

## Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları

Erkan ÇELEBİ\*

Seyhan FIRAT\*\*

İlyas ÇANKAYA\*\*\*

### ÖZ

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde zemin ortamı, alt sistem yaklaşımıyla ayrık bir sistem olarak gözönüne alınır. Altsistem yaklaşımının en önemli aşaması, temel-zemin arakesitinde tanımlanan karmaşık dinamik rijitlik katsayılarının belirlenmesidir. Bu çalışmada yüzeysel ve gömülü temellerin dinamik empedanslarının sayısal değerleri geniş bir frekans aralığı için elde edilmiştir. Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin altsistemi homojen, izotropik ve lineer elastik olarak tanımlanan sürekli ortamın hareket denkleminin kesin çözümünü esas alan sınır elemanlar yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. İleri düzey gerçekleştirilebilir uygulamalar yapabilmek ve yapı mühendislerine bu tip problemlerin çözümlerinde yeterli olanaklar sağlamak üzere ayrıntılı parametrik araştırma ve sistematik hesaplamalar çeşitli kontrol parametrelerine bağlı yürütülerek, titreşen temel-zemin sisteminin dinamik davranışı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, bütün titreşim modları için elde edilen boyutsuzlaştırılmış rijitlik ve sönüm katsayıları analitik çözüme dayanan literatür sonuçlarıyla karşılaştırılarak, önerilen modelin yeterliliği gösterilmiştir.

### ABSTRACT

#### Dynamic Impedance Functions for Rectangular Rigid Foundations

In the analysis of soil-structure interaction problems, the soil medium can be considered as a discrete system based on the substructure approach. The main step in this method is to determine the complex dynamic-stiffness coefficients defined on the interface of soil-foundation system. In this study, the discrete values of impedance functions over a wide range of frequency-factor are presented for both surface-supported and embedded

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22.07.2004 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2006 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Adapazarı – erkan@doruk.net.tr

\*\* Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitim Bölümü Adapazarı – sefirat@sakarya.edu.tr

\*\*\* Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Adapazarı – icankaya@sakarya.edu.tr

foundations. The numerical results are obtained by using the substructure approach in the frequency domain, which is formulated on basis of the Boundary Element Method, based on the fundamental solution for homogeneous, isotropic and linear-elastic continuum. To further demonstrate in practical applications and to show the solutions of these types of problems to civil engineers, a comprehensive parametric analysis and systematic calculations are performed with various controlling parameters to evaluate the dynamic response of the vibrating soil-foundation system. Furthermore, the solutions for normalized stiffness and damping coefficients of foundations under all vibration modes are found to be in very good agreement with the published results based on the analytical methods.

## **1. GİRİŞ**

Dinamik yükler altındaki önemli yapı sistemlerinin performansını daha iyi değerlendirebilmek ve tam güvenliğini sağlayabilmek için nümerik ve deneysel çözüm yöntemlerinin yaygın olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen simülasyon uygulamaları günümüzde gittikçe önem kazanmaktadır. Araştırılan problemin saha veya laboratuvar deney çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının, nümerik çözüm teknikleriyle geliştirilen mekanik modelin analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması, bilgisayar modelinin öngörülen doğruluk düzeyi hakkında fikir vermekte yardımcı olmaktadır.

Bilgisayarların sağladığı hız ve etkinlik inşaat mühendisliğini gittikçe daha büyük ve karmaşık problemlerin çözümüne yöneltmektedir. Ayrıca çeşitli dış etkiler altında yapı davranışının gerçeğe daha yakın olarak izlenmek istenmesi durumunda, sistemde göz önüne alınan bilinmeyen sayısının artırılması ve bunun beraberinde getirdiği çeşitli güçlüklerin de aşılması gerekmektedir. Söz konusu nedenlerle artan işlem hacmine bağlı olarak, mevcut belleğin ekonomik kullanımı ve öngörülen doğruluk düzeyine mümkün olan en kısa sürede erişme isteği, bilgisayar teknolojisindeki tüm gelişmelere rağmen hala önemini korumaktadır. Nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, viyadükler ve barajlar gibi depreme karşı davranışların önemli olduğu bilinen yapı sistemleri, günümüzde zorunlu olarak aktif deprem bölgelerinde yapılmaktadır. Bu tür yapıların gerekli bazı durumlarda, çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmaktadır. Bir bölgedeki yapının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin sisteminin dinamik özelliklerinin anlaşılması gereklidir.

Ayrıca modern kent topluluklarının yoğun yerleşim bölgelerinde daha kaliteli ve güvenli yaşam isteği ve çevresel etkenlerin ürettiği problemlere gösterdikleri duyarlılıklar karşısında, farklı titreşim kaynaklarının neden olduğu kuvvetli yer hareketinin incelenmesi ve üst yapıdaki dinamik etkilerinin belirlenmesi son zamanlarda bilim dünyasında yapı ve geoteknik mühendisliği alanlarına ilgi uyandırmaya başlamıştır.

Ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik yükleri, yoğun inşaat faaliyetleri ve patlamalar gibi, deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekanslı insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu dalgaların, yumuşak zemin ortamında yayılışı ve yoğun yerleşim alanlarındaki yapı temelleriyle etkileşimi hassas aletlerde işlevsel bozukluklara, insanlarda rahatsızlık verici durumlara, hatta yakın binalarda hasarlara neden olabilmektedir. Hareket hızlarını, yolcu ve yük kapasitelerini sürekli artıran yüksek-hız trenleri ve ağır yük vasıtaları gibi dalga kaynaklarının ürettiği kuvvetli yer hareketleri, trafik ağının içinden geçtiği yerleşim bölgelerindeki yapıları titreştirerek bir tehdit unsuru olmaya devam etmektedir. Bu alandaki kapsamlı ve yoğun araştırmalar da güncelliğini korumaktadır.

Yapı-zemin dinamik etkileşim problemlerinde altsistem yaklaşımının en önemli çözüm aşaması, temel-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen yapı temellerinin davranışının incelenmesinde de etkin olarak kullanılan dinamik empedans fonksiyonlarının belirlenmesidir. Temellerin rijitliklerini de gösteren bu dinamik büyüklükleri hesaplayabilmek için günümüzde mevcut analitik ve yarı analitik çözüm yöntemlerinin yanında sınır elemanlar ve sonlu elemanlar gibi nümerik çözüm yöntemleriyle bunların her ikisini de kapsayan karma (melez) çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Sınır elemanlar yönteminin olağanüstü verimi hesaplamalı mekanik alanındaki en önemli gelişmelerdendir.

Yapı-zemin dinamik etkileşim problemleriyle ilgili çalışmalarda içerik bakımından açık bir değişim görülmektedir. Kontrol parametrelerine bağlı olarak sistemli bir şekilde yürütülen ayrıntılı parametrik araştırmalardan elde edilen ampirik bağıntılar ve sayısal sonuçlar günümüzde daha az kullanılabilir hale gelmiştir. Bu bakış açısıyla konu ele alındığında, en önemli çalışmalara, elastik yarı-uzaya oturan dikdörtgen temellerin dinamik rijitliklerini frekans tanım aralığında sınır elemanlar yöntemi kullanarak hesaplayan Dominguez ve Roesset [1], gömülü kare temellerin bağlaşıklık öteleme-dönme titreşimleri için karma çözüm tekniğini kullanan Mita ve Luco [2] ve farklı geometrik şekillere sahip gömülü temellerin yanal titreşimleri için kesin çözümler elde eden Gazetas ve Tassoulas [3, 4] tarafından yapılan çalışmalar örnek verilebilir. Tabakalı zemin ortamına yüzeysel ve gömülü biçimde oturan dairesel temellerin bağlaşıklık öteleme-dönme titreşimleri için Apsel ve Luco [5] integral çözüm teknikleri geliştirerek önemli sonuçlar elde etmişlerdir. Wolf ve Song [6] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gömülü dikdörtgen temellerin empedans değerlerini farklı titreşim modları için hesaplamıştır. Günümüze kadar nümerik çözüm yaklaşımları kullanılarak yapılan çalışmaların çoğunda elde edilen sonuçlar az sayıda frekans parametresi ( $a_0 \leq 3$ ) ve belli Poisson değerleri ( $0.25 \leq \nu \leq 0.45$ ) için gerçekleştirilmiştir. Özellikle, göreceli olarak zayıf zeminlere oturan nükleer güç santralleri gibi ağır ve rijit yapı temellerinin dinamik davranışını geniş bir frekans aralığında inceleme zorunluluğu bulunurken, hesaplama süresinin uzunluğu ve kesin çözüm tekniklerinin uygulamaya dönük getirdiği kısıtlamalar, daha yüksek frekans değerleri için sayısal sonuçlar elde etmeye dönük çalışmaları duraksatmıştır. Ancak, Bu [7], Bu ve Lin [8] titreşim frekansının geniş bir aralığında ( $0 \leq a_0 \leq 10$ ) sadece kare temellerin empedans fonksiyonlarını hesaplamış olmasına rağmen, matematik modeli uzay problemi olarak incelememiş, burulma titreşimi ve buna bağlı bağlaşıklık titreşim modlarını dikkate almamıştır. Bundan dolayı son on yıl süresince, çalışmalarda kapsamlı parametrik araştırma yerine, yeni teorik yaklaşımlar ve mevcut sayısal yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Genelde yazarlar geliştirdikleri yöntemleri bir örnek yardımıyla açıklamışlar yada başka yazarlar tarafından elde edilen sonuçları kendi bulguları ile karşılaştırarak yorumlamışlardır. Bunun sonucunda uygulamaya dönük çalışan mühendisler, bu konuyla ilgili olarak sadece bir kaç özel durum için elde edilmiş empedans değerlerini kullanabilmişlerdir. Temel empedans fonksiyonlarının titreşim kaynağının frekans bağımlı olması temel-zemin ortak sistemine ait hareket denklemlerinin analitik çözümünü karmaşık hale getirdiğinden, birçok araştırmacı frekanstan bağımsız sabit değerli temel rijitlik katsayıları önermişlerdir [9]. Bu sabit değerler genel uygulamalarda kabul görmektedir. Fakat frekanstan bağımsız yaklaşık empedansların kullanılmasının düşünülmesi, elbette elasto-dinamik problemlerin çözümünde mümkün olabilecek en son basitleştirme örneğidir.

