

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ  
ÜSTYAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN EMPEDANS  
FONKSİYONLARINA DAYALI ÇÖZÜMÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş.Müh. Umut MALTAŞ**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ**

**Temmuz 2008**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

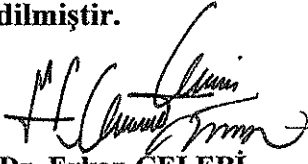
**DİNAMİK YÜKLER ETKİSİ ALTINDAKİ  
ÜSTYAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN EMPEDANS  
FONKSİYONLARINA DAYALI ÇÖZÜMÜ**

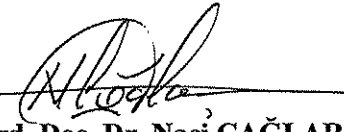
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş.Müh. Umut MALTAŞ**

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 16/07/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ  
Jüri Başkanı

  
Yrd. Doç. Dr. Naci ÇAĞLAR  
Üye

  
Doç. Dr. Seyhan FIRAT  
Üye

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli bilgi, birikim ve yardımlarını esirgemeyen, çalıőmalarımı her aşamada izleyip değerlendirerek yön veren ve her türlü desteği sağlayan hocam sayın Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye minnet ve őükranlarımı sunarım. Ayrıca çalıőmalarımda bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen değerli ablam, hocam ve de dostum olarak sürekli yardımına koőan bu çalışmada beraber çalıőtıęımız Arő. Gör. Dilek MERCAN ERYILMAZ'a, hocam Yrd. Doç. Dr. Naci ÇAğLAR'a, benden yardımlarını esirgemeyen araştırma görevlileri Osman KIRTEL, Zeynep DERE YAMAN, Elif DOğAN ve Elif ORAK'a teőekkürlerimi sunarım. Bu çalışma sırasında bana her türlü kolaylığı sağlayan Karayolları 5. Bölge Asfalt Baőmühendisi Mehmet BİLGİLİ ve çalışma arkadaşlarıma da teőekkürlerimi sunarım. Eğitim-öğretimim boyunca beni teővik eden, maddi ve manevi hiçbir őeyi esirgemeyen sevgili anne ve babam őervet-Abdulhalim MALTAş'a ve kardeőlerime desteklerinden dolayı teőekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. İlgili Çalışmalar.....	3
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	8
BÖLÜM 2.	
SİNÜZOİDAL YANAL YÜKLERE MARUZ YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN HAREKET DENKLEMİNİN GENEL YAPISI.....	9
2.1. Statik Genliğini Doğrusal Arttıran Sinüzoidal Yanal Yüklere Maruz Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Kararlı Titreşimlerinin İncelenmesi ve Bilgisayar Destekli Çözüm Yaklaşımı.....	9
2.1.1. Sönümsüz tek serbestlik dereceli (TSD) sistemin harmonik yük altındaki davranışının incelenmesi.....	9
2.1.2. Sönümlü tek serbestlik dereceli (TSD) sistemin harmonik yük altındaki davranışının incelenmesi.....	15
2.1.3. Sönümlü çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemin harmonik yük altındaki davranışının incelenmesi.....	23

2.2. Zemin Alt Sistemi ve Empedans Analizi.....	28
2.2.1. Empedans fonksiyonları (Dinamik rijitlik).....	28
2.2.2. Hareket denklemlerinin genel yapısı.....	30
BÖLÜM 3.	
SAYISAL MODEL VE NÜMERİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ.....	34
3.1. Tabakalı Zemin Durumu İçin Kayma Dalga Hızına Bağlı Değişen Empedans Fonksiyonlarında Rijitlik Değerlerinin Değişimi.....	36
3.2. TSD ve ÇSD Düzlem Çerçeve Sistemlerin Dinamik Büyültme Çarpanlarının ve Yerdeğiştirmelerinin Değişen Empedans Fonksiyonlarına Dayalı İncelenmesi.....	51
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	71

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$a_0$	: Boyutsuz frekans parametresi
$B, L$	: Temel boyutları
$c_s$	: Kayma dalgası yayılma hızı
$c_1, c_2, c_3$	: Elastik yarı sonsuz düzlemin sönüm sabitleri
$c_\alpha$	: Boyutsuz sönüm katsayısı
$\mathbf{C}$	: Sönüm matrisi
ÇSD	: Çok serbestlik dereceli sistem
$D$	: Temelin gömülme derinliği
$R_d$	: Dinamik büyültme çarpanı
$E$	: Elastisite modülü
$f$	: Frekans
$G$	: Zeminin kayma modülü
$H_i$	: Zemin tabaka kalınlığı
Hz	: Hertz
$k_1, k_2, k_3$	: Elastik yarı sonsuz düzlemin rijitlik sabitleri
$k_\alpha$	: Boyutsuz rijitlik katsayısı
$\mathbf{K}$	: Rijitlik matrisi
$m$	: Kütle
$\mathbf{M}$	: Kütle matrisi
$P$	: Kuvvet
$P_0$	: Dış yükün karakteristik büyüklüğü
$P_j$	: $j$ noktasına etkiyen dış kuvvet
$\rho$	: Zeminin yoğunluğu
$[\phi]$	: Modal matrisi
$r$	: Temel yarıçapı

SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
T	: Periyot
t	: Zaman
TSD	: Tek serbestlik dereceli sistem
$u_i$	: Yatay yerdeğiştirme
$u_x, u_y$	: x ve y doğrultularındaki ötelenme yerdeğiştirmeleri
$u_h$	: Homojen çözüm
$u_p$	: Özel çözüm
$u_{st}$	: Statik yerdeğiştirme
$\ddot{u}_g$	: Eşdeğer yer ivmesi
$\tilde{u}_{ox}, \tilde{u}_{oy}, \tilde{u}_{oz}$	: x, y, z doğrultularında ötelenme yerdeğiştirmelerinin fourier genlikleri
$\nu$	: Poisson oranı
$\omega$	: Yapının açısal frekansı
$\bar{\omega}$	: Dış yükün açısal frekansı
$\omega_D$	: Sönümlü hareketin dairesel frekansı
YSA	: Yapay sinir ağları
$\xi$	: Sönüm katsayısı
$\beta$	: Zeminin malzeme sönümü
$\tilde{\gamma}_{ox}, \tilde{\gamma}_{oy}, \tilde{\gamma}_{oz}$	: x, y, z doğrultularında eğilme dönmelerindeki fourier genlikleri

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Elastik yarı uzaya oturan dikdörtgen temellerin, yüzeysel ve gömülü olma durumlarına bağlı olarak yapılmış araştırmalar.....	4
Şekil 1.2.	Elastik yarı uzaya oturan dairesel temellerde, yüzeysel ve gömülü olma durumlarına bağlı olarak dinamik rijitliklerin frekansa göre değişimlerinin incelenmesi.....	5
Şekil 1.3.	Zeminin tabaka kalınlıklarına bağlı olarak dairesel temellerin yüzeysel ve gömülü olma durumları dikkate alınarak yapılmış araştırmalar.....	5
Şekil 1.4.	Elastik yarı uzaya oturan dairesel temellerin zeminin tabaka kalınlıklarına dikkate alınarak yüzeysel ve gömülü olma durumlarına bağlı yapılmış araştırmalar.....	6
Şekil 1.5.	Elastik yarı uzaya oturan şerit temellerde, gömülme derinliğine bağlı olarak yapılmış araştırmalar.....	6
Şekil 1.6.	Zemin tabaka kalınlıkları dikkate alınarak şerit temellerin yüzeysel ve gömülü olma durumları dikkate alınarak yapılmış araştırmalar.....	7
Şekil 2.1.	Sönümsüz tek serbestlik dereceli (TSD) yapı modeli.....	9
Şekil 2.2.	Sönümsüz tek serbestlik dereceli (TSD) sistemde yapı davranışı.	15
Şekil 2.3.	Sönümlü tek serbestlik dereceli (TSD) yapı modeli.....	16
Şekil 2.4.	Sönümlü çok serbestlik dereceli (ÇSD) yapı modeli.....	23
Şekil 2.5.	Elastik yarı uzayda rijit cisim modeli.....	30
Şekil 3.1.	Tabakalı zemin ortamına ait yapı-zemin ortak modeli.....	35
Şekil 3.2.	Tabakalı zemin durumu için kayma dalga hızına bağlı olarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine bağlı değişimi.....	38



Şekil 3.3.	Tabakalı zemin durumu için zeminin kayma dalga hızına bağlı olarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine bağlı değişimi.....	42
Şekil 3.4.	Tabakalı zemin durumu için kayma dalga hızına bağlı olarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin L/B oranına bağlı değişimi.....	49
Şekil 3.5.	Tek katlı düzlem çerçeve sistemin yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine bağlı olarak dinamik büyütme çarpanının dış yükün açısıl frekansına bağlı değişimi.....	51
Şekil 3.6.	Tek katlı düzlem çerçeve sistemin en büyük tepe yanal yerdeğiştirmesi, en büyük taban kesme kuvveti ve en büyük devrilme momentinin zemin özellikleri dikkate alınarak dış yükün açısıl frekansına bağlı değişimi.....	54
Şekil 3.7.	Tek katlı yapı sisteminin en büyük yanal yerdeğiştirmelerinin dış yükün farklı frekanslarına bağlı değişimi.....	55
Şekil 3.8.	Ana kaya tabanlı değişken zemin özelliklerine sahip farklı temel gömülme derinliklerindeki düzlem çerçeve sistemin dinamik büyütme çarpanının açısıl titreşim frekansına bağlı değişimi.....	57
Şekil 3.9.	Çok katlı düzlem çerçeve sistemin değişken zemin özelliklerine bağlı farklı temel gömülme derinlikleri dikkate alınarak dinamik büyütme çarpanının açısıl titreşim frekansına bağlı değişimi.....	60
Şekil 3.10.	Çok katlı düzlem çerçeve sistemin yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine bağlı olarak dinamik büyütme çarpanının dış yükün farklı değerdeki frekanslarına bağlı değişimi.....	62
Şekil 3.11.	Çok katlı düzlem çerçeve sistemin yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine bağlı olarak dinamik büyütme çarpanının dış yükün açısıl frekansına bağlı değişimi.....	63
Şekil 3.12.	Çok katlı düzlem çerçeve sistemin en büyük tepe yanal yerdeğiştirmesi ve en büyük taban kesme kuvvetinin yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine ve dış yükün açısıl frekansına bağlı değişimi.....	65

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Yapı-zemin dinamik etkileşimi, Empedans fonksiyonları, Dinamik büyütme faktörü

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümü için frekanstan bağımsız sabit katsayılı empedans katsayıları gömülü ve yüzeysel temel durumları için kullanılmıştır. Üstyapının dinamik davranışını ifade eden dinamik büyütme çarpanının ( $R_d$ ) zemin rijitliğine bağlı değişimi ve üstyapı temelinin oturduğu ortamın tabakalı zemin olması durumunda tabaka kalınlığının  $R_d$ 'ye etkisi dış yükün titreşim frekansına bağlı olarak gösterilmiştir. Ayrıntılı parametrik araştırmalar ve sistematik hesaplamalar farklı kontrol parametrelerine bağlı yürütülerek dinamik yükler etkisi altında titreşen yapı-zemin ortak sisteminin yapısal davranışı incelenmiştir.

