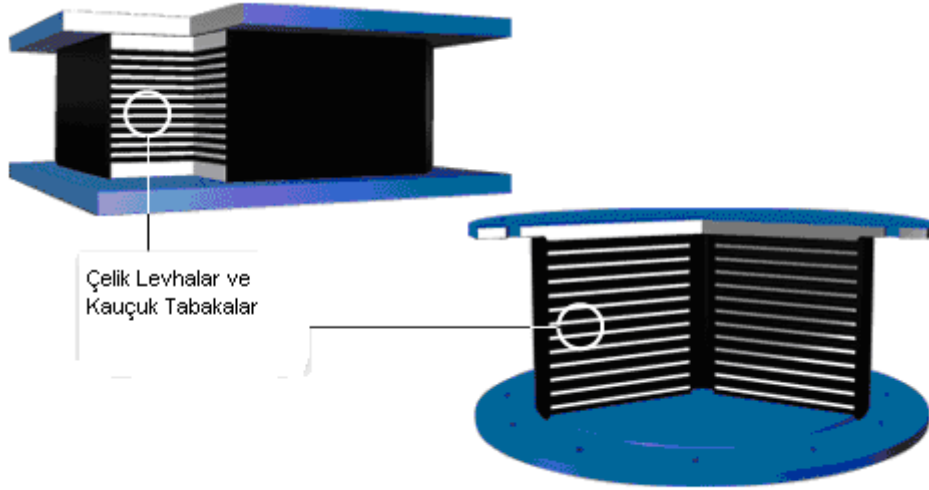
amaçla yumuşak zemin üzerinde bulunan ve temeli HDRB kullanılarak izole edilmiş çok katlı yapıların yapı-zemin etkileşimi etkisindeki dinamik davranışları araştırılmıştır. İzolasyon sistemi kullanılarak oluşturulan modellerde deprem etkisinin ankastre mesnetli modellere göre değişimi incelenmiştir. İzolasyon sistemlerinin kullanılmasıyla yapı-zemin etkileşiminden dolayı ortaya çıkacak olan etkilerin azaltılabileceği incelenmiştir. Oluşturulan modellerin SAP2000 paket programı ile yapılan analizlerinde üst yapı ve zemin doğrusal, HDRB ise doğrusal olmayan malzeme olarak modellenmiştir.

## 2. TEMEL İZOLASYON SİSTEMİ

### 2.1. Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörler (HDRB)

1982 yılında “Malezya Kauçuk Üreticileri Araştırma Birliği” tarafından doğal kauçuk izolatörlerin sönüm özelliği artırılarak yeni bir malzeme geliştirilmiştir. Doğal kauçuk izolatörlere, rafine edilmiş karbon bloklar ve reçine gibi maddeler ilave edilerek sönüm artışı sağlanmıştır. Yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin sönüm oranı %100 olduğu zaman şekil değiştirme %10-%20 arasında olmaktadır. %20’den daha çok kesme şekil değiştirmesi için malzeme doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Böylece, düşük büyüklükteki deprem etkileri veya rüzgâr

etkilerine karşı yüksek rijitlik ve sönüm özelliği göstermektedir. Büyük şekil değiştirmelerinde ise kauçuk kristalleşme özelliği gösterdiği için enerji yutuşu artmaktadır. Yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerdeki sönüm viskoz sönüm ve histerik sönüm arasında bir davranış göstermektedir [16,17] Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler sahip oldukları düşük yatay rijitlik sayesinde katmanlı kauçuk izolatörlerde olduğu gibi yanıl hareket yaparak yapı sisteminin periyodunu uzatır. Aynı zamanda sahip oldukları sönüm özelliği sayesinde bir sönümleyici gibi çalışarak deprem enerjisini absorbe ederler. Kauçuk düşük kayma modülüne sahiptir. Bu nedenle içerisine çelik plakalar yerleştirilerek kauçuğun burulma serbestliği azaltılır ve bu plakalar ile kayma rijitliği bir miktar artar. Birkaç mm kalınlığında rulo biçiminde üretilen kauçuk, daire şeklinde kesilir ve aralarına birkaç mm kalınlığında çelik levhalar konulur. Çelik levhaların kauçuğa iyi yapışması için metal yüzeyler parlatılır ve yapıştırıcı sürülür. İstenilen sayıda lastik ve levhalar arda ardına ağır bir çelik kalıba konulduktan sonra, en alt ve en üst tabaka lastik olmak üzere 135°C’ de 14 saat bekletilerek kauçuk-çelik kompozit izolatör üretilir [18]. Bu şekilde elde edilen kauçuk-çelik kompozit izolatör aşağıdaki Şekil-1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler

Çelik plakalar yüksek sönümlü kauçuk yatağın düşey yük taşıma kapasitesini artırır, sonuçta düşey rijitlik yatay rijitlikten daha büyük olur. Yatay rijitlik kauçuk levhaların sayısına ve kalınlığına bağlıdır. Her bir değerdeki artış rijitliği azaltır. Yüksekliğin artmasıyla burkulma meydana gelebilir. Bu yüzden yükseklik sınırlı tutulur [19–21].