## *Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları*

Bu çalışmada, temel-zemin arakesitinin dinamik rijitliğini ve geometrik sönümünü gösteren empedans fonksiyonlarının sayısal değerleri, radyasyonun önemli olduğu geniş bir frekans aralığında rijit ve dikdörtgen olarak tanımlanan temelin yüzeysel ve gömülü durumları için ayrı ayrı elde edilmiştir. Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin altsisteminin malzeme özellikleri homojen, izotrop ve doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır. Sınır elemanlar yönteminin esasını oluşturan sınır integral formülasyonları, tam uzay çözümü Rizzo ve Cruse [10] tarafından verilen, elasto-dinamik problemlerin başlıca diferansiyel dalga denklemi olarak da bilinen Lamé-Navier hareket denkleminde türetilmiştir. Geliştirilen matematik modelde, temel-zemin etkileşim arakesiti ve zemin yüzeyi sabit sınır elemanlar kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. İleri düzey gerçekleştirilebilir uygulamalar yapabilmek, yapı mühendislerine bu tarz problemlerin çözümlerinde yeterli imkanlar ve kolaylıklar sağlamak üzere kapsamlı parametrik araştırma ve sistematik hesaplamalar çeşitli kontrol parametrelerine bağlı olarak, titreşen temel-zemin sisteminin dinamik davranışı incelenmiştir. Ayrıca bütün titreşim modları için elde edilen boyutsuzlaştırılmış rijitlik ve sönüm katsayıları analitik çözüme dayanan literatür sonuçlarıyla karşılaştırılarak önerilen modelin yeterliliği ve etkinliği gösterilmiştir. Elde edilen bu dinamik empedansların yapı-zemin dinamik etkileşiminin hesaba katıldığı problemlerin deprem analizinde etkin olarak kullanıma sunulmasının geoteknik deprem mühendisliği alanında bu tip problemlerin değerlendirilmesinde büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

## **2. ZEMİN ALT SİSTEMİ VE EMPEDANS ANALİZİ**

### **2.1. Empedans Fonksiyonları (Dinamik Rijitlik)**

Başlangıçta ağır makine temellerinin titreşimlerini hesaplamak için amaçlanan yapı-zemin dinamik etkileşimi problemleri için çözüm yaklaşımları, sismik hesaplar için de uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Birinci durumda makine veya trafik yükleri titreşim kaynağı iken ikinci durumda zemin doğrudan doğruya dinamik etkinin kaynağını oluşturur. Buna rağmen her iki durum için de hedeflenen çözüm tarzı aynıdır.

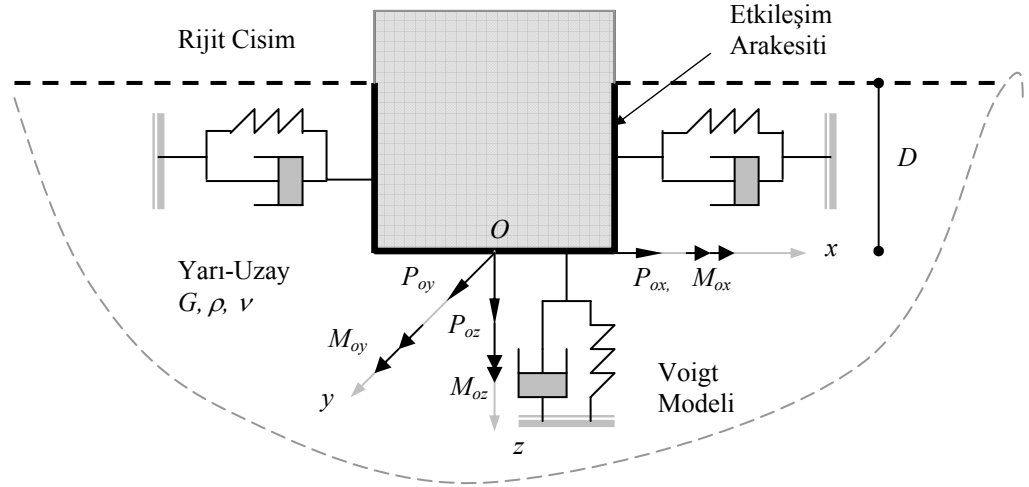
Yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan ve ortak sistem içinde zemin ortamının ayrık bir sistem olarak göz önüne alınması esasına dayanan altsistem yaklaşımının en önemli aşaması, temel-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri için tanımlanan ve titreşen temellerin davranışının incelenmesinde kullanılan temel ortamının empedans büyüklüklerinin belirlenmesidir. Yapı-zemin etkileşim problemleri, temel-zemin sisteminin kompleks dinamik rijitliklerini gösteren empedans fonksiyonları ile değerlendirilmektedir.

Altsistem yaklaşımında, üstyapı ve zemin iki ayrı sistem olarak ele alınır ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denklemleri, daha sonra üstyapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Zemin ortamının bağımsız bir sistem olarak incelenmesi ile, yapı-zemin arakesitindeki serbestlik dereceleri cinsinden elde edilen temel ortamının rijitlik matrisi ve etkin yük vektörü, daha sonra yapının dinamik dengesinde göz önüne alınır.

Dış yüklerin etkisi altındaki temelin hareketlerini belirlemek ve bunun sonucunda da zemin ve temel özelliklerini dikkate alarak üst yapının yerdeğiştirme bileşenlerinin hesaplanması çözüm aşamalarını oluşturur. Bir başka ifadeyle empedans fonksiyonları temel-zemin değme yüzeyinde tanımlanmaktadır. Bu durum yapı-temel sisteminin hareketini kütlede bağımsız inceleme imkanını verir.

## 2.2. Hareket Denklemlerinin Genel Yapısı

Homojen, izotrop ve lineer elastik olduğu varsayılan zemin bölgesi, yarı sonsuz ortam yaklaşımı kullanılarak idealleştirilmiştir. Harmonik titreşimler etkisi altındaki kütleli yapı temelini sonsuz rijit olarak alınması durumunda arakesit yerdeğiştirmelerini, temelini rijit hareket serbestlik dereceleri cinsinden bir merkez noktada ( $O$ ) üçü öteleme ( $u_{ox}, u_{oy}, u_{oz}$ ) ve üçü dönme ( $\gamma_{ox}, \gamma_{oy}, \gamma_{oz}$ ) olmak üzere toplam altı bileşenle tanımlamak mümkündür.



Şekil 1. Elastik Yarı Uzayda Rijit Cisim Modeli

Şekil 1'deki gösterimde yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini; sönümleyiciler ise zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen fiktif zemin sönümünü (radyasyon sönümü veya geometrik sönüm) açıklamaktadır. Zeminin özellikleri, kayma modülü,  $G$ , kütleli yoğunluk,  $\rho$  ve Poisson oranı,  $\nu$  ile tanımlanmıştır. Rijit cismin referans noktasına ( $O$ ) göre yazılan hareket denkleminin Fourier dönüşümü ile çözülmesi durumunda, kuvvet ile yerdeğiştirme arasındaki ilişki yer hareketinin,  $\tilde{u}_{gx}$ , sadece  $x$  doğrultusunda olması durumu için,

$$\begin{Bmatrix} \tilde{P}_{ox} \\ \tilde{P}_{oy} \\ \tilde{P}_{oz} \\ \tilde{M}_{ox} \\ \tilde{M}_{oy} \\ \tilde{M}_{oz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx}(\omega) & 0 & 0 & 0 & K_{x,my}(\omega) & 0 \\ 0 & K_{yy}(\omega) & 0 & K_{y,mx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}(\omega) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{mx,y}(\omega) & 0 & K_{mx}(\omega) & 0 & 0 \\ K_{my,x}(\omega) & 0 & 0 & 0 & K_{my}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{mz}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ox} - \tilde{u}_{gx} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{u}_{oz} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{oz} \end{Bmatrix}$$

$$P = KU \quad (1)$$

### Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları

şeklinde elde edilir. Burada  $P$  vektörü temel plağı ile zemin arakesitinde yer alan etkileşim kuvvetlerini ifade ederken,  $U$  ise rijit temel hareketinin kararlı davranışını yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden gösteren vektördür. Bu durumda, temel in her bir titreşim moduna karşı gelen frekansa bağı karmışık değerli dinamik rijitlik matrisi, bir başka deyişle kütlesiz temel in empedans matrisi  $K$  ile gösterilmiştir. Zemin altsisteminde etkileşim yüzeyi için tanımlanan dinamik rijitlik matrisinin tersi alınarak, frekansa bağı kompleks dinamik fleksibilite matrisi elde edilir ve bunlardan yararlanarak elde edilen transfer fonksiyonları  $f$  kullanılarak rijit temel çözümüne gidilir;

$$U = K^{-1} P = fP \quad (2)$$

Eğer yapı-temel sistemi iki simetri düzlemiyle tanımlanmış ise, öteleme ile burulma hareketi arasında bağılaşıklık olmaz. Bu durumda dinamik rijitlik matrisinde bu terimlerin sıfıra eşit olduğu görülür. Ayrıca farklı doğrultulara ait yanal öteleme bileşenlerinin birbirine olan etkileri ve eğilme-dönme serbestlik derecelerinin kendi aralarındaki etkileşimleri, eğilme-dönme bileşenlerinin burulma serbestlik derecesi ile karşılıklı etkileşimi söz konusu olmadığından, bu terimler de sıfıra eşit olur. Bunun yanında  $K$  matrisinin köşegen terimleriyle birlikte, her bir simetri düzleminde yanal öteleme ile dönme hareketleri arasındaki etkileşimi gösteren terimleri de dikkate almak gerekir.