# **IMPEDANCE FUNCTIONS FOR SOLUTION OF SOIL STRUCTURE COUPLING SYSTEM UNDER DYNAMIC LOADS**

## **SUMMARY**

Key Words: Soil-structure interaction, Impedance functions, Dynamic magnification factor

In this study, the frequency independent values of impedance functions are considered in the analysis of dynamic soil-structure interaction problems for both surface-supported and embedded foundations on elastic half space and layered strata. The dynamic response of the superstructure which is determined by dynamic magnification factor is also investigated depending on stiffnesses of local soil and depth of layered media for a wide range of excitation frequency. A comprehensive parametric analysis and systematic calculations are accomplished with different controlling parameters to evaluate the structural response of the vibrating soil-structure system under dynamic loads

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Problemin Tanımı

Artan nüfus ve gelişen teknoloji beraberinde birçok ihtiyaç doğurmuştur. Bu ihtiyaçların karşılanması paralelinde özel yapıların inşası gündeme gelmiştir. Giderek artan enerji ihtiyaçlarının karşılanması için nükleer güç santralleri ve barajlar, büyük açıklıkların geçilebilmesi için viyadükler, limanlar, köprüler; denizin ortasında kurulan petrol arama platformları, artan nüfusun barınma ihtiyacı için yüksek yapılar, giderek artan bir hızla yapılmaya başlanmıştır. Yeryüzünde oluşan titreşimler ve yeraltında meydana gelen patlamalardan veya deprem gibi yer hareketlerinden dolayı, nükleer güç santralleri başta olmak üzere bu yapıların zemin ile ne ölçüde etkileşime girdiğinin, analiz ve tasarım aşamasında gerçekçi bir şekilde hesaplanıp, yapıların dinamik yüklere ve sismik dalgalara karşı emniyetli bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmeleri bir zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. İlerleyen yıllarda özellikle yumuşak zemin tabakaları üzerine inşa edilen yapılarda ve yapı ile zemin davranışlarının birbirine eşit olması durumlarında yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilmeyecek derecede öneme sahip olduğu anlaşılmış ve konu Deprem Mühendisliği, Geoteknik Mühendisliği gibi branşların önemli uğraşları haline gelmiştir. Yakın zamanda meydana gelen depremlerde (1985 Mexico City, 1989 Loma Prieta, 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Marmara ve Düzce) yapı-zemin etkileşiminin yapıların dinamik performansları ve deprem hasarları üzerinde çok önemli rolünün olduğunu göstermiştir [1]. Dinamik dış yüklerin etkisi altındaki önemli yapı sistemlerinin davranışını daha iyi değerlendirebilmek ve bunun sonucunda yapı-zemin etkileşiminde tam güvenliği sağlayabilmek için sayısal çözüm yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır.

Zemin, yapı davranışını değişik şekillerde etkilemektedir:

- 1) Yapının altındaki zemin, ana kayadaki deprem etkisini değiştirerek iletir. Bu bazı durumlarda etkinin büyümesi sonucunu doğurur (1985 Mexico City depreminde; Kaya ortamında  $a_{max}=0.035g$ , Yumuşak zemin ortamında  $a_{max}=0.168g$ ).
- 2) Zeminin etkisiyle, yapının periyot ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerinde değişiklikler meydana gelir.
- 3) Yapıdaki titreşim enerjisinin önemli bir kısmı, zemine mesnetlenmenin rijit olmaması, zemindeki sönüm ve zeminde yayılma etkisiyle söner.

Genellikle yapı-zemin etkileşimi 2 ve 3 te verilen olayların incelenmesi olarak ele alınır. Her iki durumda da yapının davranışı zeminden, zeminin davranışı da yapının varlığından etkilenir. Birçok depremde yapılan gözlemler, üstyapı temeli üzerinde ve zemin yüzeyinde temelden fazla uzakta olmayan bir noktada aynı anda alınan kayıtlar arasında önemli değişiklikler olduğunu göstermiştir. Bu değişiklikler depremin zemin aracılığıyla üstyapıya etkisinin karşılığı olarak, üstyapının zemini ve dolayısıyla deprem kaydını etkilediğini kanıtlamaktadır. Yapı-zemin etkileşiminde temel sorun zemin ortamının nasıl idealleştirileceğidir. Zeminin dinamik karakterlerinin belirlenmesinde zeminin rijitliği, sönümü ve sonsuz ortama enerji yayılmasını göz önüne alan modeller çeşitli yaklaşımlar getirilebilir. Bu çalışmada zeminin şekil değiştirme özelliği, üstyapı temeli ile zemin yüzeyi ara kesitinde kabul edilen dış yükün titreşim frekansından bağımsız eşdeğer elastik yaylar ile modellenerek gösterilmiştir [2]. Yapı-zemin etkileşim probleminde üstyapı düzlem kayma çerçevesi olarak ele alınmıştır. Dinamik büyültme çarpanının yapı-zemin etkileşim problemi üzerinde etkilerini inceleyebilmek için üstyapıya katlar seviyesinde harmonik karakterde statik genliğini doğrusal arttıran sinüzoidal dış yükler etki ettirilmiştir.

## 1.2. İlgili Çalışmalar

Yapı-zemin ortak sistemlerin dinamik analizinde yumuşak zemin koşullarının sisteme katkısını ifade eden uygun yay ve sönümleyicilerin kullanılması modelleme tekniği açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Yapı temeli ile zemin üst yüzeyi ara kesitinde geliştirilen bu fiktif elemanların özelliklerinin belirlenmesi için sayısal ve analitik yöntemlerin kullanıldığı birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar birçok parametrenin (temel geometrisi, zemin özellikleri, dış yükün açılal frekansı v.s.) değişimine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.

Zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini gösteren bu karmaşık dinamik büyüklüklerin belirlenmesi için farklı çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Analitik ve yarı analitik çözüm yöntemleri Veletsos ve Wei [3], sınır elemanlar yöntemi Çelebi vd. [4] tarafından ele alınmıştır.

Dominguez ve Roesset [5], elastik yarı-uzaya oturan dikdörtgen temellerin dinamik rijitliklerini frekans tanım aralığında sınır elemanlar yöntemi kullanarak hesaplamışlardır (Şekil 1.1).

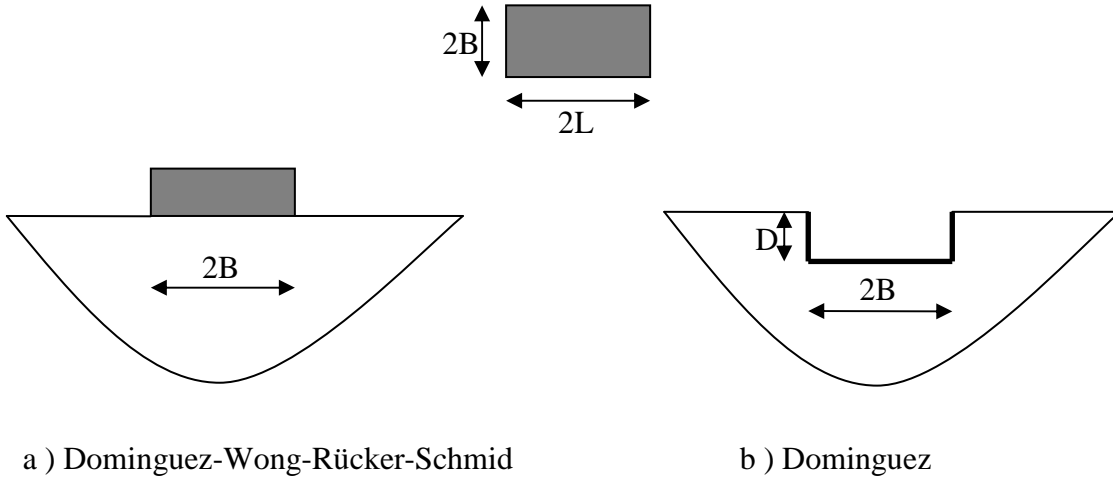
Gömülü kare temellerin bağlaşıklık öteleme-dönme titreşimleri için karma çözüm tekniğini kullanan Mita ve Luco [6] ve farklı geometrik şekillere sahip gömülü temellerin yanal titreşimleri için kesin çözümler elde eden Gazetas ve Tassoulas [7, 8] tarafından yapılan çalışmalar gömülü temel durumlarına örnek olarak gösterilebilir (Şekil 1.3).

Apsel ve Luco [9] ise tabakalı zemin ortamına yüzeysel ve gömülü biçimde oturan dairesel temellerin bağlaşıklık öteleme-dönme titreşimleri için integral çözüm teknikleri geliştirerek önemli sonuçlar elde etmişlerdir (Şekil 1.2-1.3).

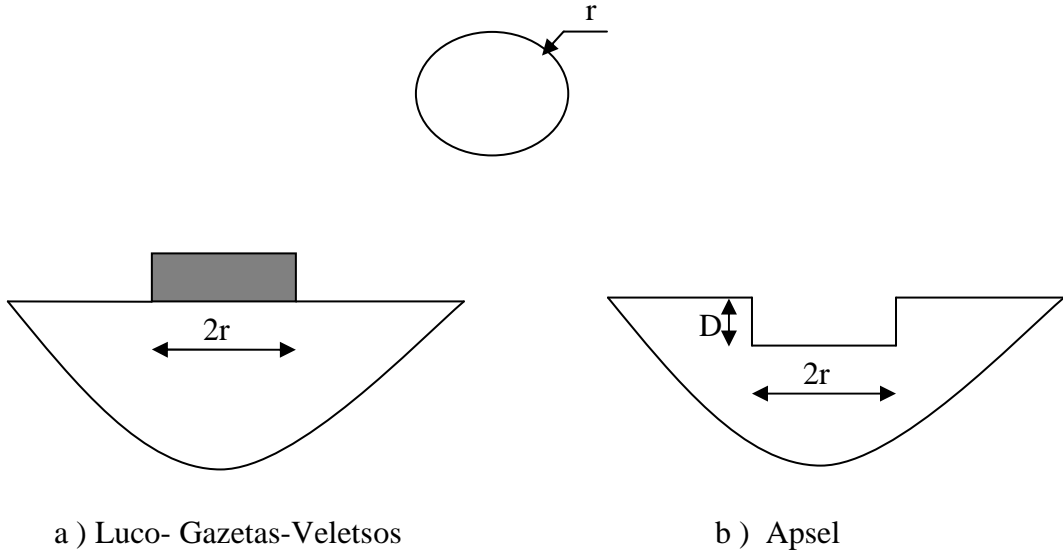
Wolf ve Song [10] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gömülü dikdörtgen temellerin empedans değerlerinin farklı titreşim modları için hesaplamışlardır. Bu [11], Bu ve Lin [12] titreşim frekansının geniş bir aralığında ( $0 \leq a_0 \leq 10$ ) sadece kare temellerin empedans fonksiyonlarını bulmak için bazı çalışmalar yapmışlardır.