### 2.2. HDRB için Temel Hareket Denklemleri

Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler doğrusal olmayan davranış gösterirler, üst yapı davranışı ise elastiktir. Çok katlı yapılar için temel hareket denklemleri 2 serbestlik dereceli yapı kabulü ile çıkarılmıştır. Klasik bir yapının temel hareket denklemi [22] de gösterilmiştir,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (1)$$

Burada,  $\mathbf{u}$  görelî yerdeğiştirme,  $\mathbf{M}$  üstyapı kütlesi,  $\mathbf{C}$  üstyapı sönüm matrisi,  $\mathbf{K}$  üstyapı rijitlik matrisi,  $\ddot{\mathbf{u}}_g$  zemin ivmesi ve  $\mathbf{r}$  etki matrisidir. Bu doğrusal denklem temel izolasyon sistemi ile birleştirilirse,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}\mathbf{v} = -\mathbf{M}\mathbf{r}(\ddot{\mathbf{u}}_g + \ddot{\mathbf{v}}_b) \quad (2)$$

elde edilir. Temel kütlesi ve izolasyon sistemi beraber yazılırsa,

$$\mathbf{r}^T \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{r}\ddot{\mathbf{v}}_b + \mathbf{r}\ddot{\mathbf{u}}_g) + m_b(\ddot{\mathbf{v}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g) + c_b \dot{\mathbf{v}}_b + k_b \mathbf{v}_b = 0 \quad (3)$$

İfadesi elde edilir. Burada  $m_b$  temel kütlesi,  $k_b$  temel rijitliği,  $c_b$  temel sönümü,  $\mathbf{v}$  temel kütesinin görelî yerdeğiştirmesi ve  $\mathbf{v}_b$  temel kütesinin zemine göre

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} m + m_b & \mathbf{r}^T \mathbf{M} \\ \mathbf{M}\mathbf{r} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}^* = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_b \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3. DİNAMİK YAPI-ZEMİN ETKİLEŐİŐİMİ

Yapı-zemin etkileşimi problemlerinin çözümünde, doğrudan yöntem (direct method) ve alt yapıya ayırma yöntemi (substructure method) olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Alt yapıya ayırma yönteminde, önce yapı ile sonsuza uzanan zemin arasındaki empedans ilişkisi kullanılarak etkileşim kuvvetleri bulunmakta ve sonlu bir boyuta sahip yapının analizi, belirlenen etkileşim kuvvetleri göz önüne alınarak gerçeleştirilmektedir.

Bir dinamik yükün etki ettiği bir sistemde, sistemin hareketine neden olan parametreler sönüm oranı ( $\mathbf{C}$ ) ve rijitliktir ( $\mathbf{K}$ ). Bu nedenle yapı-zemin etkileőiminin incelendiği durumlarda zeminin elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlığı ve kayma dalgası hızı gibi özellikleri ile birlikte sönüm oranı ve rijitlik değerlerinin de belirlenerek modellemede kullanılması gerekmektedir. Analizlerde kullanılacak model sečilirken bu parametrelerin matematiksel model içinde yer almaları önemlidir. Yapılan çalışmalarda sınırsız bir ortam olarak kabul edilen zemin basit modellerle idealleştirilmeye çalışılmıştır. Yapı-zemin ortak sisteminde dinamik özelliklerin analitik yöntemlerle belirlenmesi kolay değildir. Bu özellikler sayısal yöntemlerle incelenebilir [23].

Yapı sistemlerinin analizi yapılırken genellikle yapı ile zemin arasındaki etkileşim göz önüne alınmadan, sadece yapı sistemleri incelenmektedir. Yapıların dinamik analizi için geliştirilmiş genel amaçlı

görelî yerdeğiştirmesidir. Denklem (3) yeniden düzenlenirse,

$$\mathbf{r}^T \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{v}} + (m + m_b)\ddot{\mathbf{v}}_b + c_b \dot{\mathbf{v}}_b + k_b \mathbf{v}_b) = -(m + m_b)\ddot{\mathbf{u}}_g \quad (4)$$

olacaktır. Burada,  $m + m_b$  izolasyon sisteminin toplam kütesidir. Bu denklemler matris formunda düzenlenirse,

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{v}}^* + \mathbf{K}^* \mathbf{v}^* = -\mathbf{M}^* \mathbf{r}^* \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (5)$$

olur. Burada,

bilgisayar programları bulunmakla birlikte, bu tip programlarda yapının rijit bir temel üzerine oturduğu ve depremin belirli bir mesnet hareketi olduğu kabul edilerek çözüme gidilmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, ağır ve rijit yapıların dinamik analizlerinde bu kabul geçerliliğini yitirmektedir. Dolayısıyla bu tip yapıların analizlerinde, zeminin mevcudiyetinin yapıya olan etkisinin mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir. Yapı-zemin etkileşiminin göz önüne alınması genellikle zaman alıcı ve zordur. Öncelikle etkileőimin 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 [24–26] yapı-zemin etkileşiminin,

$$\frac{V_s}{(fh)} < 20 \quad (7)$$

için göz önüne alınması tavsiye edilmiş ve ancak bu durumda etkileőimin 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.