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin analizinde boyutsuz parametrelerle çözümler gerçekleştirildiğinden boyutsuz frekans faktörü tanımlamak yararlı olacaktır. Bu durumda;

$$a_o = \frac{\omega B}{c_s} \quad (3)$$

şeklini alır. Bu eşitlikte titreşim kaynağının açıs al frekansı,  $\omega$  (radyan/saniye); dairesel temel in yarıçapı yada dikdörtgen temel in yarı genişliği,  $B$ ; yarı uzayın kayma dalga hızı  $c_s$  ile gösterilmektedir. En genel ifadesiyle dinamik empedans matrisinin terimleri boyutsuz frekans parametresine bağı olarak;

$$K_\alpha(\omega) = K_{s\infty\alpha}(k_\alpha(a_o) + ia_0c_\alpha(a_o))(1 + 2i\beta) \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $K_{s\infty\alpha}$  statik rijitliği,  $\beta$  ise yapısal sönümü göstermektedir. Empedans fonksiyonunun boyutsuz rijitlik ve sönüm katsayıları sırasıyla  $k_\alpha$  ve  $c_\alpha$  ile belirtilmiştir. Her bir titreşim modu dikkate alındığında statik rijitlik terimlerine bağı dinamik empedans büyüklükleri aşağıda belirtildiği gibi hesap edilecektir:

- Yanal titreşim modunda ( $\alpha = xx, yy$ ):

$$K_\alpha(\omega) = \frac{8Gr}{2-\nu}(k_\alpha + ia_0c_\alpha); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \quad (5)$$

- Düşey titreşim modunda ( $\alpha = zz$ ):

$$K_{\alpha}(\omega) = \frac{4Gr}{1-\nu} (k_{\alpha} + ia_0c_{\alpha}); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \quad (6)$$

- Eğilme titreşim modunda ( $\alpha = mx, my$ ):

$$K_{\alpha}(\omega) = \frac{8Gr_{\alpha}^3}{3(1-\nu)} (k_{\alpha} + ia_0c_{\alpha}); \quad r_{mx} = \sqrt[4]{\frac{16B^3L}{3\pi}}, \quad r_{my} = \sqrt[4]{\frac{16BL^3}{3\pi}} \quad (7)$$

- Burulma titreşim modunda ( $\alpha = mz$ ):

$$K_{\alpha}(\omega) = \frac{16Gr^3}{3} (k_{\alpha} + ia_0c_{\alpha}); \quad r_{\alpha} = \sqrt[4]{\frac{8BL(B^2 + L^2)}{3\pi}} \quad (8)$$

- Bağlılık modunda ( $\alpha = mx,y; my,x$ ):

$$K_{\alpha}(\omega) = \frac{8Gr^2}{2-\nu} (k_{\alpha} + ia_0c_{\alpha}); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \quad (9)$$

### 3. NÜMERİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ

#### 3.1. Frekans Bölgesinde Sınır Elemanlar Çözüm Yöntemi

Bu çalışmanın temel amacı, geniş frekans aralığında temellerin yüzeysel ve gömülü durumları için empedans fonksiyonlarını alt sistem formülasyonu içinde, sınır elemanlar yöntemi algoritmasını kullanarak elde etmektir. Geliştirilen çözüm yönteminde, frekans tanım alanının tercih edilmesinin ana nedeni, sistemden dışarıya doğru yayılan ve zeminin sonsuzluğu nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için eşdeğer anlamda kullanılan, radyasyon sönümü adı verilen ve malzeme sönümü ile ilgisi bulunmayan bir sönüm mekanizmasının, çözümün zaman tanım alanında yapılması durumunda, analitik ifadelerle katılmasının kolay olmayışıdır. Sürekli sistemlerin uygun bir sayısal yöntem kullanılması sonucunda ayrık bir sistem olarak ele alınmasında, serbestlik derecesi çoğaltılarak çözümün yaklaşıklık derecesi artırılabilir. Yakınsamanın kabul edilmesi durumunda, matematik olarak kesin bir çözüm, serbestlik derecesinin sonsuza yaklaştırılmasıyla elde edilir. Sonsuz büyük bir zemin bölgesi gibi sürekli bir ortam sonsuz serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülebilir. Böyle bir sistemin hareket denklemi, ortamın sonsuz küçük bir eleman parçasının göz önüne alınmasıyla kısmi diferansiyel denklemi ile ifade edilebilir. Sınır elemanlar yönteminin kullanımına ait çözüm, sürekli ortamlar mekaniği problemlerinin hareketi için yazılan diferansiyel denklem takımının sınır integral formülasyonuna dönüştürülmesi esasına dayanır ve analitik olarak da bu diferansiyel denklemin kesin çözümünün bilinmesi gerekir [11]. Lineer problemlerde

### Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları

incelenen bölgenin sadece sınırlarının ayrıklaştırılmasıyla çözüm boyutunun bir mertebe indirgenmesiyle daha az bilinmeyen kullanılması ve sınırdaki radyasyon koşulunu doğrudan sağlaması, sınır elemanlar yönteminin sürekli ortamlar mekaniğinde dalga yayılışı problemleri için uygun bir nümerik yaklaşım olduğunu göstermektedir.

### 3.2. Elasto-Dinamikte Dalga Yayılımı Teorisi ve Sınır Eleman Formülasyonları

Sonsuz, yarı-sonsuz veya çok büyük zemin bölgelerini ilgilendiren dalga yayılışı problemlerinin sayısal olarak modellenebilmesi için elde edilen sınır integral denklemlerinin çözümünde sınır elemanlar yöntemi etkin bir hesaplama tekniği olarak kullanılmaktadır.

Problemde cisim kuvvetlerinin varlığı hesaba katılmadığında ve sıfır başlangıç koşulları uygulandığında, Betti karşılık teoremi yardımıyla sınır integral denklemi,

$$c_{ik}(\xi)\tilde{u}_i^*(\xi, \omega) = \int_{\Gamma} \tilde{u}_{ik}^*(\mathbf{x}, \xi, \omega)\tilde{t}(\mathbf{x}, \xi, \omega)_i \partial\Gamma - \int_{\Gamma} \tilde{t}_{ik}^*(\mathbf{x}, \xi, \omega)\tilde{u}_i(\mathbf{x}, \xi, \omega) \partial\Gamma \quad (10)$$

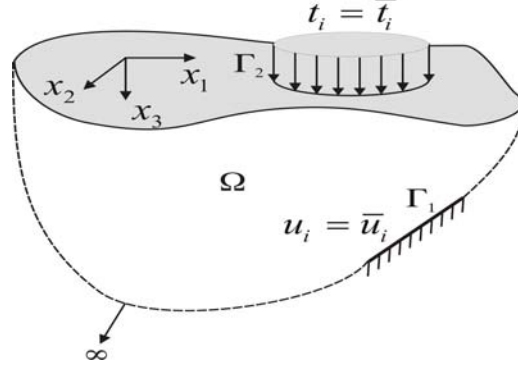
basitleştirilmiş bir şekilde Fourier tanım alanında yazılabilir. Bu sınır integral denklemi elasto-dinamiğin karışık sınır değer probleminin çözümüne imkan sağlamasıyla birlikte, bu tarz mühendislik uygulamalarında sınır elemanlar yönteminin varlığı içinde bir önkoşul olmaktadır.

Bu ifadede  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$  dikkate alınan elastik bölgenin  $\Omega$  sınırlarını gösterirken,

$\tilde{t}_{ik}^*(x, \xi, \omega)$  ve  $\tilde{u}_{ik}^*(x, \xi, \omega)$  terimleri ise sonsuz elastik ortamın herhangi bir  $\xi$  noktasına  $k$  doğrultusunda etki eden birim şiddetli tekil kuvvet nedeniyle, elastik ortamın diğer bir  $x$  noktasında  $i$  doğrultusunda oluşan gerilme ve yerdeğiştirme bileşenlerinin temel çözümleri olarak bilinmektedir. İntegral terimlerinden bağımsız olan  $c_{ik}$  sınır parametresi, Poisson oranına ve birim yüklemenin uygulandığı noktanın ( $\xi$ ) çevresindeki geometrinin düzgünlüğe bağlı değerler almaktadır.

Şekil 2'de verilen sınır terimleri  $u_i = \tilde{u}_i(x, \omega)$  ve  $t_i = \tilde{t}_i(x, \omega)$ , elastik bölgenin sırasıyla  $\Gamma_1$  ve  $\Gamma_2$  yüzeylerinde öngörülen yerdeğiştirmeler ve gerilmeler için kinematik ve dinamik sınır koşullarını göstermektedir. Bu koşullardan birinin tanımlanan sınırlar üzerinde bilinen olarak seçilmiş olması gerekir. Ayrıca dalganın sonsuzluğa yayılması sırasında genişliğinin küçülmesine neden olan ışınal sönümleme (radyasyon), yarı-uzay modelin küresel dış yüzeyinde yerdeğiştirme ve gerilme sınır şartlarının sıfır varsayılacağı sonucunu doğurur. Bundan dolayı yarıküresel dış yüzeyin ayrıklaştırılmasına gerek duyulmamaktadır ve ele alınan problemin çözümünde sayısal yoğunluk azalmaktadır. Frekans bölgesinde çözümlenme, histerik sönüm katsayısının  $\beta$  ile tanımlandığı, kompleks terimli Young modülünün  $\tilde{E} = E(1+i2\beta)$  kullanımıyla, sönümün probleme doğrudan katılmasını sağlamaktadır.