Temel empedans fonksiyonlarının titreşim kaynağının frekansa bağımlı olması temel-zemin ortak sistemine ait hareket denklemlerinin analitik çözümünü karmaşık hale getirdiğinden, birçok araştırmacı frekanstan bağımsız sabit değerli temel rijitlik katsayıları önermişlerdir.

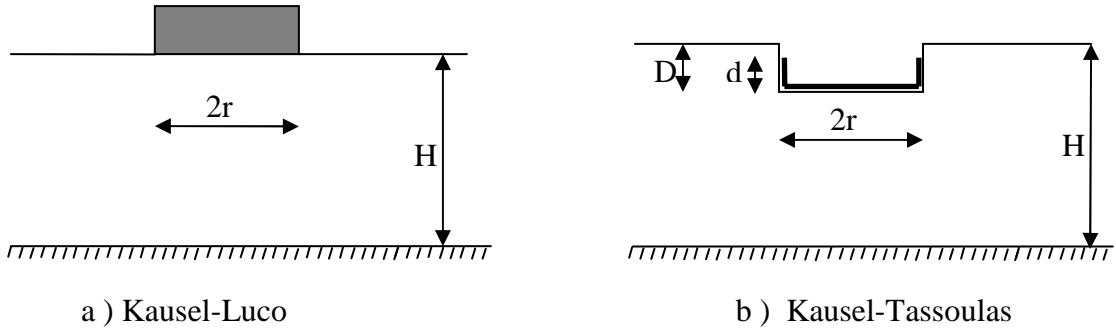
Elastik yarı uzaya oturan eşdeğer yarıçaplı ( $r$ ) dairesel temellerin tabakalı zemin ortamına yüzeysel oturması durumunda ötelenme-dönme rijitlikleri Luco tarafından incelenmiştir (Şekil 1.4). Gazetas, ise elastik yarı uzaya oturan şerit temellerin zemin ortamına yüzeysel ve gömülü olma durumlarına göre çalışmalar yapmıştır (Şekil 1.5). Gazetas, Gazetas ve Huh zemin tabaka kalınlıklarını dikkate alarak elastik yarı uzaya oturan temelleri yüzeysel ve gömülü olma durumlarına göre değerlendirmişlerdir (Şekil 1.6) [13].



Şekil 1.1. Elastik yarı uzaya oturan dikdörtgen temellerin, yüzeysel ve gömülü olma durumlarına bağlı olarak yapılmış araştırmalar

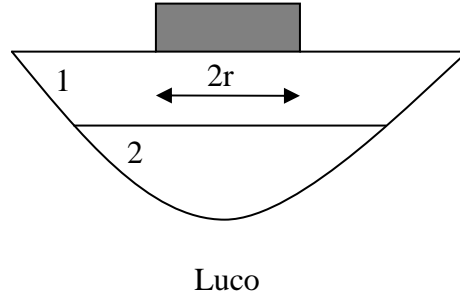


Şekil 1.2. Elastik yarı uzaya oturan dairesel temelerde, yüzeysel ve gömülü olma durumlarına bağlı olarak dinamik rijitliklerin frekansa göre değişimlerinin incelenmesi

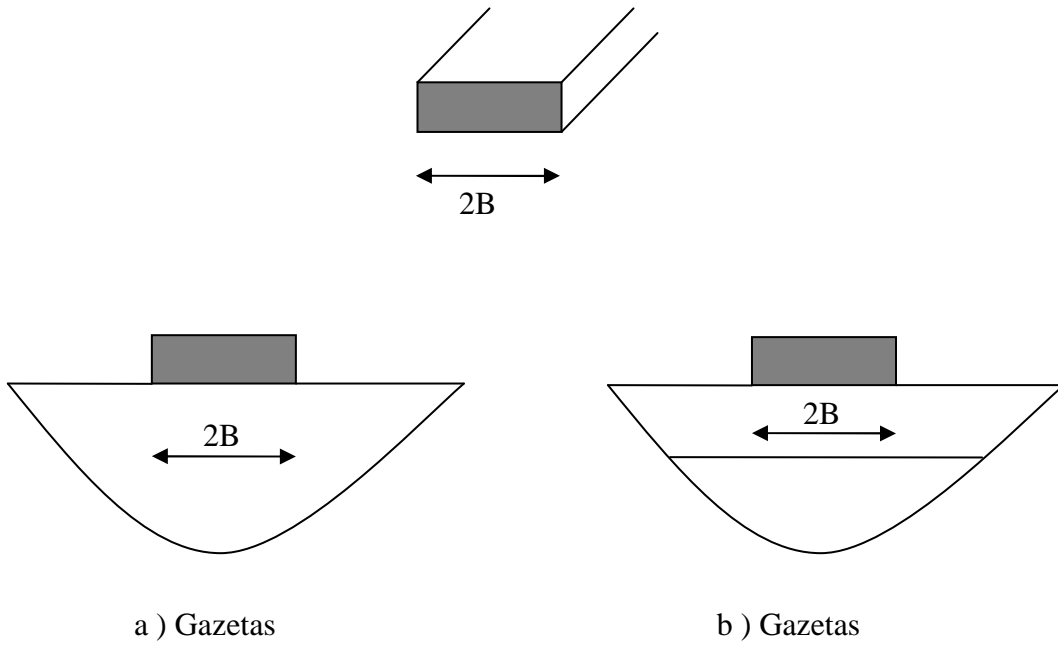


Şekil 1.3. Zeminin tabaka kalınlıklarına bağlı olarak dairesel temelerin yüzeysel ve gömülü olma durumları dikkate alınarak yapılmış araştırmalar

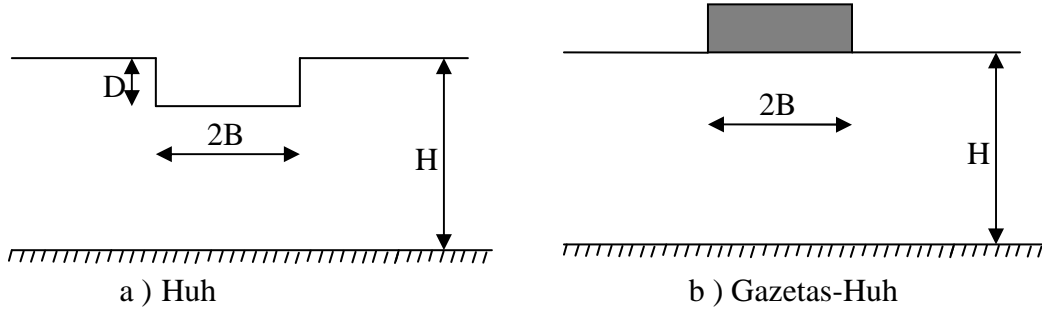




Şekil 1.4. Elastik yarı uzaya oturan dairesel temellerin zeminin tabaka kalınlıklarına dikkate alınarak yüzeysel ve gömülü olma durumlarına bağlı yapılmış araştırmalar



Şekil 1.5. Elastik yarı uzaya oturan şerit temellerde, gömülme derinliğine bağlı olarak yapılmış araştırmalar



Şekil 1.6. Zemin tabaka kalınlıkları dikkate alınarak şerit temellerin yüzeysel ve gömülü olma durumları dikkate alınarak yapılmış araştırmalar

Bu konularda yurtdışında yapılan çalışmalardan başka ülkemizde de çalışmalar yapılmıştır. Pala, doktora tez çalışmasında Yapay Sinir Ağları (YSA) ile yapı-zemin etkileşimini incelemiştir. Ele alınan YSA modeli ile farklı zemin özellikleri ve yerel zemin kalınlıklarının, yapı davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Zemin özellikleri, yerel zemin kalınlığı ve bina kat sayıları değiştirilerek analizler yapmış ve binaların en üst kat yatay yer değiştirme, ivme ve periyot değerlerinin değişimini incelemiştir. YSA kullanılarak yapılan zemin yapı etkileşim analizlerinde modelleme ve analiz aşamasında yapılan kabullerin minimize edildiğini, çözüm süresinin oldukça kısaldığını ve YSA'nın zemin-yapı etkileşim problemlerinin çözümünde çok iyi bir performans gösterdiğini vurgulamıştır [1].

Çelebi ve Gündüz çok katlı bir yapının yarı sonsuz bir ortamda deprem etkisindeki davranışını incelemiş ve en uygun sonucu elde etmek için farklı modeller kurmuştur. Kurulan modellerde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında büyük bir zemin bölgesi ayrıklaştırılmıştır. İkinci aşamada, zeminin yatay uzanımını dik kesen düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler kısıtlanarak zemin modellenmiştir. Son olarak ise yatay sınırlar eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler (vizkoz sınır şartları) kullanılarak zemin bölgesi modellenmiştir. Yapılan bu modellerde kayma dalga hızı, periyot ve taban kesme kuvveti hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak çok büyük bir zemin bölgesi alınarak kurulan model ile sönümleyiciler ve yaylar kullanılarak yapılan modelden elde edilen sonuçların birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür [14].

### 1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışma, sayısal ileri düzey gerçekleştirilebilir uygulamalar yapabilmek ve yapısal çözüm tekniklerini ve sonuçlarını doğru yorumlayabilmek için harmonik karakterde sinüzoidal dış yükler etkisi altında titreşen üstyapı-temel-zemin ortak sisteminin dinamik davranışı, temel-zemin arakesitinde tanımlanan titreşim kaynağının frekansından bağımsız sabit değerli empedans fonksiyonlarına bağlı olarak incelenmiştir. Zeminin şekil değiştirebilirliği, üstyapı temeli ile zemin yüzeyi arakesitinde kabul edilen dış yükün titreşim frekansından bağımsız eşdeğer elastik yaylar ile modellenerek gösterilmiştir. Yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşimini incelemek için tüm problemi temsil edebilecek uygun matematik modeller ve onun sayısal uygulamaları çeşitli kontrol parametrelerine bağlı ayrıntılı ve sistematik araştırma yürütülerek ve etkin bir nümerik ve analitik çözüm yöntemi kullanılarak ele alınmıştır.

Elastik yarı uzay ve tabakalı zemin modelleri için dikdörtgen rijit temellerin yüzeysel ve gömülü olmaları durumlarına göre üstyapı temeli ile zemin yüzeyi arakesitinde geliştirilen empedans fonksiyonları kullanılarak bilgisayar destekli sayısal model geliştirilmiştir. Temel ortamına ait dinamik rijitlikler hesaplanırken Sieffert tarafından derlenen ve FEMA 356'da yer alan formüller kullanılmıştır [15]. Üstyapı sisteminin sayısal modeli SAP2000 bilgisayar programıyla geliştirilmiştir. Kurulan bu modellemede yapı sistemi tek serbestlik dereceli (TSD) ve çok serbestlik dereceli (ÇSD) olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Yapı-zemin etkileşim problemini düzlemde temsil eden bu model için farklı parametrelere bağlı sayısal uygulamalardan elde edilen sonuçlardan yapı-zemin sistemine ait periyot, taban kesme kuvveti, üst kat yerdeğiştirmeleri ve taban eğilme moment değerlerinin değişimleri incelenip grafikler halinde sunulmuştur. Ayrıca ;

- Üstyapının dinamik davranışını gösteren dinamik büyültme çarpanının zemin rijitliğine bağlı değişimi,
- Dinamik büyültme çarpanının üstyapı temel ortamının tabakalı zemin olması durumunda, tabaka kalınlığı ve ortam rijitliğinin değişimine göre incelenmesi,
- Üstyapı gömülme derinliğinin dinamik büyültme çarpanı üzerinde etkileri gibi konular incelenmiş ve elde edilen sonuçlar grafikler haline getirilip yorumlanmıştır.