#### 3.1. Analiz Yöntemleri

Yapı-zemin etkileşimi problemleri incelenirken sonsuza uzanan zemin iki bölgeye (yakın ve uzak bölge) ayrılmaktadır. Yapıya yakın bölge sonlu elemanlar ile kolayca modellenmektedir. Ancak, uzak

*Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 26(1): 77-87 (2010)*

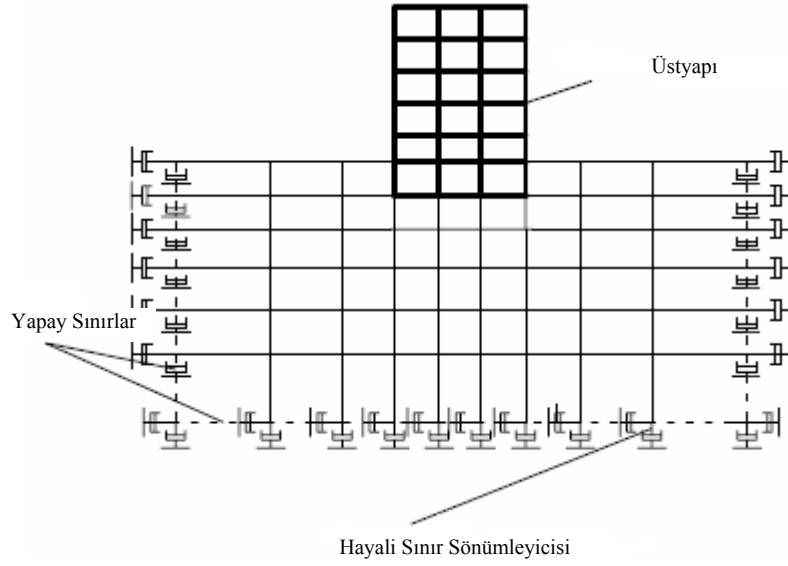
bölge için kullanılan sonlu elemanlara uygun, kesilmiş sınırlar için özel yapay sınır şartları veya özel etkileşim elemanları kullanılabilir. Yakın bölgenin sınırlarına uygulanan model, dalga yayılma şartlarını sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Doğrudan yöntemin kullanıldığı yapı-zemin 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.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K^*]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_{ff}(t)\} \quad (8)$$

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

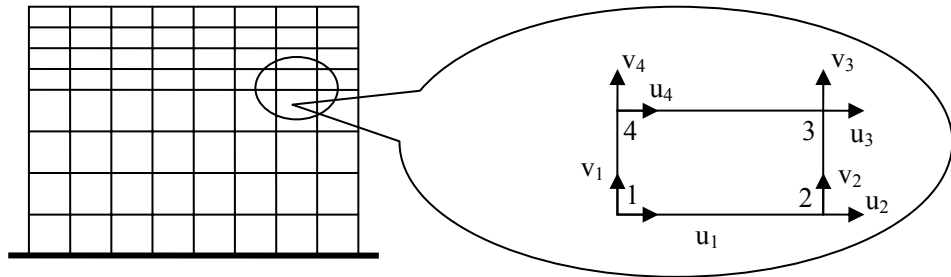


Şekil 2. Yapı-zemin etkileşim analizinin doğrudan yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemiyle problemin çözümünde önce zemin, Şekil 3’de görüldüğü gibi elemanlara 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,

$$\{v\} = [N]\{q\} \quad (9)$$



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:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \quad (10)$$

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

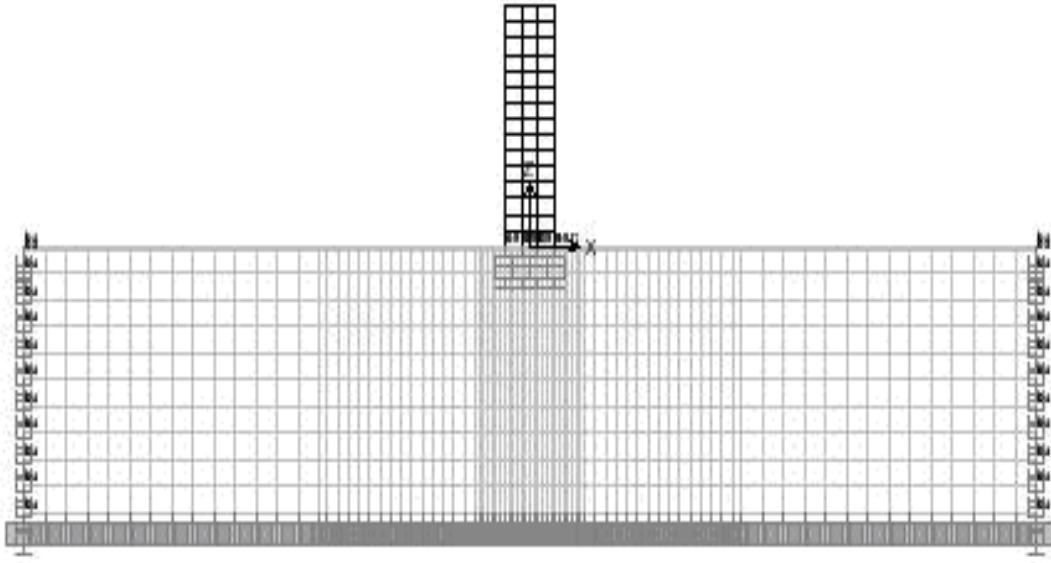
$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (11)$$

Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu eleman modellerinin ikisinin tepkisi de sonlu elemanlara ayrılma şeklinden etkilenir. Kısa dalga boylu frekans bileşenleri geniş aralıklı düğümlerle modellenemediğinden, özellikle seyrek ağıl 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 [27]. 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 yapı-zemin etkileşimi probleminde rijit veya anakaya gibi

yaklaşık rijit sınırlar, özellikle yatay yönde problemin ele alındığı bölgeden oldukça uzakta tutulmaya çalışılır. Sınır özellikleri tanımlanmaya çalışılırken en önemli amaç iletilen deprem dalgalarının sınırlardan yansıyor tekrar problemin ele alındığı bölgeye dönmesini önlemektir [28].

#### 4. KULLANILAN HDRB VE YAPI MODELİ ÖZELLİKLERİ

Kullanılan yapı modeli 3 açıklıklı betonarme bir düzlem çerçevedir. Çok katlı yapı sistemleri incelendiği için 15 katlı 45m yüksekliğinde ve taban genişliği 12m olan bir yapı modeli oluşturulmuştur. Modeller arası karşılaştırma yapabilmek için, tüm kirişler 30×50cm ve tüm kolonlar ise 40×40cm olarak seçilmiştir. Yapı-Zemin etkileşimi dikkate alınarak oluşturulan model Şekil 4’de gösterilmiştir. Kullanılan HDRB’nin fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 4. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak oluşturulan temel izolasyon modeli

Tablo 1. Yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin fiziksel özellikleri

Malzeme Sertliği	Düşey Rijitlik (N/m)	Başlangıç Rijitliği (N/m)	Etkili Rijitlik (N/m)	Akma Kuvveti (N)	Son Rijitlik/İlk Rijitlik Oranı	Kütle (kg)
Yumuşak	1751.10 <sup>6</sup>	1.751.269	262.691	22.241	0,2	175,5
Orta Sert	1373. 10 <sup>6</sup>	7.786.481	1.078.732	77.865	0,043	175,5
Sert	2746. 10 <sup>6</sup>	12.454.446	1.863.264	124.544	0,055	175,5

Analizlerde, 17 Ağustos 1999 Marmara Depreminin Yarımca-Petkim istasyonunda ölçülen 0.33g büyüklüğündeki maksimum ivme kayıtlarının kuzey-güney bileşeni kullanılmıştır. Üç farklı temel izolasyon sistemi kullanılarak oluşturulan yapı modellerinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Modellerde temel izolasyon sistemi doğrusal olmayan, üst yapı ise doğrusal olarak kabul edilmiştir.

## 5. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Zemin Sap2000 bilgisayar programında 2 boyutlu kabuk eleman olarak modellenmiştir. Kabuk elemanın boyutu sağ ve sol tarafta yapı taban genişliğinin 9.5 katı (114m), derinliği ise 50m olarak belirlenmiştir. Yapı tabanında ve yakın çevresinde sonlu eleman ağı daha sık iken yapıdan uzaklaştıkça ağ aralıkları da genişletilmiştir. Ağ aralığı yapı

merkezinden itibaren 26m'lik yakın bölgede 1m, sonraki 74m'lik bölümde 2.5m ve 140m'lik uzak bölgede 5m olarak seçilmiştir. Kabuk elemana yumuşak zemini temsil eden orta sıkı kumun Tablo 2'de gösterilen fiziksel özellikleri atanmıştır. Zemin ile üstyapı arasındaki bağlantı 1m kalınlığında tasarlanan rijit temel ile sağlanmıştır. Zeminin 50m derinliğinden sonraki bölgesi ana kaya olarak kabul edilerek bu noktalara ankastre bağlantılar atanmıştır. Zeminin yatay sınırlarına ise zemin özelliklerini taşıyan sönümleyiciler yerleştirilerek kenarlara ulaşan deprem dalgalarının tekrar zemin ortamına dönmesi engellenmiştir. Sönümleyicilerin tanımlanmasında, zemine ait rijitliğin yatay ve düşey bileşenleri ile sönüm oranının yatay ve düşey bileşenleri için eşitlik 1 ve 2 ifadeleri kullanılarak elde edilen değerler kullanılmıştır. Değerlendirmede yapının oturacağı zemin orta-sıkı kum (yumuşak zemin) olarak seçilmiş ve elastik davranıldığı kabul edilmiştir.