Şekil 2. Elastik Bölgede Tanımlanmış Sınır Koşulları

Sınır integral denkleminin analitik çözümleri oldukça basit mühendislik uygulamaları için mümkün olabilmektedir ve karmaşık türden problemlerin çözümü ancak uygun sayısal çözüm tekniklerinin geliştirilmesiyle elde edilebilmektedir. Yarı sonsuz ortamı ilgilendiren problemlerde sınır integral denkleminin (10) sayısal çözümünü gerçekleştirebilmek için bölge yüzeyinin sınır elemanlarla ayrıklaştırılması yoluna gidilebilir. Bu nedenle  $\Omega$  bölgesinin tümünü çevreleyen sınır üzerindeki integrasyon değeri, her bir elemanın ayrı ayrı kendi sınırları  $\Gamma_e$  üzerinde hesap edilen integral değerlerinin toplamlarıyla elde edilebilir. Burada  $N_e$  toplam sınır eleman sayısını göstermek üzere  $e \in [1, N_e]$  dir. Bu çalışmada, sınır integral çözümünü gerçekleştirebilmek üzere bölge sınırları boyunca gerilmeler ve yerdeğiştirmeler için sabit eleman formülasyonu (izoparametrik elemanlar) kullanılmaktadır. Bu tarz basit mertebeden şekil fonksiyonlarının tercih edilmesinin nedeni, yarı sonsuz ortam davranışını en iyi şekilde temsil edebilmesi, incelenen problem gereği artan bilinmeyen sayısına rağmen işlem hacmini azaltması ve mevcut belleğin ekonomik kullanımını sağlamasıdır. Sabit eleman yaklaşımı, sınır eleman üzerindeki sınır değerlerinin sabit kaldığı ve üç boyutlu durumlarda sınır elemanın eğrisel şeklinin düzlemsel parçalarla idealleştirilebileceği varsayımına dayanmaktadır. Sınır elemanının deplasman yüzeyini  $\mathbf{u}^e$  ve gerilme dağılımını  $\mathbf{t}^e$  tanımlamak üzere seçilen şekil fonksiyonlarının  $\boldsymbol{\varphi}_i$  aynı bu elemanların geometrik formunu tanımlamak içinde kullanılmıştır. Toplam düğüm noktası sayısı  $k$  ile gösterilen  $e$  nolu bir sınır elemanın  $i$  düğüm noktasındaki yerdeğiştirmeleri  $u_i^{(e)}$  ve gerilmeleri  $t_i^{(e)}$  ile ifade edildiğinde, dikkate alınan ayrık elemanın sınır değerlerinin yaklaşık çözümleri,

$$\mathbf{u}^e = \sum_{i=1}^k \boldsymbol{\varphi}_i u_i^{(e)} \text{ ve } \mathbf{t}^e = \sum_{i=1}^k \boldsymbol{\varphi}_i t_i^{(e)} \quad (11a)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_i = \begin{bmatrix} \varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_i \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varphi}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11b)$$

*Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları*

sabit interpolasyon fonksiyonlarından oluşan  $3 \times 3$  mertebeden  $\Phi_i$  matrisine bağlı yazılabilir. Bu durum integral denklem sisteminin daha basit ifade edilmesine imkan sağlar;

$$cu(\xi) = \sum_{e=1}^{N_e} \left( \int \tilde{u}^* \partial \Gamma \right) t^e - \sum_{e=1}^{N_e} \left( \int \tilde{t}^* \partial \Gamma \right) u^e \quad (12)$$

Bu eşitlikte yer alan  $u^e$  ve  $t^e$  vektörlerinin terimleri,  $e$  nolu seçilmiş elemanın her bir ayrıık düğüm noktasına karşı gelen üçer adet yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerinden meydana gelmektedir. Sınır integral bağıntısı lineer denklem sistemine indirgenerek tekrar düzenlendiğinde, sınır elemanlar yönteminin temel denklemi olarak da ifade edilen aşağıdaki matris eşitliği elde edilir;

$$\tilde{U} \tilde{t} = \tilde{T} \tilde{u}; \quad U^1 t^m = T^1 u^m + \sum_{k=1}^{m-1} [T^{(m-k+1)} u^k - U^{(m-k+1)} t^k] \quad (13)$$

Burada  $\tilde{u}$  ve  $\tilde{t}$  vektörleri, sınır elemanların ağırlık merkezinde tanımlanan düğüm noktalarına karşı gelen frekansa bağlı kompleks yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerini göstermektedir.  $\tilde{U}$  ve  $\tilde{T}$  matrisleri ise her bir sınır eleman yüzeyi  $\Gamma^e$  için tanımlanan ve problemin temel çözüm terimlerini içeren katsayılar matrislerinden meydana gelmektedir. Geçerli  $m$ 'inci adım için elde edilen tüm gerilme vektörleri  $t^k$  ( $k=1,2,\dots,m$ ) ve daha önce bulunan yerdeğiştirme vektörleri  $u^k$  ( $k=1,2,\dots,m-1$ ) bir sonraki adımda bilinen büyüklükler olarak ardışık hesaba katılmaktadır. Yukarıda verilen 13 nolu denklem sisteminin terimleriyle ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir:

$$\tilde{U} = \sum_{e=1}^{N_e} \left( \int \tilde{u}^* \partial \Gamma \right) \quad \text{ve} \quad \tilde{T} = c_{ij} + \sum_{e=1}^{N_e} \left( \int \tilde{t}^* \partial \Gamma \right) \quad (14)$$

$$\tilde{u}^* = \begin{bmatrix} u_{11}^* & u_{12}^* & u_{13}^* \\ u_{21}^* & u_{22}^* & u_{23}^* \\ u_{31}^* & u_{32}^* & u_{33}^* \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \tilde{t}^* = \begin{bmatrix} t_{11}^* & t_{12}^* & t_{13}^* \\ t_{21}^* & t_{22}^* & t_{23}^* \\ t_{31}^* & t_{32}^* & t_{33}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

Elastik bölgeyi çevreleyen  $\Gamma_1$  ve  $\Gamma_2$  yüzeyleri için  $u_i = \tilde{u}_i$  ve  $t_i = \tilde{t}_i$  şeklinde sınır koşullarının belirlendiği karışık sınır değer probleminde, bazı sistem değişkenlerinin yerlerinin karşılıklı değiştirilmesi sonucunda, sistem  $u_i$  ve  $t_i$  bilinmeyenleri için çözülebilir. Bundan sonra izlenecek tüm ardışık çözüm aşamalarında (13) nolu matris eşitliği esas alınır ve aranan sınır değerleri her bir  $m$  adımı için gerçekleştirilir. Yarı sonsuz zemin modelinin serbest yüzeyindeki gerilme bileşenlerinin sıfır olduğu varsayımıyla, problemde bu terimler çıkartılır ve nihayetinde temel ortamının kalan serbestlik dereceleri rijit temelin bilinmeyen serbestlik derecelerine indirgenerek basitleştirilmiş olur. Tüm ardışık sayısal işlemlerin sonucunda da rijit kütleli temellerin kompleks dinamik rijitlik matrisi  $K$ , daha önceden Voigt modeli için yapı-zemin ara yüzeyinde verilmiş olan (1) nolu denkleme benzer şekilde türetilir:

$$P = Ku \quad (16a)$$

$$K=MA \quad (16b)$$

$$M=\int_{\Gamma} \phi\phi^T \partial\Gamma \quad A=U^T T \quad (16c)$$

Burada  $u$  rijit temelin yerdeğiştirme bileşenlerini içeren vektörü,  $M$  şekil fonksiyonlarına bağlı dönüşüm matrisini,  $A$  ise bir önceki adımlarda hesap edilen sınır gerilme ve yerdeğiştirme büyüklüklerine bağlı matrisi göstermektedir.

Frekans bölgesinde hesap edilen yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerinin ters Fourier dönüşümleri alınarak zaman bölgesindeki büyüklükleri elde edilir.

#### 4. SAYISAL UYGULAMA

Bu çalışmada, temel-zemin arakesitinin dinamik rijitliğini ve geometrik sönümünü gösteren empedans fonksiyonlarının sayısal değerleri bütün titreşim modları için, radyasyonun önemli olduğu geniş bir frekans aralığında rijit ve dikdörtgen olarak tanımlanan temelin yüzeysel ve gömülü durumları için ayrı ayrı elde edilmiştir.

Frekans bölgesinde gerçekleştirilen çözümde zemin altsisteminin malzeme özellikleri homojen, izotrop ve doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır. Elastik yarı-sonsuz zemin bölgesine oturan rijit kütsüz boyutları  $L_x=2L$  ve  $L_y=2B$  olarak tanımlanmış dikdörtgen bir temel plağının dinamik davranışı, zemin yüzeyinde ortogonal bir ağ oluşturacak şekilde sınır elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

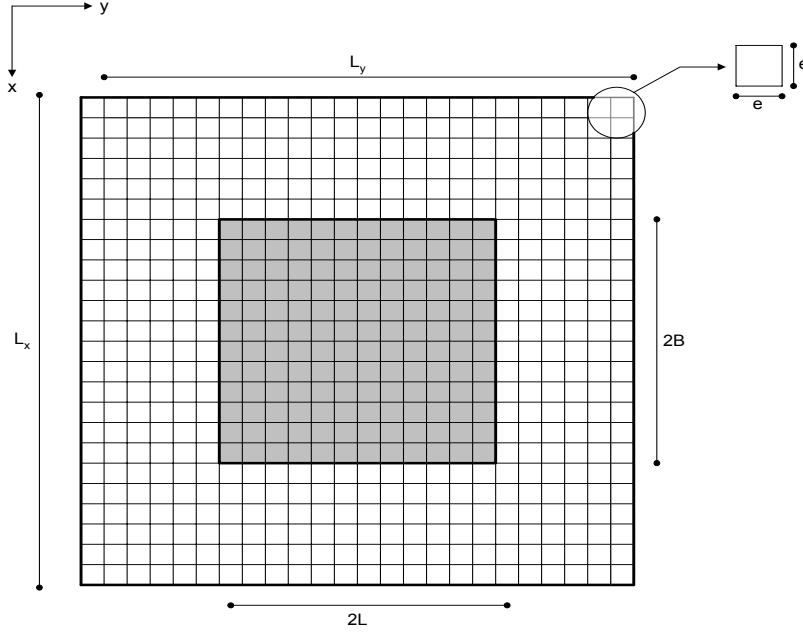
Ayrık düğüm noktalı zemin bölgesinin yüzeyi, boyutları  $L_x=2l_x$  ve  $L_y=2l_y$  olacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 3). Dış bölgenin ayrıklaştırılmasında kullanılan sınır eleman boyutları (burada  $e=1m$ ) Rayleigh tipi yüzeysel dalga boyunun ( $\lambda_R$ ) altıda birinden küçük kalacak şekilde seçilerek sonuçların hassasiyetini etkileyecek etkenler ortadan kaldırılmıştır. Temelin oturduğu zemine ait malzeme özellikleri; zemin yoğunluğu için  $\rho=20 \text{ kN/m}^3$ , malzeme sönümü için  $\beta=0.0$  ve dalga yayılım hızları arasındaki ilişkiyi göstermek için de Poisson oranının  $\nu=1/3$  olması durumunda  $c_p/c_s=2$  olarak verilmiştir.