## BÖLÜM 2. SİNÜSOİDAL YANAL YÜKLERE MARUZ YAPI-ZEMİN ORTAK SİSTEMİNİN HAREKET DENKLEMİNİN GENEL YAPISI

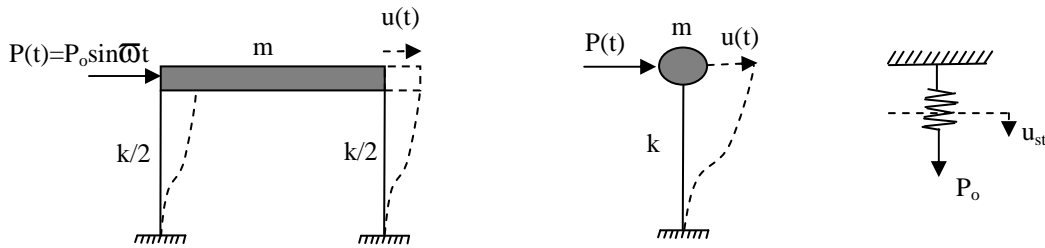
### 2.1. Statik genliğini Doğrusal Arttıran Sinüsoidal Yanal Yüklere Maruz Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Kararlı Titreşimlerinin İncelenmesi ve Bilgisayar Destekli Çözüm Yaklaşımı

#### 2.1.1. Sönümsüz tek serbestlik dereceli (TSD) sistemin harmonik yük altındaki davranışının incelenmesi

Tek serbestlik dereceli sönümsüz bir sistemin harmonik karakterde sinüsoidal bir dış yük etkisi altında zorlanmış titreşimi,

$$m \ddot{u}(t) + k u(t) = P_o \sin \omega t \quad (2.1)$$

yönetici denklemi ile verilir (Şekil 2.1). Burada  $\omega$  dış yükün açısal frekansını göstermektedir.



Şekil 2.1. Sönümsüz tek serbestlik dereceli (TSD) yapı modeli

Sistemin doğal açısal frekansı;

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Sistemin hareket denkleminde statik yerdeğiştirme

$$u_{st} = \frac{P_o}{k} \quad (2.3)$$

olacak şekilde tanımlanarak düzenlenirse;

$$\ddot{u} + \frac{k}{m} u = \frac{P_o}{m} \sin \omega t \frac{\omega^2}{\omega^2} \quad (2.4a)$$

2. mertebeden sabit katsayılı homojen olmayan doğrusal adi bir diferansiyel denklem elde edilir.

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \omega^2 \frac{P_o}{k} \sin \omega t \quad (2.4b)$$

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \omega^2 u_{st} \sin \omega t \quad (2.4c)$$

Elde edilen bu denklemin çözümü ise;

$$L(u) = \emptyset(t) \quad u(t) = u_h(t) + u_p(t) \quad (2.5a)$$

$$L(u_h) = 0 \quad u_h(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t \quad (\text{Homojen Çözüm}) \quad (2.5b)$$

$$L(u_p) = \emptyset(t) \quad u_p(t) = D \sin \omega t + E \cos \omega t \quad (\text{Özel Çözüm}) \quad (2.5c)$$

şeklinde yazılır. Yukarıda verilen denklemin (2.4c) özel çözümünün (2.5c) ilgili türevleri alınıp

$$\dot{u}_p = D \omega \cos \omega t - E \omega \sin \omega t \quad (2.6a)$$

$$\ddot{u}_p = -D \omega^2 \sin \omega t - E \omega^2 \cos \omega t \quad (2.6b)$$

yönetici denkleminde yerine konulduğunda,

$$-D\omega^2 \sin\omega t - E\omega^2 \cos\omega t + \omega^2 D \sin\omega t + \omega^2 E \cos\omega t = \omega^2 u_{st} \sin\omega t \quad (2.7a)$$

$$-D\omega^2 + \omega^2 D = \omega^2 u_{st}; \quad D = \frac{\omega^2 u_{st}}{\omega^2 - \omega^2} \quad (2.7b)$$

$$-E\omega^2 + \omega^2 E = 0; \quad E = 0 \quad (2.7c)$$

ifadeleri elde edilir. İntegral çarpanları bulunduktan sonra özel çözüm fonksiyonu

$$u_p = \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega^2} u_{st} \sin\omega t \quad (2.8)$$

olarak yazılır. Aynı şekilde homojen çözüm (2.5b) verilen başlangıç koşullarına bağlı olarak ( $u(0) = u_o$ ;  $\dot{u}(0) = \dot{u}_o$ ) ele alındığında;

$$u(t) = A \sin\omega t + B \cos\omega t + \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega^2} u_{st} \sin\omega t \quad (2.9)$$

$$B = u_o \quad (2.10a)$$

$$\dot{u}(t) = \omega A \cos\omega t - \omega B \sin\omega t + \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega^2} u_{st} \omega \cos\omega t \quad (2.10b)$$

$$\dot{u}_o = \omega A + \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega^2} u_{st} \omega \quad (2.10c)$$

$$A = \frac{\dot{u}_o}{\omega} - \frac{\frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega^2} u_{st} \omega}{\omega} \quad (2.10d)$$

bulunur. Bu durumda genel çözüm;

$$u(t) = \frac{\dot{u}_o}{\omega} \sin \omega t - \frac{\frac{\varpi}{\omega}}{\omega^2 - \varpi^2} u_{st} \sin \omega t + u_o \cos \omega t + \frac{\omega^2}{\omega^2 - \varpi^2} u_{st} \sin \varpi t \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir. Çözüm fonksiyonu;

$$u(t) = \frac{\dot{u}_o}{\omega} \sin \omega t + u_o \cos \omega t - \frac{\frac{\varpi}{\omega}}{1 - \frac{\varpi^2}{\omega^2}} u_{st} \sin \omega t + \frac{1}{1 - \frac{\varpi^2}{\omega^2}} u_{st} \sin \varpi t \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{\varpi}{\omega} \quad (2.13)$$

olacak şekilde tekrar düzenlenirse,

$$u(t) = \frac{\dot{u}_o}{\omega} \sin \omega t + u_o \cos \omega t - \frac{\beta}{1 - \beta^2} u_{st} \sin \omega t + \frac{1}{1 - \beta^2} u_{st} \sin \varpi t \quad (2.14)$$

elde edilir. Başlangıçta sükunette olmayan harmonik yük etkisi altındaki tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yanal yerdeğiştirme cinsinden göstereceği tepki bu çözüm fonksiyonu (2.14) ile ifade edilir. Çözüm iki kısımdan oluşmaktadır;

– Davranışın sistemin dış yükünün açısal frekansına ( $\omega$ ) sahip bir serbest titreşim kısmı,

– Zorlama frekansına ( $\varpi$ ) sahip zorlayıcı kısım

Hareketin sükunetten başladığı kabul edilirse, başlangıç koşulları  $u(0) = \dot{u}(0) = 0$  olarak yazılabilir. Bu durumda genel çözüm;

$$u(t) = \frac{1}{1 - \beta^2} u_{st} (\sin \varpi t - \beta \sin \omega t) \quad (2.15)$$

olarak kısalır. Elastik kolonlardaki kesme kuvvetlerinin dolayısıyla eğilme momentlerinin,  $u(t)$  yerdeğiştirmesi ile orantılı olduğu düşünülerek,  $u(t)$  dinamik yerdeğiştirmenin,  $u_{st}$  statik yerdeğiştirmeye oranı Dinamik Büyültme Çarpanı ( $R_d$ ) olarak tarif edilir.

$$R_d = \frac{u(t)}{u_{st}} = \frac{\sin \varpi t - \beta \sin \omega t}{1 - \beta^2} \quad (2.16a)$$

$$u(t) = (R_d) u_{st} \quad (2.16b)$$

Çözümün incelenmesinden, davranışın sistemin  $\omega$  doğal frekansına sahip bir serbest titreşim kısmından ve  $\varpi$  zorlanma frekansına sahip bir zorlayıcı kısmından oluştuğu görülür (2.17).

$$(R_d)_{maks} = \mp \frac{1}{1 - \beta^2} = \mp \frac{1}{1 - \frac{\varpi^2}{\omega^2}} \quad (2.17)$$

– Dış yükün açısal frekansının ( $\varpi$ ) küçük olması durumunda, dış yük çok yavaş değişmektedir. Bu yavaş değişme sonucu dış yükün dinamik özellikleri çok azalmakta ve statik bir etki ortaya çıkmaktadır.

$$\varpi \cong 0 \Rightarrow (R_d)_{maks} = 1 \quad u(t)_{maks} = (R_d)_{maks} u_{st} = u_{st}$$

$$V(t)_{maks} = k u(t)_{maks} = k u_{st} = P_o$$

– Dış yükün açısal frekansının yapının frekansına eşit veya yakın olması yani  $\beta = 1$  olması durumunda Rezonans olayı meydana gelir.  $(R_d)_{maks}$  ifadesinden de görüleceği gibi teorik olarak bu durumda sonsuz büyük yerdeğiştirmeler elde edilir.

$$\varpi \cong \omega \Rightarrow (R_d)_{maks} = \text{Çok büyük} \quad u(t)_{maks} = \text{Çok büyük}$$

$$V(t)_{maks} = \text{Çok büyük}$$



– Dış yükün açısal frekansının büyük olması durumunda ise kütle atalet kuvveti dolayısıyla bunu izleyememekte ve hemen hemen hareketsiz kalmaktadır.

$$\bar{\omega} \cong \text{Çok büyük} \quad (R_d)_{\text{maks}} \cong 0$$

Yukarıdaki genel hareket denklemi (2.14) kalıcı ve geçici titreşimleri göstermek üzere düzenlenirse;

$$u(t) = u_{\text{geçici}}(t) + u_{\text{kalıcı}}(t) \quad (2.18a)$$

$$u(t) = \left( \frac{\dot{u}_o}{\omega} - u_{st} \frac{\beta}{1 - \beta^2} \right) \sin \omega t + u_o \cos \omega t + \frac{1}{1 - \beta^2} u_{st} \sin \bar{\omega} t \quad (2.18b)$$