Tablo 2. Modellerde kullanılan zeminin fiziksel özellikleri

Özellikler	$K_H$ (N/m)	$K_Z$ (N/m)	$C_H$ (N. s/m)	$C_Z$ (N.s/m)	$\Gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\mu$	E (MPa)	Vs (m/s)
Orta-sıkı kum	$1.19 \cdot 10^8$	$0.153 \cdot 10^9$	$0.036 \cdot 10^7$	$0.075 \cdot 10^7$	18.00	0.3	30	400

Rijitliğin (K) ve sönüm oranının (C) yatay bileşenleri:

$$K_H = 2(1+\mu)\beta_x [BL]^{1/2} \quad C_H = \frac{0.576K_H R_H}{V_s} \quad (12)$$

Rijitliğin ve sönüm oranının düşey bileşenleri:

$$K_z = \frac{G\beta_z [BL]^{1/2}}{(1-\mu)} \quad C_z = \frac{0.85K_z R_z}{V_s} \quad (13)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Burada; K rijitlik,  $K_H$  rijitliğin yatay bileşeni,  $K_Z$  rijitliğin düşey bileşeni, C sönüm oranı,  $C_H$  sönüm oranının yatay bileşeni,  $C_Z$  sönüm oranının düşey bileşeni, G kayma modülü,  $\mu$  poisson oranı, B ve L dikdörtgen temel boyutları ve  $V_s$  kayma dalgası hızını göstermektedir.

Burada;  $R_H$  yatay rijitlik için eşit dairesel temel yarıçapı,  $R_Z$  düşey rijitlik için eşit dairesel temel yarıçapı,  $\beta_x$  ve  $\beta_z$  yatay rijitlik, düşey rijitlik ve salınım ile ilişkili sabitler olup eşitlik 14 ve 15 yardımıyla hesaplanır.

$$R_H = \frac{(1+\mu)(7-8\mu)\beta_x [BL]^{1/2}}{16(1-\mu)} \quad (14)$$

$$R_z = \frac{\beta_z [BL]^{1/2}}{4} \quad (15)$$

## 6. BULGULAR

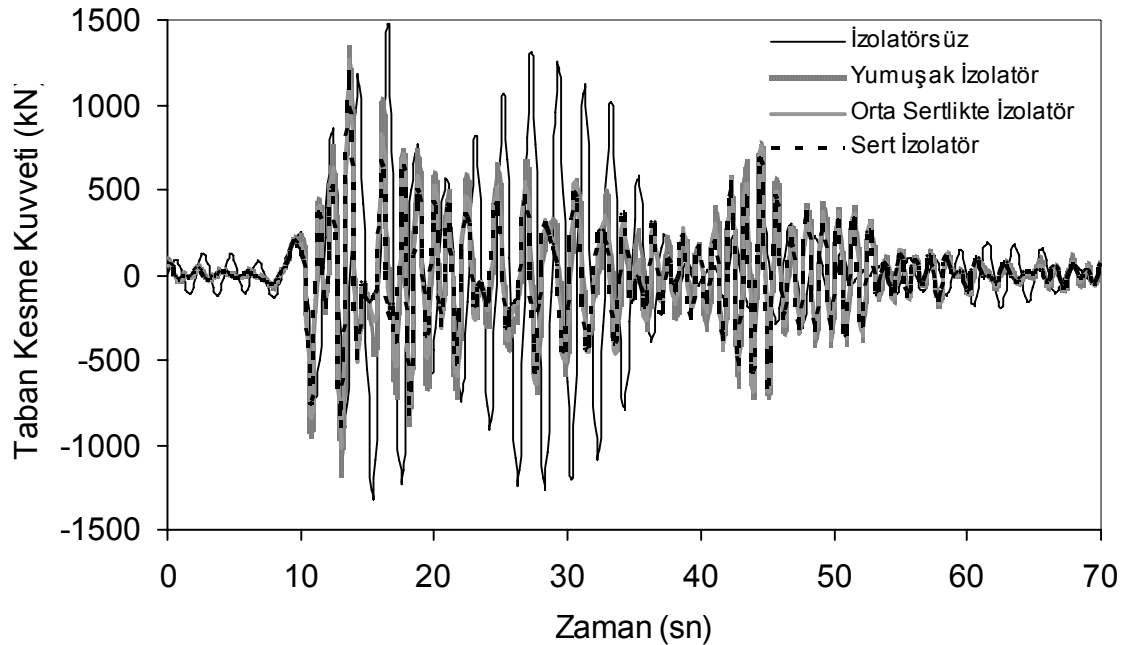
Sayısal uygulama olarak ele alınan bu modelde, zemin orta sıklıkta kum olarak modellenmiş ve bu tür yumuşak zeminlerde taban izolasyon sisteminin etkinliği araştırılmıştır. Modellere 0,33g büyüklüğünde deprem verisi uygulanmıştır. Temel izolasyon sistemi olarak 3 farklı özellikte HDBR kullanılmıştır. Analiz sonucunda modellerde elde edilen yapı görelî yerdeğiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri, en üst kat ivme değerleri, periyotlar ve örnek bir eleman olarak 59 numaralı çubuk elamandaki iç kuvvetler değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Deprem etkisi altında yapı-zemin etkileşim davranışı