Bu çalışmada 6 serbestlik derecesine sahip üç boyutlu (3-D) temel sisteminin  $6 \times 6$  mertebesindeki kompleks dinamik rijitlik matrisinin terimleri, bütün titreşim modlarında değerlendirmek üzere yürütülen parametrik araştırmada boyutsuzlaştırılmış titreşim frekansının  $a_0 \in [0, 8]$  geniş aralığında hesap adım sayısı  $\Delta a_0=0.5$  olacak şekilde dikkate alınmıştır. Elastik yarı-sonsuz zemin bölgesine oturan yüzeysel kare temeller için elde edilen boyutsuzlaştırılmış dinamik empedans fonksiyonlarının frekans parametresine bağlı değişiminin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 4’de verilmiştir. Genel olarak etkin titreşim modları için elde edilen rijitlik ve sönüm katsayılarının analitik çözümlerle uyum içerisinde olması önerilen modelin yeterliliğini göstermektedir.

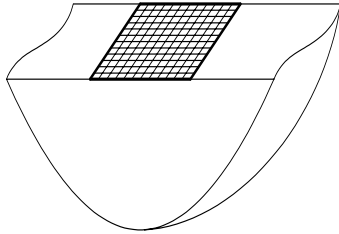
Dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak yüzeysel temeller için  $L/B$  oranı, gömülü temelleri için ise  $D$  temel derinliği göstermek üzere  $D/B$  oranı seçilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında temel boyutlarındaki değişim oranının ( $L/B=1,2,\dots,5$ ) empedans fonksiyonlarının üzerindeki etkisi bütün titreşim modları için Poisson oranının  $\nu=0.33$  değerine göre boyutsuz titreşim frekansına  $a_0$  bağlı olarak incelenmiştir (Şekil 5).

Poisson oranının ( $\nu=0, 0.25,\dots,0.5$ ) yüzeysel kare temellerin empedans fonksiyonları üzerindeki etkisi Şekil 6’da gösterilmiştir. Ayrıca  $L/B=1$  ve  $\nu=0.33$  koşulları altında temellerin gömülme oranına ( $D/B=0, 1/3,\dots,4/3$ ) bağlı olarak empedans fonksiyonlarının frekans parametresine bağlı değişimleri elde edilmiştir (Şekil 7).

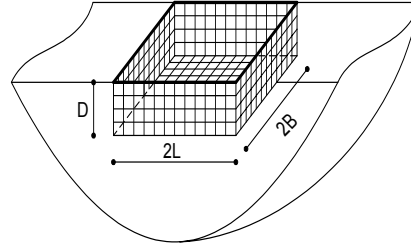
*Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları*



*(a) Temel-zemin modeli*

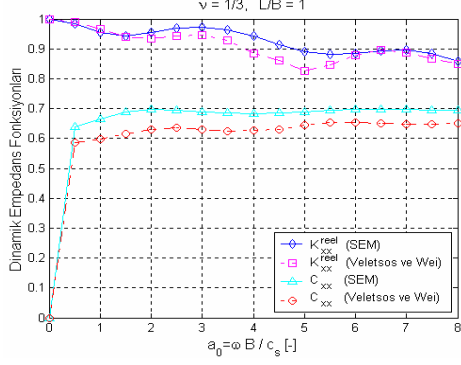


*(b) Yüzeysel temel modeli*

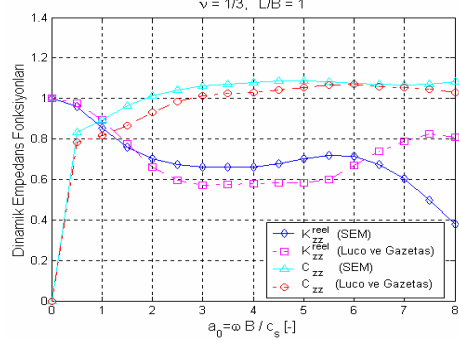


*(c) Gömülü temel modeli*

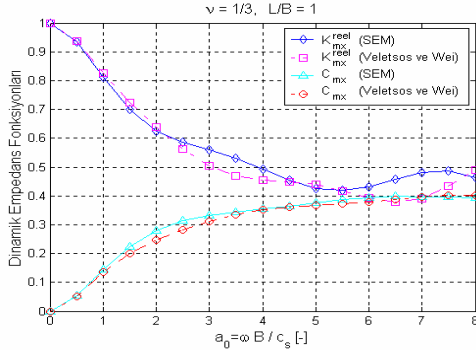
*Şekil 3. Elastik yarı-uzay zeminde temel ortamının sınır elemanlarla ayrıklaştırılmış modelleri*