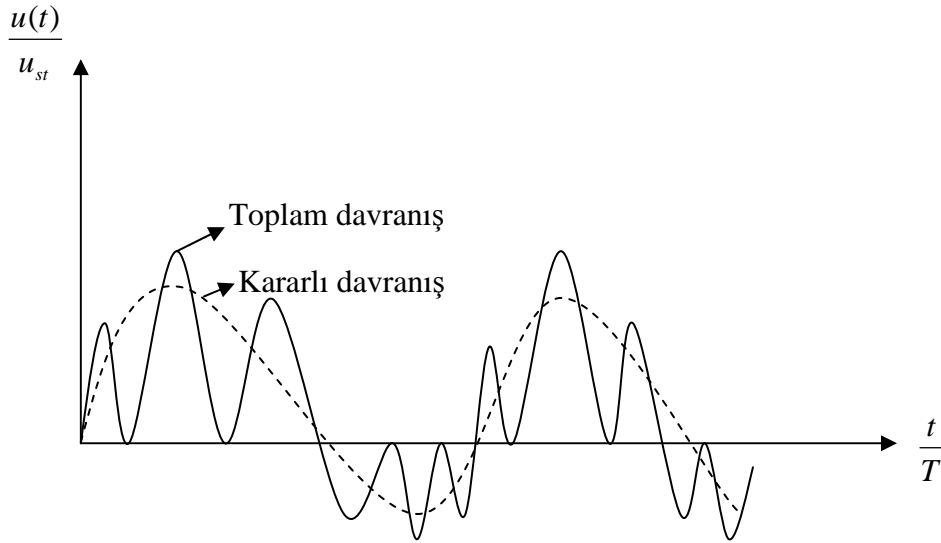
çözüm fonksiyonu elde edilir. Burada çözümün (2.18b) ilk parçasını sistemin doğal frekansından dolayı meydana gelen ve başlangıç koşullarına bağlı olan geçici titreşim (2.19) meydana getirir.

$$u_{\text{geçici}} = \left( \frac{\dot{u}_o}{\omega} - u_{st} \frac{\beta}{1 - \beta^2} \right) \sin \omega t + u_o \cos \omega t \quad (2.19)$$

Çözümün ikinci parçasını ise dış yükün yani zorlayıcı kuvvetin frekansından meydana gelen ve başlangıç koşullarına bağlı olmayan kalıcı titreşim oluşturur:

$$u_{\text{kalıcı}} = \frac{1}{1 - \beta^2} u_{st} \sin \bar{\omega} t \quad (2.20)$$

Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin zorlanmış titreşimine ait çözüm fonksiyonunun zaman geçmişi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Sönümsüz tek serbestlik dereceli (TSD) sistemde yapı davranışı

Bilgisayar destekli sayısal analizde aşağıdaki kararlı davranışı gösteren çözüm fonksiyonu kullanılmıştır (2.21).

$$u(t) = \frac{1}{1-\beta^2} u_{st} \sin \omega t \quad (2.21)$$

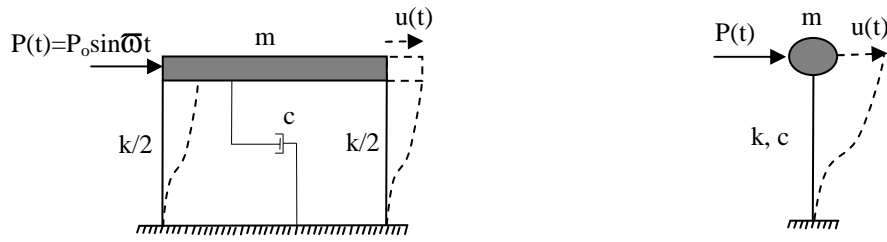
### 2.1.2. Sönümlü tek serbestlik dereceli (TSD) sistemin harmonik yük altındaki davranışının incelenmesi

Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sistemin Şekil 2.3. de görüldüğü gibi harmonik karakterde sinüzoidal bir dış yük etkisi altındaki hareket denklemi;

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = P_o \sin \omega t \quad (2.22)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki ifade tekrar düzenlendiğinde

$$\ddot{u} + \frac{c}{m} \dot{u} + \frac{k}{m} u = \frac{P_o}{m} \sin \omega t \quad (2.23)$$



Şekil 2.3. Sönümlü tek serbestlik dereceli (TSD) yapı modeli

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = \omega^2u_{st}\sin\omega t \quad (2.24)$$

elde edilir. Burada  $\xi$  sönüm oranını,  $u_{st}$  statik yer değiştirmeyi göstermektedir.

$$\xi = \frac{c}{2m\omega} \quad (2.25)$$

Sönümlü sistemin serbest titreşim açısal frekansı;

$$\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (2.26)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Yönetici denklem 2. mertebeden sabit katsayılı homojen olmayan doğrusal adi diferansiyel denklemdir. Bu tür denklemlerin genel çözümü,

$$L(u) = \emptyset(t) \quad u(t) = u_h(t) + u_p(t) \quad (2.27a)$$

şeklinde yazılabilir. Burada homojen çözüm,

$$L(u_h) = \emptyset(t) \quad u_h(t) = e^{-\xi\omega t} (A\sin\omega_D t + B\cos\omega_D t) \quad (2.27b)$$

üstel fonksiyonuna bağlı olarak yazılır. Özel çözümün genel yapısı dış yüke bağlı olarak;

$$L(u_p) = 0 \quad u_p(t) = D\sin\omega t + E\cos\omega t \quad (2.27c)$$

şeklinde ifade edilir. Özel çözümünün (2.27c) ilgili türevleri alınıp hareket denkleminde (2.24) yerine konulursa,

$$\dot{u}_p = D\omega\cos\omega t - E\omega\sin\omega t \quad (2.28a)$$

$$\ddot{u}_p = -D\omega^2\sin\omega t - E\omega^2\cos\omega t \quad (2.28b)$$

$$\begin{aligned} & -D\omega^2\sin\omega t - E\omega^2\cos\omega t + 2D\xi\omega\omega\cos\omega t - 2E\xi\omega\omega\sin\omega t + D\omega^2\sin\omega t + E\omega^2\cos\omega t = \\ & \dots\omega^2 u_{st}\sin\omega t \end{aligned} \quad (2.29)$$

ifadesi elde edilir. Buradan integrasyon sabitlerinden E ve D aşağıdaki işlem adımlarıyla bulunur.

$$D2\xi\omega\omega - E\omega^2 + E\omega^2 = 0 \quad (2.30a)$$

$$E = -\frac{2\xi\omega\omega D}{\omega^2 - \omega^2} \quad (2.30b)$$

$$-D\omega^2 - E2\xi\omega\omega + D\omega^2 = \omega^2 u_{st} \quad (2.30c)$$

$$-D\omega^2 + \frac{4\xi^2\omega^2\omega^2 D}{\omega^2 - \omega^2} + D\omega^2 = \omega^2 u_{st} \quad (2.30d)$$

$$D\left(\omega^2 - \omega^2 + \frac{4\xi^2\omega^2\omega^2}{\omega^2 - \omega^2}\right) = \omega^2 u_{st} \quad (2.30e)$$

$$D = \frac{\omega^2 u_{st}}{\omega^2 - \omega^2 + \frac{4\xi^2\omega^2\omega^2}{\omega^2 - \omega^2}} \quad (2.30f)$$

$$D = \frac{\omega^2 u_{st}}{(\omega^2 - \bar{\omega}^2)^2 + (2\xi\omega\bar{\omega})^2} \quad (2.30g)$$

Burada E ve D parametrelerinde  $\beta$  (2.11) yerine konulursa;

$$D = \frac{\omega^2 u_{st}}{[\omega^2(1-\beta^2)]^2 + (2\xi\omega^2\beta)^2} \quad (2.31a)$$

$$D = \frac{(1-\beta^2)u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.31b)$$

$$E = \frac{-2\xi\omega\bar{\omega} \frac{\omega}{\omega} D}{\frac{\omega^2}{\omega^2}(\omega^2 - \bar{\omega}^2)} = \frac{-2\xi\omega^2\beta}{\omega^2(1-\beta^2)} D = \frac{-2\xi\beta}{(1-\beta^2)} \frac{(1-\beta^2)u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.31c)$$

$$E = \frac{-2\xi\beta u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.31d)$$

$$u_p(t) = \frac{(1-\beta^2)u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \sin \bar{\omega}t - \frac{2\xi\beta u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \cos \bar{\omega}t \quad (2.32)$$

Özel çözüm yukarıda (2.32) gösterildiği şekilde yazılır. Hareket denkleminin genel çözümü ise,

$$u(t) = e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) + \frac{u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \left( (1-\beta^2) \sin \bar{\omega}t - 2\xi\beta \cos \bar{\omega}t \right) \quad (2.33)$$

şeklinde elde edilir.

Hareket denkleminin 1. dereceden türevinde başlangıç koşulları ( $u(0) = u_0$ ,  $\dot{u}(0) = \dot{u}_0$ ) yerlerine yazılırsa çözüm fonksiyonundaki A ve B integral çarpanları elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -\xi\omega e^{-\xi\omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) + e^{-\xi\omega t} (A \omega_D \cos \omega_D t - B \omega_D \sin \omega_D t) + \dots \\ & \dots + \frac{u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \left( (1-\beta^2)\omega \cos \omega t + 2\xi\beta\omega \sin \omega t \right) \end{aligned} \quad (2.34a)$$

$$\dot{u}_0 = -\xi\omega B + A \omega_D + \frac{(1-\beta^2)\omega u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.34b)$$

$$A = \frac{\dot{u}_0}{\omega_D} + \frac{\xi\omega B}{\omega_D} - \frac{(1-\beta^2)\omega u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \frac{1}{\omega_D} \quad (2.34c)$$

$$u_0 = B - \frac{2\xi\beta u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.34d)$$

$$B = u_0 + \frac{2\xi\beta u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.34e)$$

$$A = \frac{\dot{u}_0}{\omega_D} + \frac{u_0 \xi\omega}{\omega_D} + \frac{2\xi^2\omega\beta u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \frac{1}{\omega_D} - \frac{(1-\beta^2)\omega u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \frac{1}{\omega_D} \quad (2.34f)$$



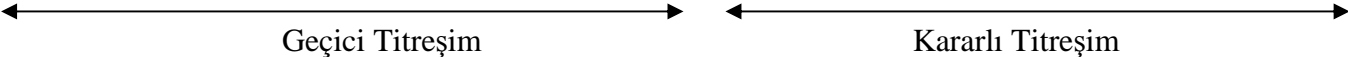
$$\dots + \frac{u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} + (1-\beta^2) \sin \omega t - 2\xi\beta \cos \omega t \quad (2.36)$$


  
 Kararlı Titreşim

Başlangıçta sükunette olmayan harmonik yük etkisi altındaki TSD sönümlü sistemin yanal yerdeğiştirme cinsinden göstereceği tepki yukarıdaki (2.36) çözüm fonksiyonuyla tanımlanır.

Hareketin sükunetten başladığı kabul edilirse, başlangıç koşulları  $u(0) = \dot{u}(0) = 0$  olarak yazılabilir. Bu durumda genel çözüm;

$$u(t) = e^{-\xi\omega t} u_{st} \frac{\omega}{\omega_D} \left[ \frac{2\xi^2\beta - (1-\beta^2) \sin \omega_D t + 2\xi\beta \cos \omega_D t}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] + \frac{u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \left( (1-\beta^2) \sin \omega t - 2\xi\beta \cos \omega t \right) \quad (2.37)$$


  
 Geçici Titreşim                      Kararlı Titreşim

şeklinde yazılır.