	İzolatörsüz	Yumuşak İzolatör	Orta Sertlikte İzolatör	Sert İzolatör
Yapı Görelî Yerdeğiştirmesi (cm)	150.9	36.71	36.85	33.5
% Fark	-	-75.67	-75.58	-77.8
Taban Kesme Kuvveti $V_{max}$ (kN)	1475.4	1338.4	1260.8	1201.4
% Fark	-	-9.29	-14.55	-18.57
En Üst Kat İvmesi ( $m/sn^2$ )	17.49	12.87	12.58	11.74
% Fark	-	-26.42	-28.07	-32.88
Periyot (sn)	2.18934	2.07385	2.01738	1.97694
% Fark	-	-5.28	-7.85	-9.70
59 no'lu Elemanda Eksenel Kuvvet $N_{max}$ (kN)	548.0	405.9	396.3	377.1
% Fark	-	-25.93	-27.68	-31.19
59 no'lu Elemanda Eğilme Momenti $M_{max}$ (kNm)	190.9	156.1	151.4	144.2
% Fark	-	-18.23	-20.69	-24.46
59 no'lu Elemanda Kesme Kuvveti $V_{max}$ (kN)	133.3	110.4	106.9	101.9
% Fark	-	-17.18	-19.8	-23.56

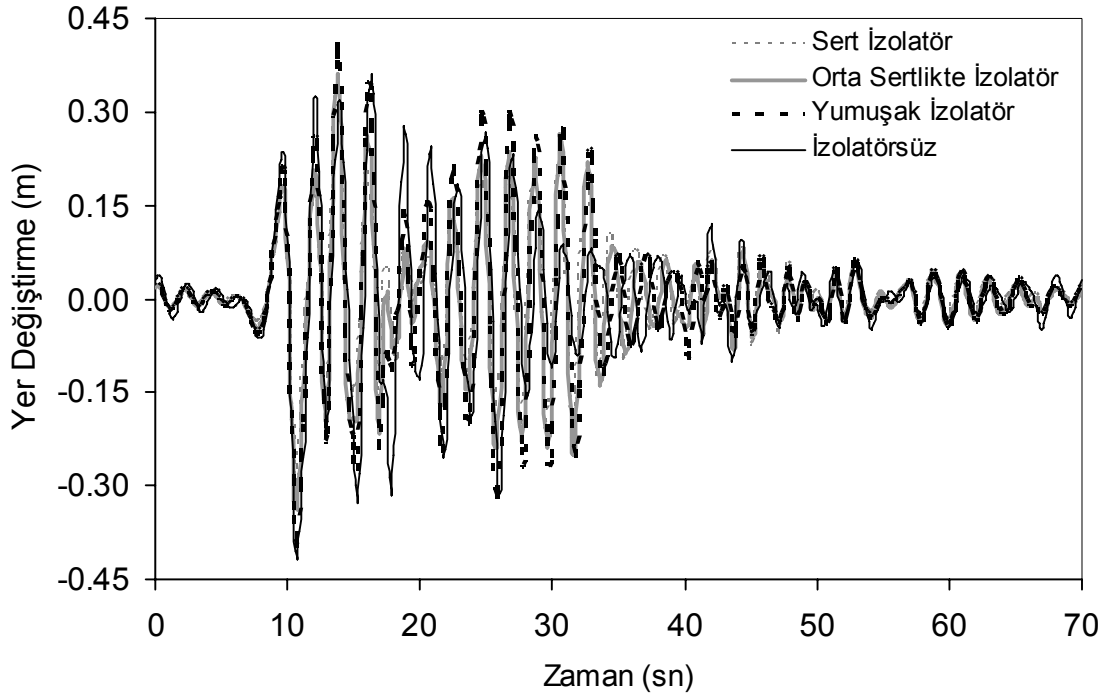
Sert izolatör kullanılan sistemde taban kesme kuvveti %18 oranında, ivme değeri %33 oranında, yapı görelî yerdeğiştirme değeri %77 oranında ve periyot %10 oranında azalmıştır. Oluşturulan modellerde örnek eleman olarak belirlenen 59 numaralı çubuk elemanında meydana gelen eksenel kuvvet, eğilme momenti ve normal kuvvet değeri incelenmiştir. Sert izolatörlü izolasyon sisteminin kullanıldığı

modelde ankastre mesnetli (izolatörsüz) duruma göre eksenel kuvvet değeri %31.19, eğilme momenti %24.46 ve normal kuvvet değeri ise %23.56 kadar azalmıştır. HDBR'nin rijitliği azaldıkça izolasyon sisteminin etkinliği azalmaktadır. Tüm modeller için yapıda oluşan taban kesme kuvveti, temel seviyesi yerdeğiştirmesi ve yapı üst kat ivmesinin zamanla değişim grafikleri şekil 5-7'de gösterilmiştir.