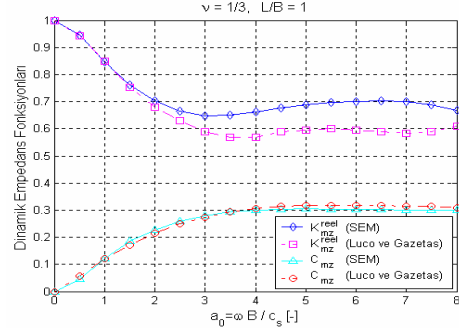
(a) Yatay öteleme titreşim modu



(b) Düşey öteleme titreşim modu



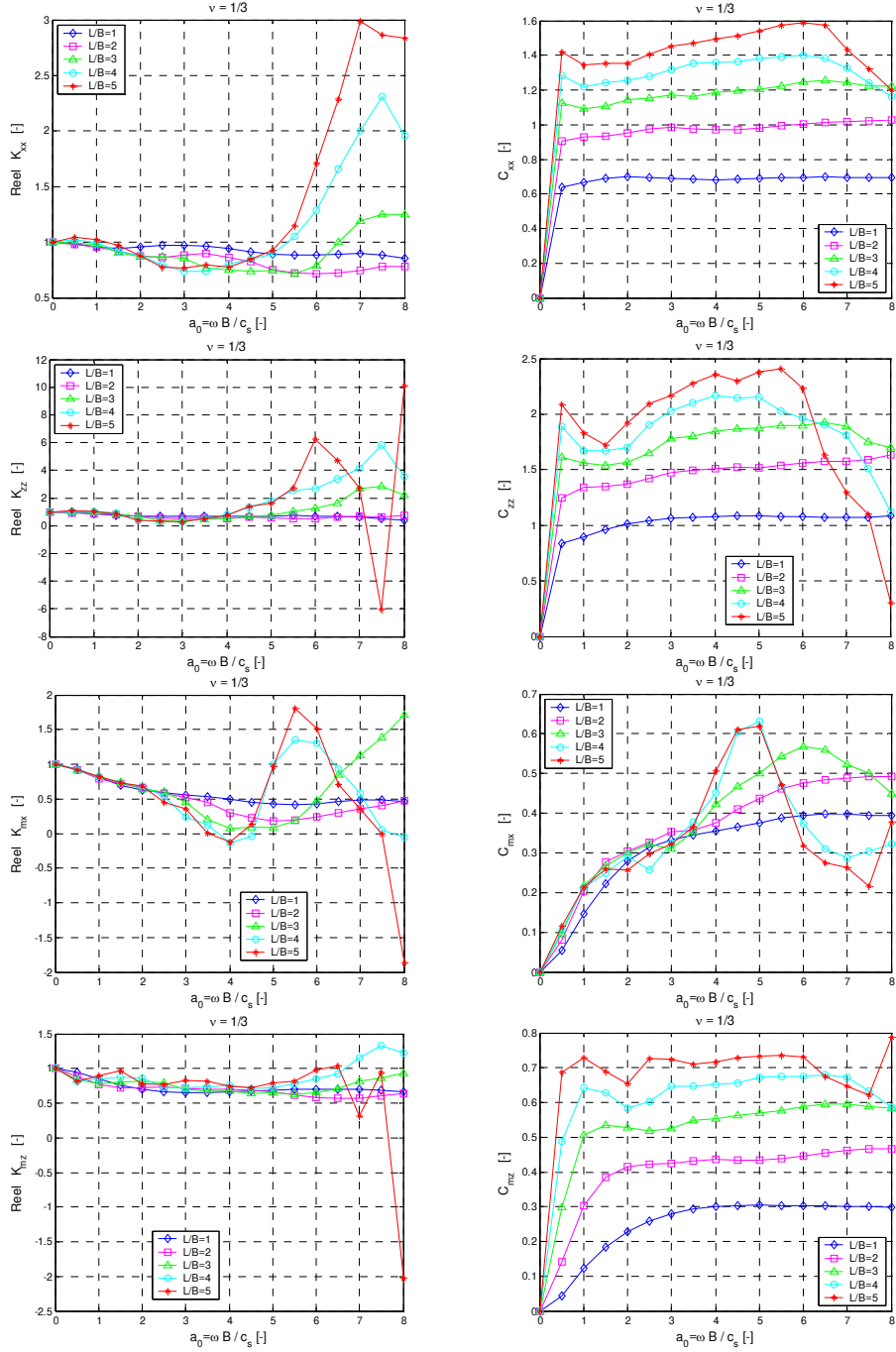
(c) Eğilme titreşim modu



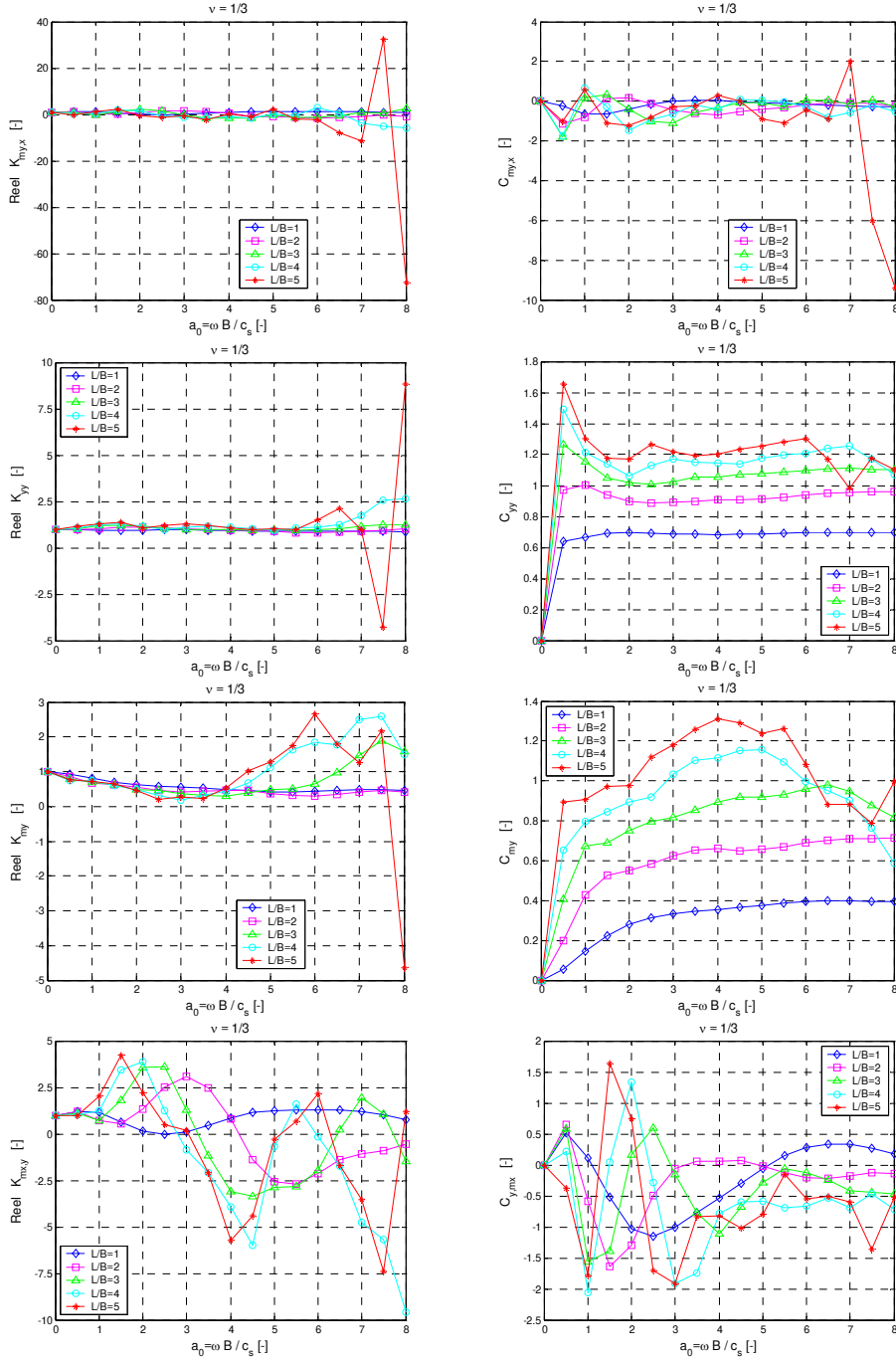
(d) Burulma titreşim modu

Şekil 4. Elastik yarı-sonsuz zemin bölgesine oturan yüzeysel kare temeller için elde edilen boyutsuzlaştırılmış dinamik empedans fonksiyonlarının frekans parametresine bağlı değişiminin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması

Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları

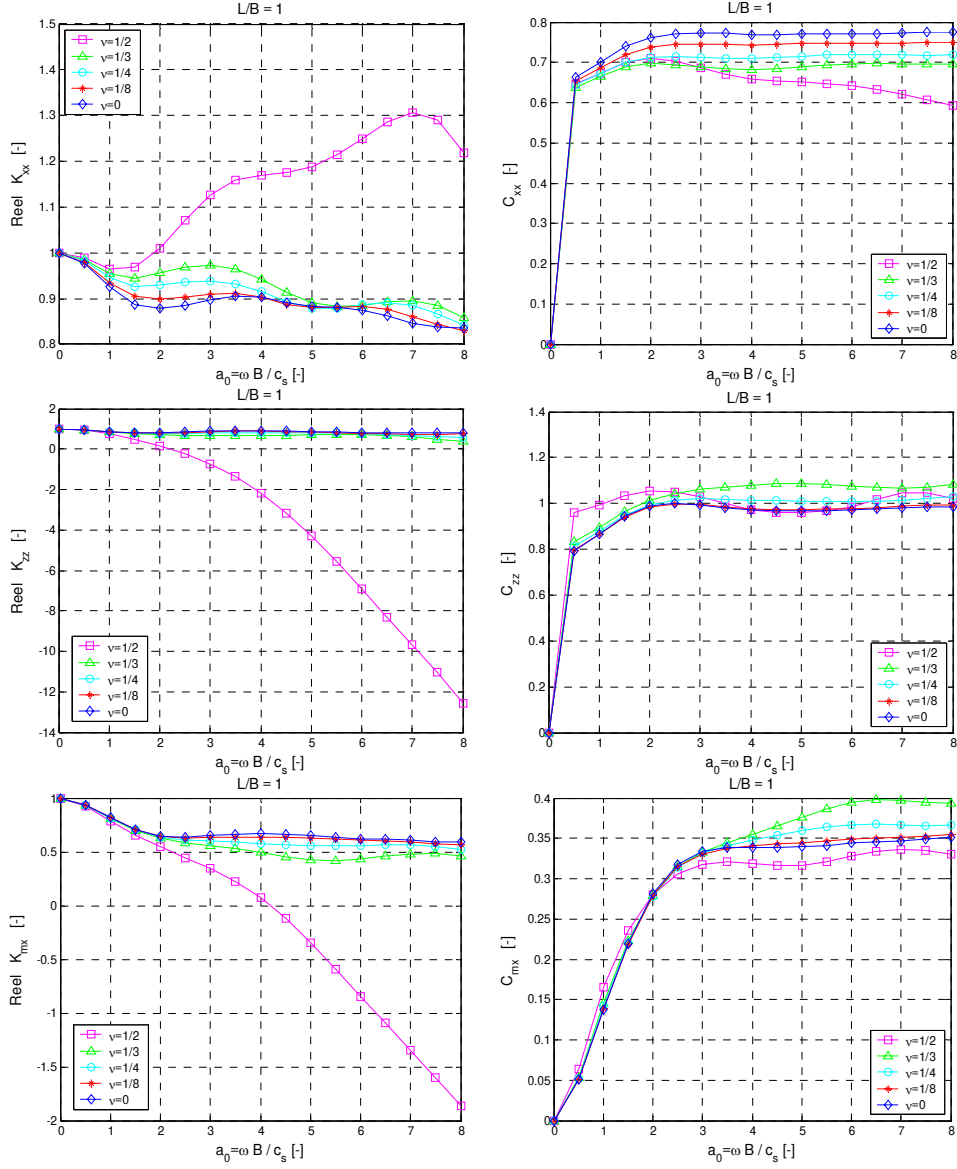


Şekil 5. Yarı-sonsuz zemin bölgesine oturan yüzeysel dikdörtgen tipteki rijit temeller için elde edilen rijitlik ve sönüm katsayılarının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi



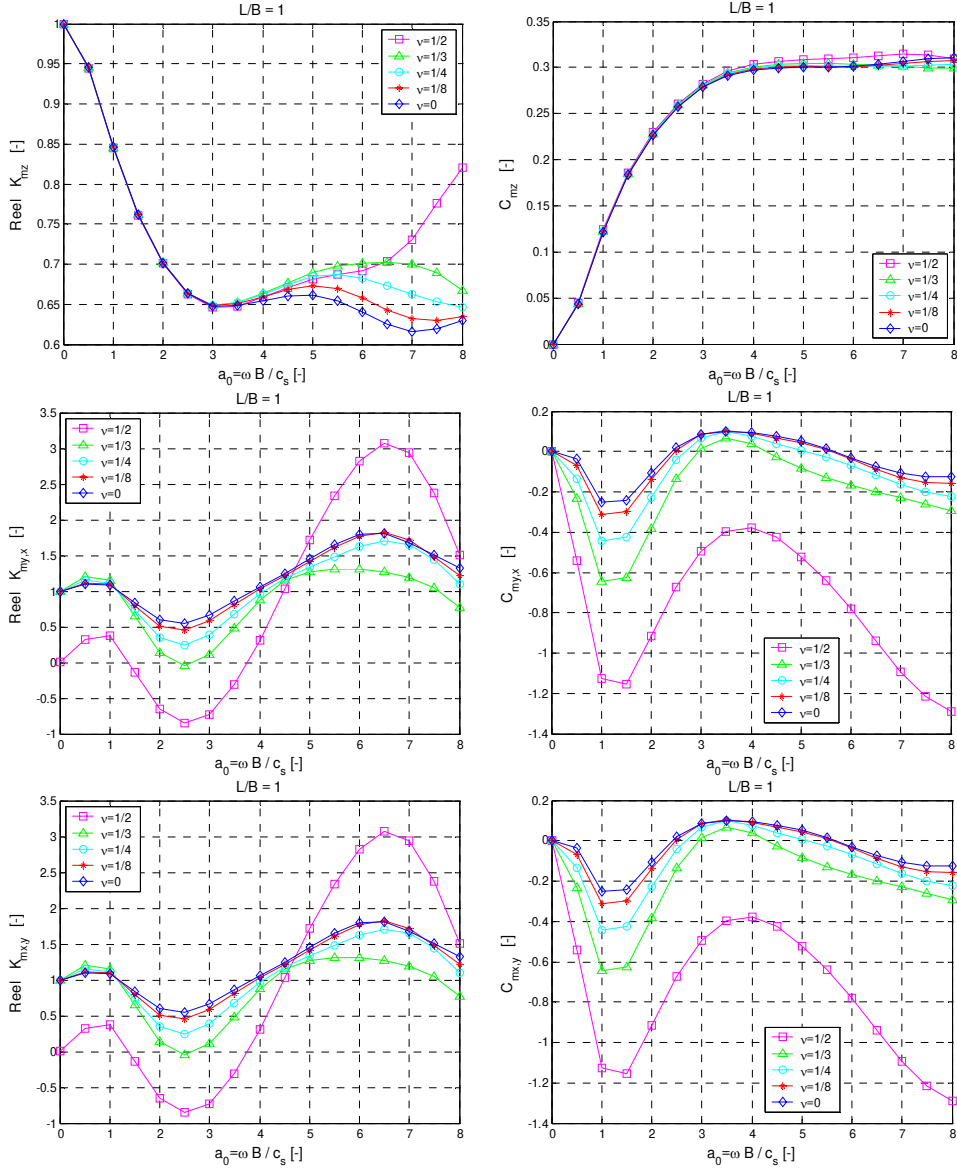
Şekil 5'in devamı

*Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları*



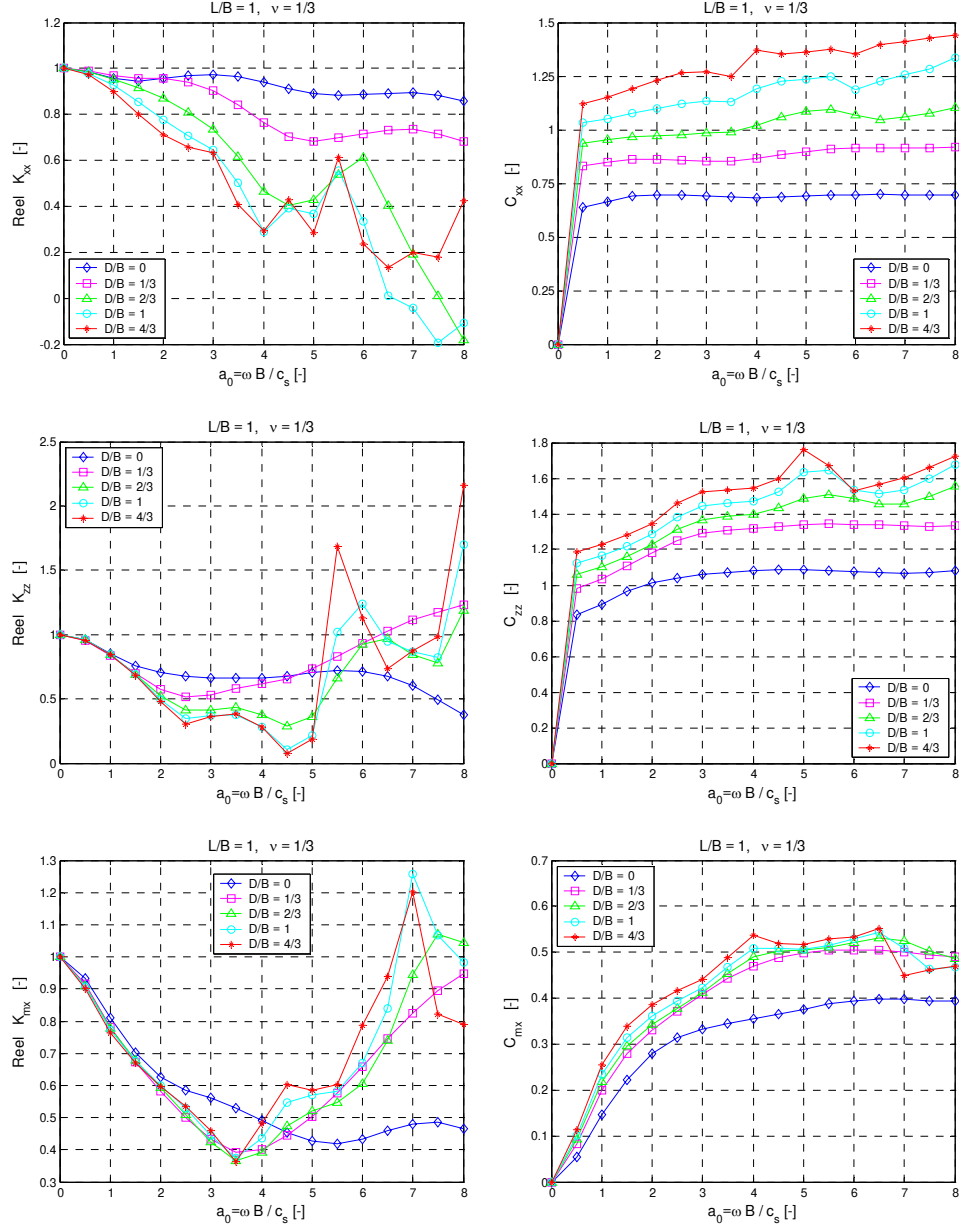
*Şekil 6. Yarı-sonsuz zemin bölgesine oturan yüzeysel kare tipteki rijit temellerin farklı Poisson oranları için elde edilen rijitlik ve sönüm katsayılarının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi*



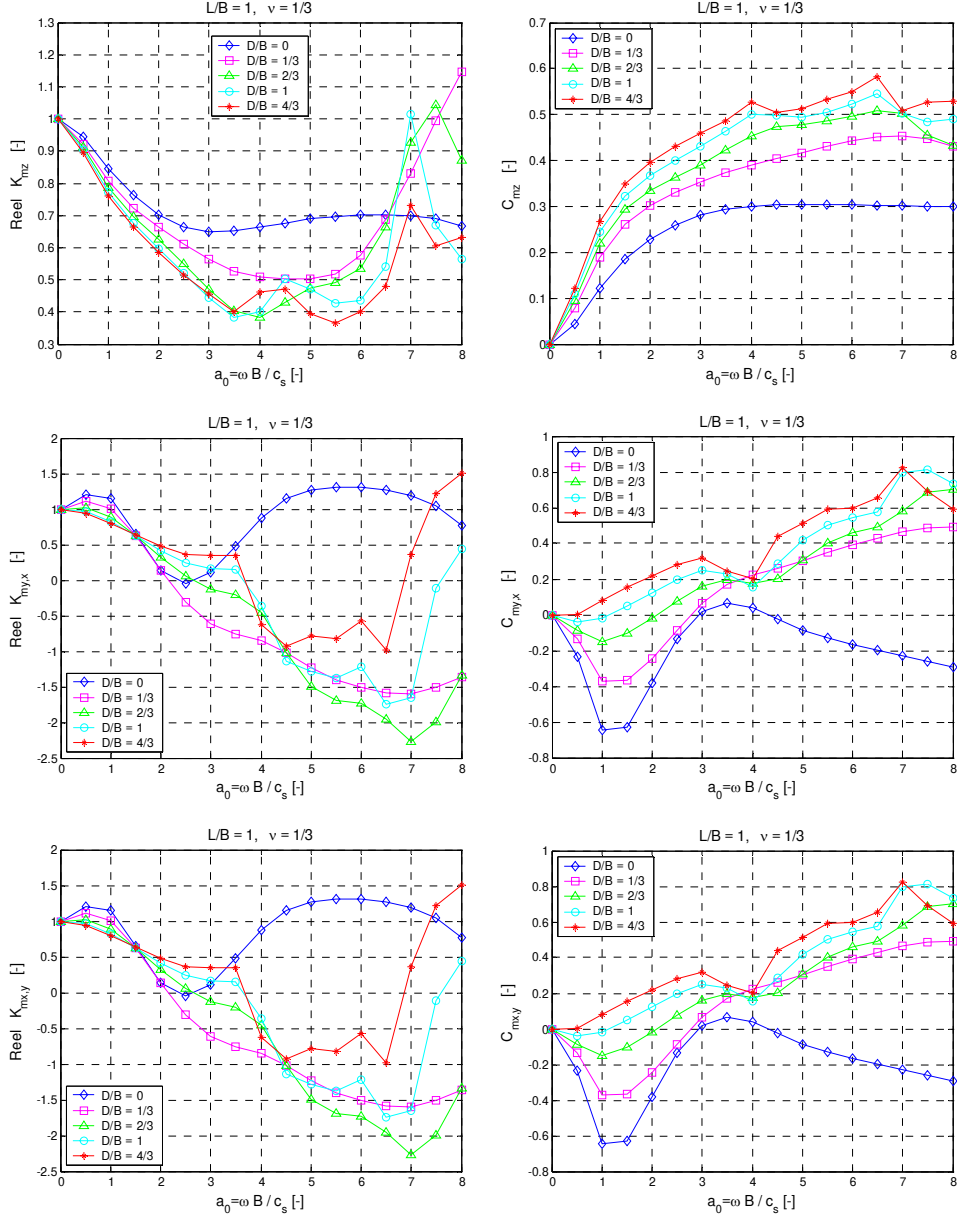


Şekil 6'nın devamı

*Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları*



*Şekil 7. Yarı-sonsuz zemin bölgesine oturan gömülü kare tipteki rijit temellerin farklı gömülme oranları için elde edilen rijitlik ve sönüm katsayılarının boyutsuz frekans parametresine bağlı değişimi*



Şekil 7'nin devamı

Çeşitli kontrol parametrelerine bağlı kapsamlı parametrik araştırma ve sistematik hesaplamalar yürütülerek temel-zemin sisteminin dinamik davranışı incelenmiştir. Rijit dikdörtgen temellerin yüzeysel ve gömülü olma durumlarına göre hesaplanan dinamik

### *Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları*

empedans değerlerinin pratiğe dönük sonuçları ve önemli karakteristikleri aşağıda özetlenmiştir:

- (1) Kare ve dikdörtgen temellerin dinamik davranışları bir çok titreşim modu için farklılıklar göstermektedir. Özellikle, yatay öteleme ve burulma titreşim modlarında  $L/B$  oranı arttıkça (şerit temel geometrisine yaklaştıkça) temelin rijitliği ve sönümü artmaktadır. Buna karşın, özellikle düşey titreşim modunun orta frekans ( $0 \leq a_0 \leq 5$ ) aralığında temelin geometrisinin dinamik empedans değerleri üzerindeki etkisi görülmemektedir. Eğilme titreşim modunda ise rijitlik ve sönüm harmonik zorlamanın doğrultusuna bağlı olarak değişmektedir. Bununla beraber, yüksek frekans değerlerinde ( $a_0 \leq 5$ )  $L/B$  oranına bağlı olarak rijitlik büyük oranda artmaktadır.
- (2) Genel olarak yüzeysel temelerde ( $L/B=1$ ) Poisson oranı değişiminin yay rijitliği üzerindeki etkisinin, geometrik sönüm etkisine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Bu eğilim yüksek frekans değerlerinde daha da belirginleşmektedir. Bu etkinin varlığını bütün titreşim modlarında görebilmek ancak Poisson oranının  $\nu=1/3$  den büyük değerlerinde mümkün olmaktadır. Özellikle Poisson oranının  $\nu=1/2$  değeri için öteleme, dönme ve öteleme-dönme rijitliklerinde yüksek frekans değerlerine doğru azalan bir eğilim ortaya çıkmaktadır.
- (3) Gömülü kare temellerin bütün titreşim modlarında elde edilen rijitlik katsayıları, boyutsuz frekans parametresine bağlı değişmektedir. Bu eğilim özellikle yüksek frekans değerlerinde artmaktadır. Sadece yüzeysel temel durumunda ( $D/B=0$ ), yatay öteleme rijitliği  $K_{xx}$  ve dönme-yatay öteleme rijitliği  $K_{my,x}$  frekansa bağlı olarak değişmemektedir. Ayrıca yanal titreşim modunda, gömülü temellerin rijitlik katsayılarının yüzeysel temellerle karşılaştırıldığında, özellikle orta ile yüksek frekans aralığında daha küçük değerler aldığı görülmektedir. Bu özel durum, temelin zemine gömülme oranının empedans fonksiyonlarını artırdığı genel kuralına bir ayrıcalık getirmektedir. Rijitlik katsayılarının frekans parametresi  $a_0$  ile birlikte azalması, yanal titreşimlerden daha çok düşey titreşimler için ciddi bir durum oluşturmaktadır.
- (4) Yatay yerdeğiştirme ile momenti birbirine bağlayan fleksibilite katsayısının gömülme arttıkça azalması, rijitlik açısından bu iki serbestlik derecesi arasındaki etkileşimin tersine gömülme ile arttığını göstermektedir. Yüzeysel temelerde bu etkileşim terimi ihmal edilecek derecede küçük değerlerde kalmıştır. Ayrıca bu etkileşim terimi  $K_{my,x}$ , gömülü temel durumu için yüksek frekanslarda negatif değerler de almaktadır. Buna benzer durum yarı uzay zemin modeline oturan dairesel temel örnekleri için de elde edilmiştir [12]. Gömülmenin en fazla moment - dönme ve moment - burulma ilişkisini etkilediği görülmektedir.
- (5) Gömülü temelerde ( $D/B=4/3$ ) düşey rijitlik önemli derecede frekans parametresinin küçük değerleri ( $a_0 < 3$ ) için azalırken, yüzeysel temelerde bu rijitlik değişimi sabit bir değere yönelmektedir. Bazı çalışmalarda [13] her iki temel durumu için düşey rijitlik değişiminin frekanstan bağımsız varsayımı yapılmış olsa da, sıkışmaz zeminlere uygulanan derin temel örneklerinde bu

kabulü uygulamak özellikle orta ile yüksek frekans aralığında uygun düşmemektedir.

- (6) Temelin zemine gömülme oranı arttıkça rijitlik katsayılarının hem gerçel, hem de sanal kısımları artmaktadır. Ters anlamda düşünülürse rijitlik matrisinin tersi olan fleksibilite matrisinin elemanları temelin zemine gömülmesi ile orantılı olarak küçülmüş olacaktır. Yapı temeli ile zemin değme yüzeyinin gömülme derinliği ile birlikte artması sönüm etkisini büyütmemektedir. Yani üstyapıdan zemine doğru yayılan dalgalar sınırsız zemin ortamında geri dönmeyip, sistemde bir enerji kaybına neden olmaktadır. Bu enerji kaybı frekansa bağlı değiştiğinden ek bir viskoz sönüm etkisine karşı gelmektedir. Bu nedenle gömülü temellerde zeminin rijitliğini gösteren yay etkisi ve bu ışınsal sönümlemeye eşdeğer anlamda karşı gelen geometrik sönüm etkisi yüzeysel temellere göre daha kuvvetli olduğu hemen hemen bütün titreşim modlarında açıkça görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kapsamlı ve sistematik bir parametrik araştırma yürütülerek elastik yarı-sonsuz zemine oturan rijit dikdörtgen temel plağının dinamik davranışı, altsistem formülasyonu içerisinde sınır elemanlar yöntemiyle geliştirilen matematik model kullanılarak incelenmiş ve temel ortamının dinamik rijitliğini tanımlayan empedans değerleri temelin yüzeysel ve gömülü durumları için ayrı ayrı geniş bir frekans aralığı için elde edilmiştir. Ayrıca bütün titreşim modları için elde edilen boyutsuzlaştırılmış rijitlik ve sönüm katsayıları analitik çözüme dayanan literatür sonuçlarıyla karşılaştırılarak önerilen modelin yeterliliği gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçlar, geoteknik deprem mühendisliği alanında yapı-zemin dinamik etkileşiminin dahil edildiği ileri düzey problemlerin deprem analizinde, farklı temel uygulamaları gerçekleştirebilmek ve yapı mühendislerine bu tip problemlerin çözümlerinde temel dinamiği hakkında yeterli bilgiler sunmak üzere önem taşımaktadır.

## TEŞEKKÜR

Birinci yazar Bochum-Ruhr üniversitesinde doktora sonrası araştırma çalışmasını gerçekleştirebilmek için BAYG (Bilim Adamı Yetiştirme Grubu) tarafından sağlanan maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini bildirir.

## SEMBOLLER

$A$	: Sınır yerdeğiştirme ve gerilme vektörlerine bağlı kısaltma matrisi
$a_0$	: Boyutsuz titreşim frekansı
$B$	: Dikdörtgen temelin yarı genişliği
$c_s$	: Zemin kayma dalga hızı
$c_p$	: Zemin Basınç dalga hızı
$c_\alpha$	: $\alpha$ titreşim moduna karşı gelen boyutsuz sönüm katsayısı
$c_{ik}$	: Sınır integral çarpanı
$D$	: Temel derinliği
$\bar{E}$	: Kompleks terimli Young modülü

### Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans Fonksiyonları

$F_N$	: Ayrık Fourier dönüşümünü gösteren simge
$\mathbf{f}$	: Dinamik fleksibilite matrisi
$f_i$	: Kartezyen koordinat sisteminin i nci doğrultusundaki kütle kuvveti
$G$	: Kayma modülü
$\mathbf{K}$	: Sisteme veya bir bölgesine ilişkin rijitlik matrisi
$K_{s\alpha j}$	: Elastik yarı uzayın j nci titreşim moduna karşı gelen statik rijitlik
$K_\alpha$	: $\alpha$ titreşim moduna karşı gelen empedans fonksiyonu
$k_\alpha$	: $\alpha$ titreşim moduna karşı gelen boyutsuz rijitlik katsayısı
$L$	: Temelin yarı uzunluğu
$\mathbf{M}$	: Şekil fonksiyonlarına bağlı dönüşüm matrisi
$N_e$	: Toplam sınır eleman sayısı
$\alpha = x, y, z$	: İlgili eksenlere karşı gelen yatay ve düşey öteleme titreşim modları
$\alpha = mx, my, mz$	: İlgili eksenler etrafındaki eğilme ve burulma titreşim modları
$\mathbf{P}$	: Etkileşim arayüzündeki kuvvetleri gösteren vektör
$r$	: Dairesel temelin yarıçapı
$u_{ox}, u_{oy}, u_{oz}$	: Temel plağının öteleme yerdeğiştirme bileşenleri
$\mathbf{u}$	: Rijit temel hareketinin yerdeğiştirme vektörü
$\alpha$	: Titreşim modu değişkeni
$\beta$	: Yapısal sönüm
$\phi$	: Sabit interpolasyon fonksiyonları
$\rho$	: Kütleli yoğunluk
$\nu$	: Poisson oranı
$\omega$	: Açısal frekans
$\Omega$	: Elastik bölgeyi gösteren simge
$\gamma_{ox}, \gamma_{oy}, \gamma_{oz}$	: Temel plağının dönme bileşenleri
$\tilde{f}_k$	: $\omega$ açısal frekanslı bir harmonik hareketin kompleks kuvvet genliği
$\tilde{\mathbf{T}}$	: Gerilmeler için temel çözüm terimlerini içeren katsayılar matrisi
$\tilde{t}_i(x, \omega)$	: Elastik bölgenin yüzeyinde öngörülen gerime sınır koşulları
$\tilde{u}_k$	: $\omega$ açısal frekanslı bir harmonik hareketin kompleks yerdeğiştirme genliği
$\tilde{u}_i(x, \omega)$	: Elastik bölgenin yüzeyinde öngörülen yerdeğiştirme sınır koşulları
$\tilde{\mathbf{U}}$	: Yerdeğiştirmeler için temel çözüm terimlerini içeren katsayılar matrisi
$\Gamma_1, \Gamma_2$	: Elastik bölgenin sınırları
$\Gamma_e$	: $e$ nolu elemanın sınırları

### Kaynaklar

- [1] Dominguez, J., Roesset, J. M., Dynamic Stiffness of Rectangular Foundations, MIT Research Report, R. 78-20, 1978.
- [2] Mita A., Luco J. E., Dynamic Response of a Square Foundation Embedded in an Elastic Half-Space, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 8, 54-67, 1989.
- [3] Gazetas G., Tassoulas J. L., Horizontal Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 440-457, 1987a.

- [4] Gazetas G., Tassoulas J. L., Horizontal Damping of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 113, 458-475, 1987b.
- [5] Apsel, R. J., Luco, J. E., Impedance Functions for Foundations embedded in a Layered Medium: an Integral Equation Approach, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15, 213-231, 1987.
- [6] Wolf, J. P., Song, C., *Finite Element Modelling of Unbounded Media*, John Wiley & Sons, 1997.
- [7] Bu, S, Impedance Functions of Square Foundations Embedded in an Incompressible Half-Space, *Engineering Analysis with Boundary Element*, Elsevier, 22, 1-11, 1998.
- [8] Bu, S., Lin, C. H., Coupled Horizontal-Rocking Impedance Functions For Embedded Square Foundations at High Frequency Factors, *Journal of Earthquake Engineering*, 3, No. 4, 561-587, 1999.
- [9] Tsai, N. C., Niehoff, D., Swatta, M., Hadjian, A. H. The Use of Frequency Independent Soil-Structure Interaction Parameters, *Nuclear Engineering and Design*, 31, 168-183, 1974.
- [10] Cruse, T. A., Rizzo, F. J., A Direct Formulation and Numerical Solution of the General Transient Elastodynamic Problem I, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 22, 244-259, 1968.
- [11] Dominguez, J., *Boundary Elements in Dynamics*, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1993.
- [12] Veletsos, A. S., Wei, Y. T., Lateral and Rocking Vibration of Footings, *Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, 97, 1227-1248, 1971.
- [13] Pais, A., Kausel, E., Approximate Formulas for Dynamic Stiffnesses of Rigid Foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7, 213-227, 1988.