Dinamik büyütme çarpanının (DMF) tarifinde hareketin kararlı titreşimi esas alındığından, yerdeğiştirme fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılır.

$$u(t) = \frac{u_{st}}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \left( (1-\beta^2) \sin \omega t - 2\xi\beta \cos \omega t \right)$$



buradan dinamik büyültme faktörü ( $R_d$ );

$$(R_d) = \frac{u(t)}{u_{st}} = \frac{(1 - \beta^2) \sin \bar{\omega}t - 2\xi\beta \cos \bar{\omega}t}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.39)$$

$$u(t) = (R_d) u_{st} \quad (2.40)$$

şeklinde elde edilir.

DMF'nin maksimum değeri,

$$R_{d \text{ maks}} = \left[ (1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.41)$$

ile ifade edilir.

– Küçük sönüm değerleri için, rezonans durumunda sonsuz büyük yerdeğıştirmeler çıkmayacaktır.

– Tam rezonans durumunda ( $\beta = 1$ ) ise;  $R_{d \text{ maks}} = \frac{1}{2\xi}$  olarak elde edilir.

Tam rezonans  $\omega = \bar{\omega}$  ( $\beta = 1$ ) ve başlangıç koşullarının  $u(0) = \dot{u}(0) = 0$  olması durumunda genel çözüm;

$$u(t) = \frac{1}{2\xi} u_{st} \left[ e^{-\xi\omega t} \left( \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \omega_D t + \cos \omega_D t \right) - \cos \bar{\omega}t \right] \quad (2.42)$$

olarak elde edilir.

Sönümün küçük olduğu kabul edilirse;

$$\sin \omega_D t = 0$$

$$R_d = \frac{1}{2\xi} (e^{-\xi\omega t} - 1) \cos \omega t \quad (2.43)$$

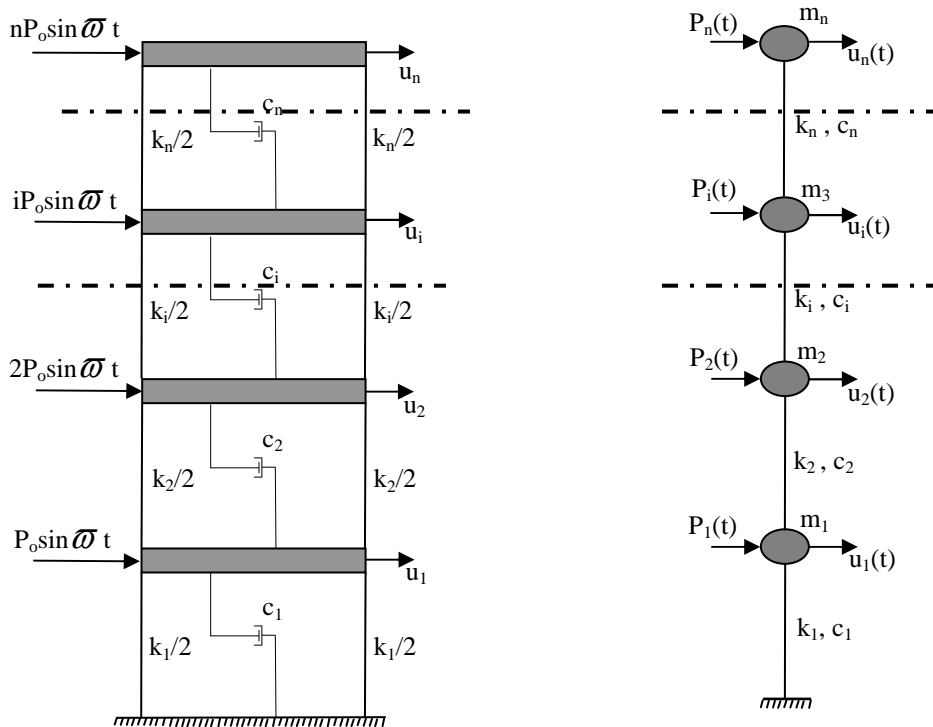
olarak elde edilir.

### 2.1.3. Sönümlü çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemin harmonik yük altındaki davranışının incelenmesi

Çok serbestlik dereceli sistemin zorlanmış titreşimi;

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{P} \quad (2.44)$$

denklemini ile gösterilir.



Şekil 2.4. Sönümlü çok serbestlik dereceli (ÇSD) yapı modeli

Yukarıdaki denklemde (2.44)  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  matrisleri sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir.

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (2.45a)$$

$$\mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P \sin \bar{\omega} t \\ 2P \sin \bar{\omega} t \\ \vdots \\ \vdots \\ n \sin \bar{\omega} t \end{Bmatrix} \quad (2.45b)$$

$$\mathbf{M} = \begin{Bmatrix} m_1 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & m_2 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & m_n \end{Bmatrix} \quad (2.45c)$$

$$\mathbf{K} = \begin{Bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdot & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdot \\ \cdot & -k_3 & \cdot & -k_n \\ 0 & \cdot & -k_n & k_n \end{Bmatrix} \quad (2.45d)$$

Aşağıda yerdeğiştirme matrisi verilmiştir. Burada n sistemin serbestlik derecesini,  $\phi$  modal matrisi ifade etmek üzere yerdeğiştirme vektörü,

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^n \phi_i \mathbf{q}_i(t) = \phi \mathbf{q}(t) \quad (2.46)$$

şeklinde ifade edilir. Buna bağlı olarak;

$$\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j \ddot{q}_j + \phi_j^T \mathbf{C} \phi_j \dot{q}_j + \phi_j^T \mathbf{K} \phi_j q_j = \phi_j^T \mathbf{P} \quad (2.47)$$

$$M_j = \phi_j^T \mathbf{M} \phi_j \ddot{q}_j \text{ (Genelleştirilmiş Kütle)} \quad (2.47a)$$

$$C_j = 2\xi_j \omega_j M_j \text{ (Genelleştirilmiş Sönüm)} \quad (2.47b)$$

$$K_j = \omega_j^2 M_j \text{ (Genelleştirilmiş rijitlik)} \quad (2.47c)$$

genelleştirilmiş kütle, sönüm ve rijitlik değerleri elde edilir. Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemde mod biçimlerinin dikliği dikkate alındığında elde edilen denklem,

$$M_j \ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j M_j \dot{q}_j + \omega_j^2 M_j q_j = \phi_j^T \mathbf{P} = P_j \quad (2.48a)$$

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \frac{\phi_j^T \mathbf{P}}{M_j} = \frac{P_j}{M_j} \text{ (AYRIK DENKLEM)} \quad (2.48b)$$

şeklindedir. Tüm modlar dikkate alındığında çok serbestlik dereceli sistemin ayrık denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\begin{aligned} j = 1 & \quad \ddot{q}_1 + 2\xi_1 \omega_1 \dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = \frac{\phi_1^T \mathbf{P}}{M_1} \\ j = 2 & \quad \ddot{q}_2 + 2\xi_2 \omega_2 \dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = \frac{\phi_2^T \mathbf{P}}{M_2} \\ & \quad \vdots \\ & \quad \vdots \\ j = n & \quad \ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{\phi_n^T \mathbf{P}}{M_n} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Genelleştirilmiş yük :

$$\frac{P_j}{M_j} = \frac{\phi_j^T \mathbf{P}}{M_j} = \frac{P_o}{M_j} \left( \sum_{i=1}^n i \phi_{ij} \right) \sin \omega t = \alpha_j \sin \omega t \quad (2.50)$$

$$\alpha_j = \frac{P_o}{M_j} \sum_{i=1}^n i \phi_{ij} \quad (2.51)$$

$$j=1 \quad P_1 = \frac{\phi_1^T \mathbf{P}}{M_1} = \frac{1}{M_1} \{ \phi_{11} P_o \sin \omega t + \phi_{21} 2P_o \sin \omega t + \dots + \phi_{n1} nP_o \sin \omega t \} \quad (2.50a)$$

$$P_1 = \frac{1}{M_1} P_o \{ \phi_{11} + 2\phi_{21} + 3\phi_{31} + \dots + n\phi_{n1} \} \sin \omega t \quad (2.50b)$$

$$P_1 = \left( \frac{P_o}{M_1} \sum_{i=1}^n \phi_{i1} i \right) \sin \omega t \quad (2.50c)$$

Sinüzoidal tipi dış yükü zorlanmış çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin hareket denklemi genelleştirilmiş koordinatlara göre;

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \left( \frac{P_o}{M_j} \sum_{i=1}^n i \phi_{ij} \right) \sin \omega t \quad (2.52)$$

şeklinde ifade edilir.

Tek serbestlik dereceli sönümlü sistemin hareket denklemi ile çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin genelleştirilmiş koordinatlara göre yazılan ayrık denklemi karşılaştırıldığında, tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi;

$$\ddot{u} + 2\xi \omega \dot{u} + \omega^2 u = \omega^2 u_{st} \sin \omega t \quad (2.53)$$

ile ifade edilirken, çok serbestlik dereceli sistemin genelleştirilmiş koordinatlara göre ayrık denklemi;

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \frac{P_o}{M_j} \frac{\omega_j^2}{\omega_j^2} \left[ \sum_{i=1}^n i \phi_{ij} \right] \sin \omega t \quad (2.54a)$$

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \frac{P_o}{K_j} \omega_j^2 \left[ \sum_{i=1}^n i \phi_{ij} \right] \sin \omega t \quad (2.54b)$$

ile ifade edilir. Burada aşağıdaki işlemler yapıldığında;

$$a_j = \sum_{i=1}^n i \phi_{ij} \quad (2.54c)$$

$$\bar{u}_{stj} = \frac{P_o a_j}{K_j} = \frac{P_j}{K_j} \quad (2.54d)$$

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2q_j = \frac{P_o}{K_j}\omega_j^2a_j \sin \omega t \quad (2.54e)$$

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2q_j = \bar{u}_{stj}\omega_j^2 \sin \omega t \quad (2.54f)$$

denklem 2.54f' deki çok serbestlik dereceli sistemin ayrıklaştırılmış hareket denklemini elde edilir.

Başlangıçta sükunette olan sistemin kararlı titreşimi sönümlü yapı için esas alındığında,

$$q_j(t) = \frac{\bar{u}_{stj}}{(1-\beta_j^2)^2 + (2\xi_j\beta_j)^2} \left[ (1-\beta_j^2) \sin \omega t - 2\xi_j\beta_j \cos \omega t \right] \quad (2.55)$$

$$\beta_j = \frac{\omega}{\omega_j} \longrightarrow j \text{ 'inci mod biçimine ait serbest titreşimin açısal frekansı} \quad (2.56)$$

olmak üzere genelleştirilmiş dış yük;

$$P_j = \phi_j^T \mathbf{P} = P_o a_j \quad (2.57)$$

olarak gösterilir. Buna göre yerdeğiştirme ,

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{j=1}^n \phi_j q_j(t) \quad (2.58)$$

$$u(t)_{SRSS} = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^n \phi_j q_j \right)^2} \quad (2.59)$$

ifadesiyle bulunur.