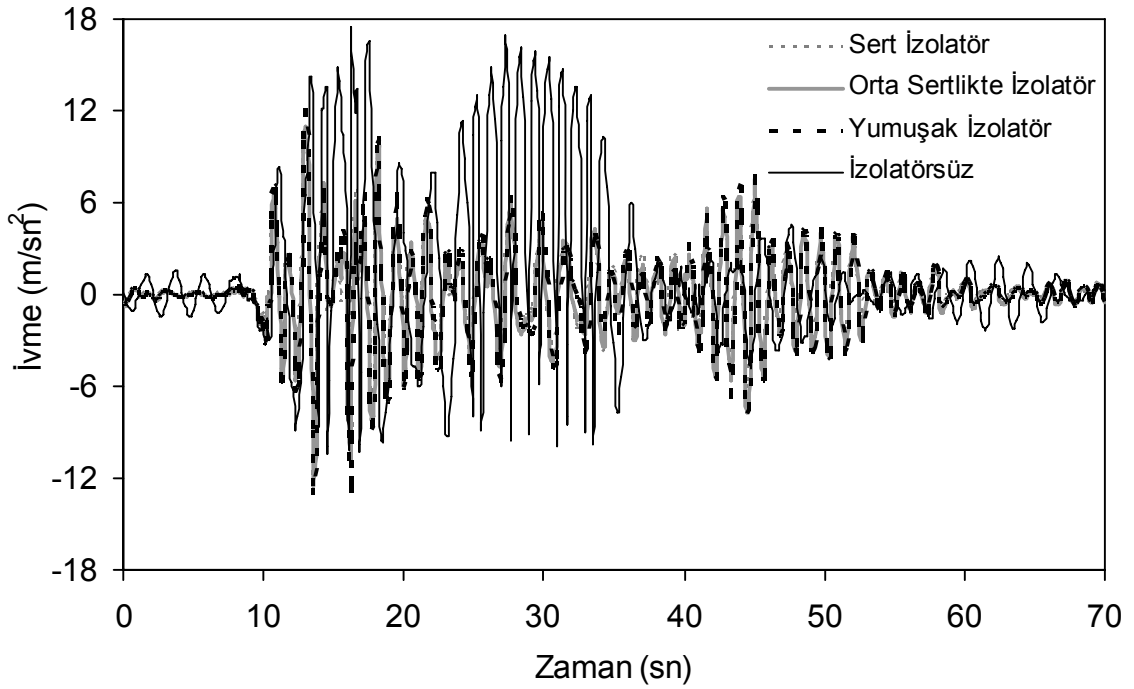


Şekil 5. Taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi





Şekil 6. Temel seviyesi yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



Şekil 7. Yapı üst kat ivmesinin zamanla değişimi

## 7. SONUÇLAR

Yapı sistemlerinin analizi yapılırken genellikle yapı ile zemin arasındaki etkileşim göz önüne alınmadan,

sadece yapı sistemleri incelenmektedir. Yapıların dinamik analizi için geliştirilmiş genel amaçlı bilgisayar programları bulunmakla birlikte, bu tip programlarda yapının rijit bir temel üzerine oturduğu

ve depremin belirli bir mesnet hareketi olduğu kabul edilerek çözüme gidilmektedir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, ağır ve rijit yapıların dinamik analizlerinde bu kabul geçerliliğini yitirmektedir. Dolayısıyla bu tip yapıların analizlerinde, zeminin mevcudiyetinin yapıya olan etkisinin mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir. Çünkü bu tip yapılar genellikle kendilerine göre daha az rijit ve yumuşak zemin üzerine oturtulmakta ve dinamik etki sırasında temel sisteminde önemli deformasyonlar meydana gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında temel izolasyon sistemlerinin yapı-zemin etkileşimi etkisindeki davranışları incelenmiştir. Yapı modeli olarak, ankastre mesnetli ve üç farklı tipte izolatör sistemi kullanılarak temeli izole edilen yapı modelleri oluşturulmuştur. Zaman-tanım aralığı yöntemi ile dinamik analizleri yapılan modellerin birbirlerine üstünlükleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak oluşturulan ve yumuşak zemin üzerinde bulunan modellerden sert izolatörlü izolasyon sistemi kullanılarak oluşturulan modelin deprem etkisini diğer ankastre mesnetli, yumuşak ve orta sertlikteki izolatörlü izolasyon sistemlerinin kullanıldığı modellere göre daha etkili bir biçimde azalttığı görülmektedir.

#### KAYNAKLAR

1. Wolf, J.P., Song, C., Finite-element modeling of unbounded media, England: Wiley; 1996.
2. Medina, F., Taylor, R.L., Finite element techniques for problems of unbounded domains, Numer Meth Engng; 19:1209–26; 1983.
3. Mengi, Y., Tanrikulu, A.H., Tanrikulu, A.K., Boundary element method for elastic media: an introduction, Ankara: METU Press; 1994.
4. Brebbia, C.A., Connor, J.J., Advances in boundary elements, vol. 1. Southampton: Computational Mechanics Publications; 1989.
5. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L., 'Finite dynamic model for infinite media, J. Engrg. Mech. Div., ASCE, 95: 859-877, 1969.
6. Murakami, H., Shioya, S., Yamada, I. and Luco, J.E., Transmitting boundaries for time harmonic elastodynamics on infinite domains, Int. J. Num. Meth. Engrg. 17: 1697-1716, 1981.
7. Gaitanaros, A.P. and Karabalis, D.L., Dynamic analysis of 3-d flexible embedded foundations by a frequency domain BEM-FEM, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 16: 653-674, 1998.
8. Von Estorff, O. and Kausel, E., Coupling of boundary and finite elements for soil-structure interaction problems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18: 1065-1075, 1989.
9. Yerli, H.R., Temel, B., Kiral, E., Multi-wave transient and harmonic infinite elements for two-dimensional unbounded domain problems, Comput Geotech; 24(3):185–206; 1999.
10. Yerli, H.R., Temel, B., Kiral, E., Transient infinite elements for 2-dimensional soil-structure interaction analysis, J Geotech Geoenviron Eng ASCE; 124(10):976–88; 1998.
11. Chuhan, Z., Chongbin, Z., Coupling method of finite and infinite elements for strip foundation, Earthquake Engng Struct Dyn; 15: 839–51; 1987.
12. Constantinou, M.C., Kneifati, M.C., Effect of soil-structure interaction on damping and frequencies of base-isolated structures, In: Proceedings of third US national conference on earthquake engineering, vol. I. Charleston; 1986.
13. Tsai, C.S., Chen, C.S., Chen, B.J., Effects of unbounded media on seismic responses of FPS-isolated structures, Struct Control Health Monit; 11(1):1–20; 2004.
14. Spyarakos, C.C., Koutromanos, I.A., Maniatakis, C.A., Seismic response of base-isolated buildings including soil-structure interaction, Soil Dyn Earthquake Eng; doi:10.1016/j.soildyn.2008.07.002;2008.
15. Tian, L., Li, Z.X., Dynamic response analysis of a building structure subjected to ground shock from a tunnel explosion, Int. Journal of Impact Engineering; 35: 1164–1178; 2008.
16. Elmas, M., Karabörk, T. and Mercan D., Nonlinear dynamic analysis of base isolated medium high structures by using high damping rubber bearing , 5th International Conference on Advanced Civil Engineering; 2002.
17. Skinner, R.I., Robinson, W.H. and Mcverry, G.H., An introduction to seismic isolation, DSIR Physical Sciences, John Wiley & Sons, Inc., 1993.
18. Bayülke, N., Yapı temellerinin deprem titreşimlerinden lastik takozlarla yalıtımı, Deprem Araştırma Bülteni, Sayı: 71, 1993.
19. Soberon, C., Colunga, A. and Loustaunau, A., Analytical study on seismic isolation of two irregular buildings at the Mexican Pacific Coast, 11 th World Conference on Earthquake Engineering, 1996.
20. Kelly, J.M., The role of damping in seismic isolation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999.

*Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 26(1): 77-87 (2010)*

21. Akkar, D.S., Optimum temel yalıtım sistemlerinin düzenlenmesinde temel yalıtım rijitliğinin etkisi, 4.üncü Ulusal Deprem Konferansı, ODTÜ, 1994.
22. Naeim, F., Kelly, J.M., Design of seismic isolated structures—from theory to practice, New York: Wiley; 1999.
23. Kramer, S.L., Geoteknik deprem mühendisliği, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Fersa Matbaacılık, Ankara, s.321-334; 2003.
24. Wolf, J.P., Dynamic soil–structure interaction, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ; 1985.
25. Wolf, J.P., Soil–structure interaction analysis in time domain, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ; 1988.
26. Karabörk, T. and Dogus, S., Effect of soil stiffness to the behavior of structures impose to earthquake, National Earthquake Symposium, Kocaeli University; 2005.
27. Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L., Finite dynamic model or infinite media, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 95, s.859-877; 1969.
28. Yerli, H.R., Kaçın, S. and Koçak, S.A., Paralel finite-infinite element model for two-dimensional soil-structure interaction problems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.23,s.249-253;2003.