Başlangıçta sükunette olan sönümsüz sistemin kararlı titreşimi ele alınırsa genelleştirilmiş koordinat;

$$q_j(t) = \frac{\bar{u}_{stj}}{(1 - \beta_j^2)^2} \sin \omega t \quad (2.60)$$

şeklinde yazılır.

## 2.2. Zemin Alt Sistemi ve Empedans Analizi

### 2.2.1. Empedans Fonksiyonları (Dinamik Rijitlik)

Ağır makine temel titreşimleri ve trafik yüklerinin zemin ile etkileşimini hesaplamak amacıyla geliştirilen çözüm yaklaşımları, sismik hesaplar için de uzun bir süredir 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 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. Yapı-zemin etkileşim problemleri, temel-zemin sisteminin kompleks dinamik rijitliklerini gösteren empedans fonksiyonları ile değerlendirilmektedir. Aydınoğlu ve arkadaşları, göreceli olarak yumuşak zemine oturan deprem yüklerinin tamamen perdelerle taşındığı çok katlı ağır ve rijit yapıların zeminle dinamik etkileşim problemini, modal analiz çerçevesinde, hızlı fourier dönüşüm algoritması olanağını kullanarak incelemişlerdir. Bu yaklaşımda, sistemin hareket denklemlerindeki bilinmeyen sayısını kat ve temel yerdeğiştirmelerine indirgeyerek azaltmışlardır. Yumuşak zemin koşullarını eşdeğer deprem yer ivmesi üzerindeki etkilerine mühendisçe yaklaşımlar getirmişlerdir.

Altsistem yaklaşımında, üstyapı ve zemin iki ayrı sistem olarak ele alınır ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denge 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 imkânını verir.

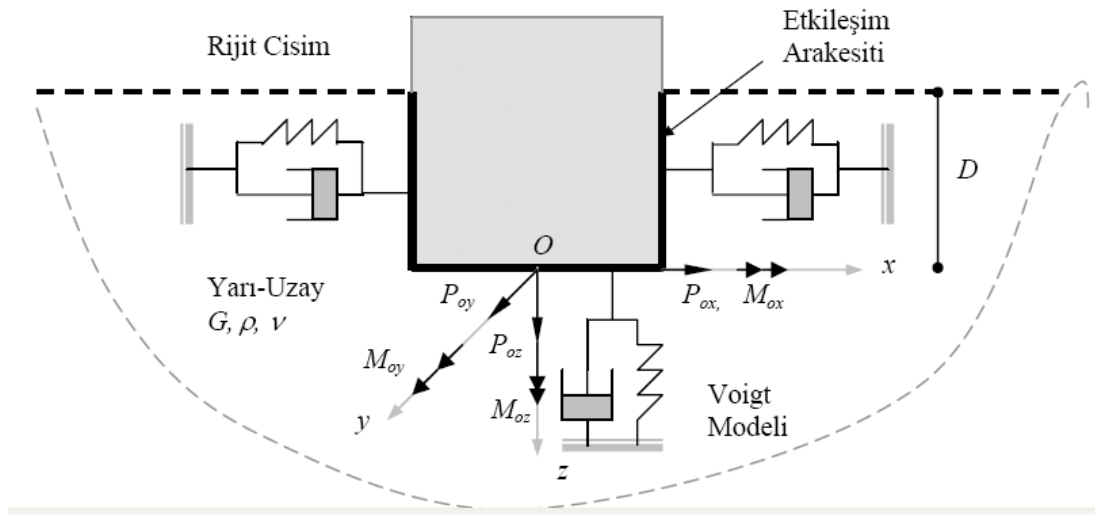
Temel ortamının rijitlik düzeyini yada başka bir ifadeyle zemin ortamının şekil değiştirebilme özelliğini gösteren bu karmaşık dinamik büyüklüklerin frekansa bağlı sayısal değerlerini hesaplayabilmek için günümüzde mevcut analitik ve yarı analitik çözüm yöntemlerinin (Veletsos ve Wei, 1971; Gazetas, 1983; Apsel ve Luco, 1987) yanında sınır elemanlar ve sonlu elemanlar gibi nümerik çözüm yöntemleriyle (Wolf, 1997; Çelebi ve diğ., 2006) bunların her ikisini de kapsayan karma çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Zeminin katkısını ifade eden bu eşdeğer elemanların dış yükün frekansına bağımlılığı, yapı dinamiği problemlerini özellikle karşılıklı etkileşen sistemlerin davranışının araştırılmasını daha karmaşık hale getirmektedir.

Bu çalışmada dinamik dış yükler etkisi altında titreşen üstyapı-temel-zemin ortak sisteminin dinamik davranışı, temel-zemin arakesitinde tanımlanan titreşim kaynağının frekansından bağımsız sabit değerli empedans fonksiyonlarına bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla zemin koşulları tabakalı zemin ve zeminin sertliğini gösteren değişken değerlerle ayrı ayrı incelenmiştir.



### 2.2.2. 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 temelinin sonsuz rijit olarak alınması durumunda arakesit yerdeğiştirmelerini, temelin 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 2.5. Elastik yarı uzayda rijit cisim modeli

Şekil 2.5'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,  $u_{gx}$ , sadece  $x$  doğrultusunda olması durumu için,

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

$$P = KU$$

(2.61)

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, temelin her bir titreşim moduna karşı gelen frekansa bağlı karmaşık değerli dinamik rijitlik matrisi, bir başka deyişle kütsüz temelin empedans matrisi K ile gösterilmiştir. Zemin altsisteminde etkileşim yüzeyi için tanımlanan dinamik rijitlik matrisinin tersi alınarak, frekansa bağlı kompleks dinamik fleksibilite matrisi elde edilir ve bunlardan yararlanarak elde edilen transfer fonksiyonları  $f$  kullanılarak rijit temel çözümüne gidilir;

$$U = K^{-1}P = fP \quad (2.62)$$

Eğer yapı-temel sistemi iki simetri düzlemiyle tanımlanmış ise, öteleme ile burulma hareketi arasında bağımlılık 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;

$$a_o = \omega B / c_s \quad (2.63)$$

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

$$K_\alpha(\omega) = K_{s\infty\alpha}(k_\alpha(a_o) + ia_o c_\alpha(a_o))(1 + 2i\beta) \quad (2.64)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $K_{sj}$  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 bağlı dinamik empedans büyüklükleri aşağıda belirtildiği gibi hesap edilecektir [4]:

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

$$K_\alpha(\omega) = \frac{8Gr}{2-\nu}(k_\alpha + ia_o c_\alpha); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \quad (2.65)$$

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

$$K_\alpha(\omega) = \frac{4Gr}{1-\nu}(k_\alpha + ia_o c_\alpha); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \quad (2.66)$$

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

$$K_\alpha(\omega) = \frac{8Gr_\alpha^3}{3(1-\nu)}(k_\alpha + ia_o c_\alpha); \quad r_{mx} = \sqrt[4]{\frac{16B^3L}{3\pi}}, \quad r_{my} = \sqrt[4]{\frac{16BL^3}{3\pi}}, \quad (2.67)$$

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

$$K_{\alpha}(\omega) = \frac{16Gr^3}{3}(k_{\alpha} + ia_0c_{\alpha}); \quad r_{\alpha} = \sqrt[4]{\frac{8BL(B^2 + L^2)}{3\pi}} \quad (2.68)$$

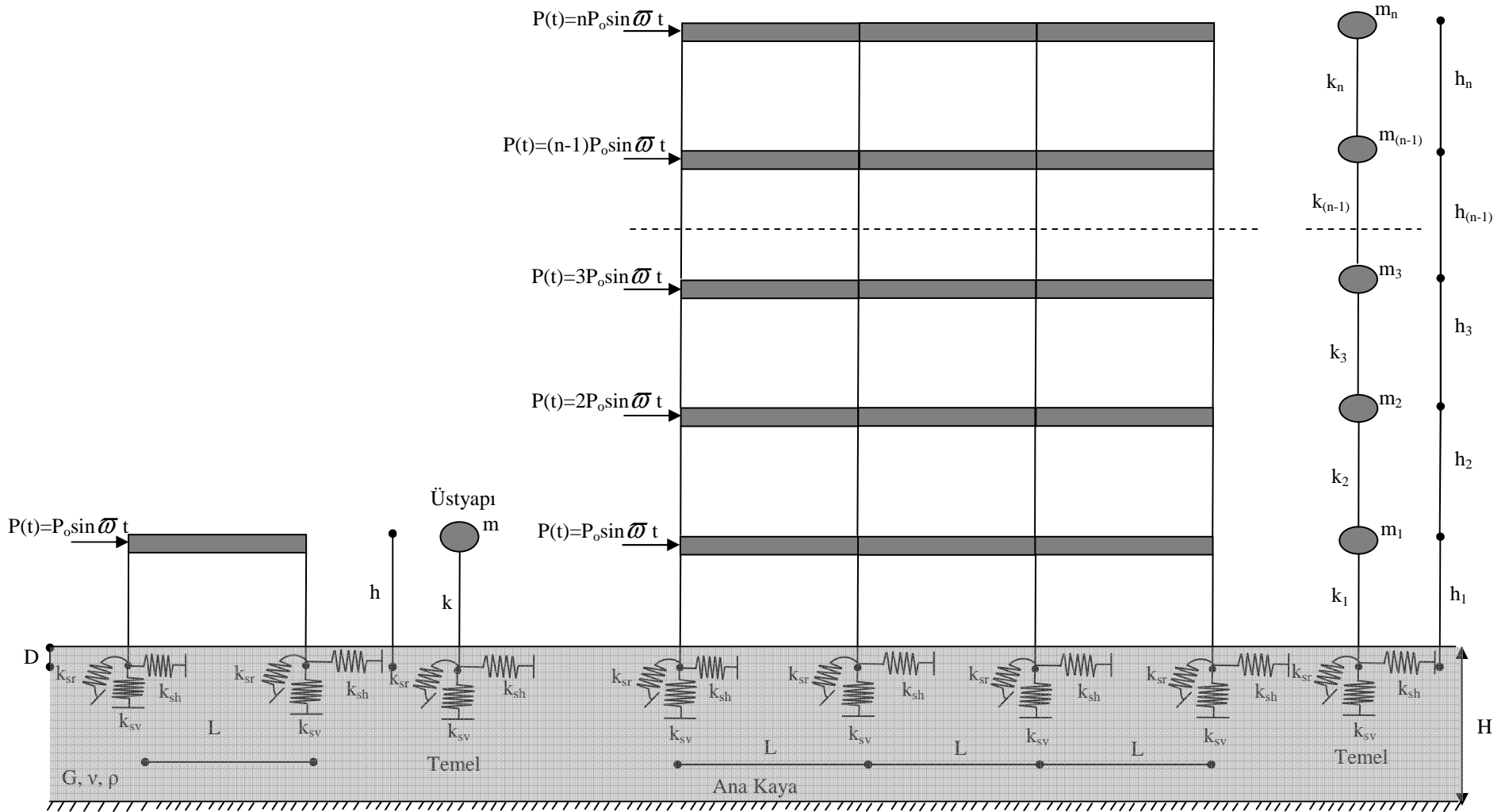
Bağlaşıklık modunda ( $\alpha = mx,y; my,x$ ):

$$K_{\alpha}(\omega) = \frac{8Gr^2}{2-\nu}(k_{\alpha} + ia_0c_{\alpha}); \quad r = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} \quad (2.69)$$

Yapılan çalışmada dinamik empedans büyüklükleri statik rijitlik değeri baz alınarak elde edilmiştir. Statik rijitlikler belirlenirken, yüzeysel ve gömülü temel durumu için FEMA 356'nın Gazetas'a dayalı formüllerinden yararlanılmıştır.

## **BÖLÜM 3. SAYISAL MODEL VE NÜMERİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ**

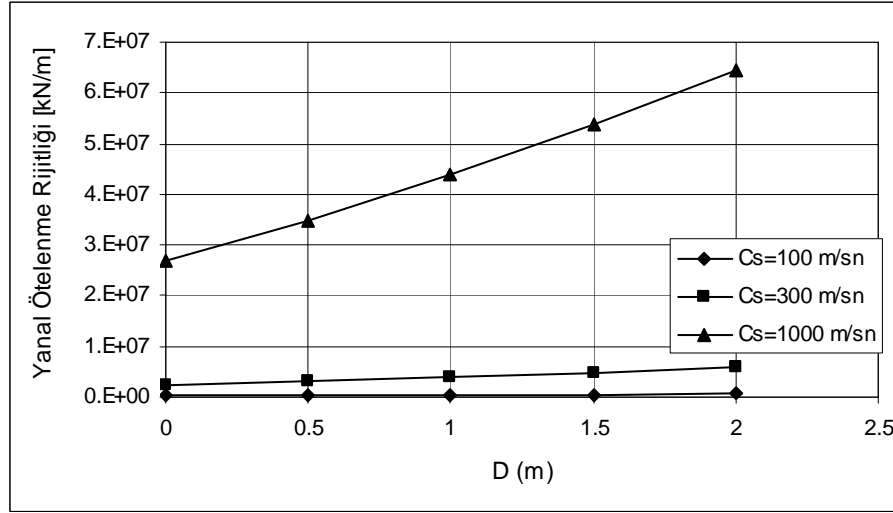
Yapılan bu çalışmada ilk olarak elastik yarı sonsuz zemin bölgesine oturan rijit kütleli boyutları  $L=B=4$  m olarak tanımlanmış kare biçimindeki bir temel plağının üzerindeki tek katlı ve tek açıklıklı bir yapının dinamik davranışı, kat seviyesinde etki eden sinüzoidal dinamik yüke göre zorlanmış titreşimi incelenmiş ve yapı-zemin ortak sistemine ait bazı temel dinamik büyüklükler (periyot, üst kat yerdeğiştirmesi, mod şekilleri, taban kesme kuvveti v.s.) sistem parametrelerine bağlı olarak elde edilmiştir. Sayısal modelleme yapılırken değişen kalınlıktaki ( $H=5, 20$  m) ana kaya tabanlı tek tabakalı zemin ortamında yer alan temelin yüzeysel ve gömülü ( $D=0.5, 1, 1.5, 2$  m) olma durumundaki parametreleri kullanılmıştır. Dinamik davranışı belirleyen etkin sistem parametreleri olarak zemin ortamının şekil değiştirme özelliğini yani rijitliğini ifade eden  $c_s$  kayma dalga hızının ( $c_s=100, 300, 500, 1000$  m/sn) ve dış yükün frekans değerlerinin değişimi ( $f = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50$  Hz) de dikkate alınmıştır. Temelin oturduğu zemin bölgesinin malzeme özellikleri tüm sayısal örneklerde; zemin yoğunluğu  $\rho=2$  t/m<sup>3</sup>, Poisson oranı  $\nu=0.33$  olarak çözüme katılmıştır. Başlangıçta tek katlı basit yapılar için yürütölen bu çalışma daha sonra yukarıda verilen kontrol parametrelerine bağlı olarak çok katlı yapıların dinamik davranışını incelemek içinde genişletilmiştir (Şekil 3.1).



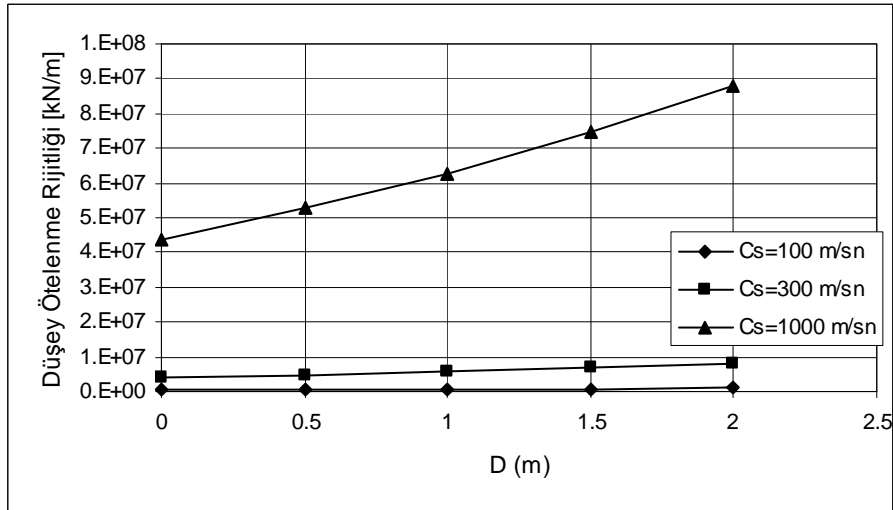
Şekil 3.1. Tabakalı zemin ortamına ait yapı-zemin modeli

### 3.1. Tabakalı zemin durumu için kayma dalga hızına bağlı değişen empedans fonksiyonlarında rijitlik değerlerinin değişimi

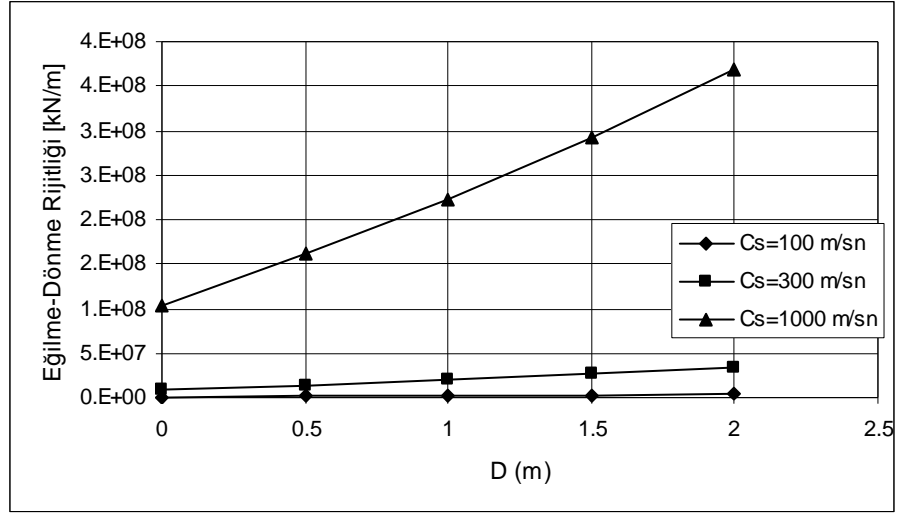
Temel tabanı ile zemin arakesitinde temel gömülme derinliği dikkate alınarak elde edilen statik ötelenme (yanal, düşey) ve dönme rijitlik değerlerinin zemin ortamının rijitliğine ve zemin tabaka kalınlığına bağlı değişimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



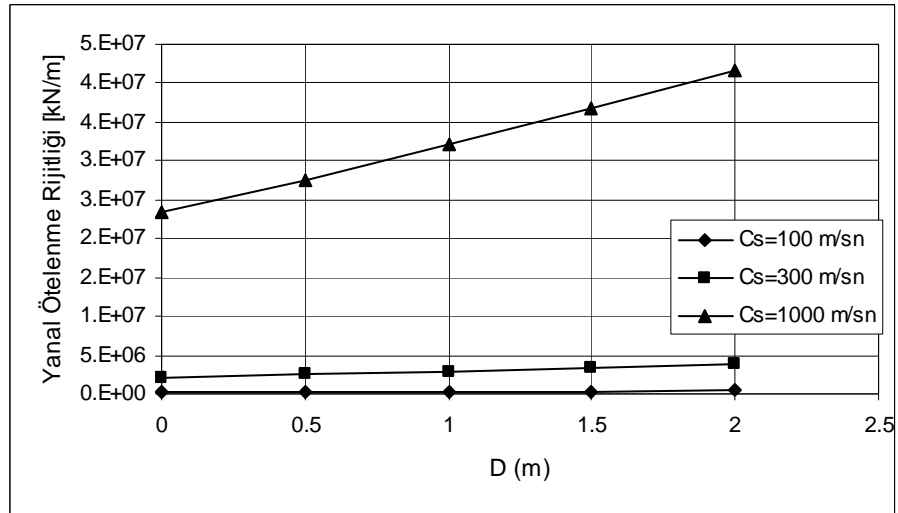
(a) Yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına ve temel gömülme derinliğine bağlı değişimi (Tabaka kalınlığı, H=5 m)



(b) Düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına ve temel gömülme derinliğine bağlı değişimi (Tabaka kalınlığı, H=5 m)

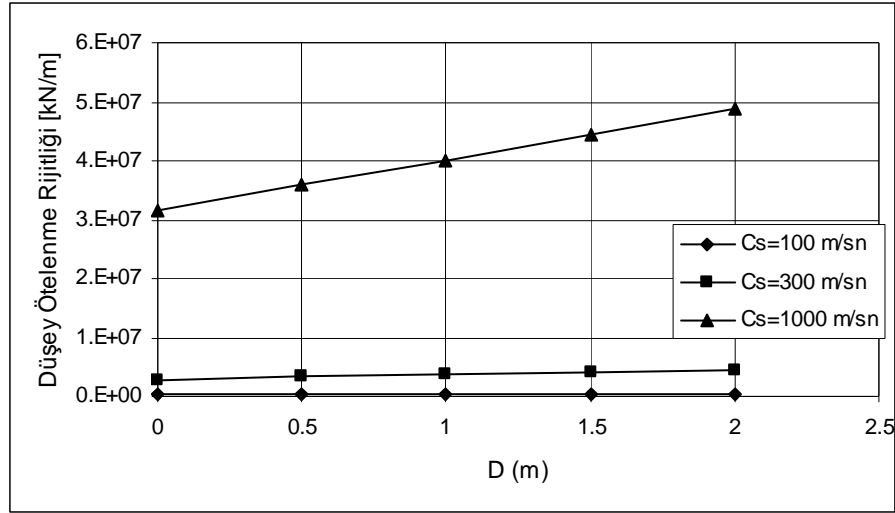


(c) Eğilme-Dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına ve temel gömülme derinliğine bağlı değişimi (Tabaka kalınlığı, H=5 m)

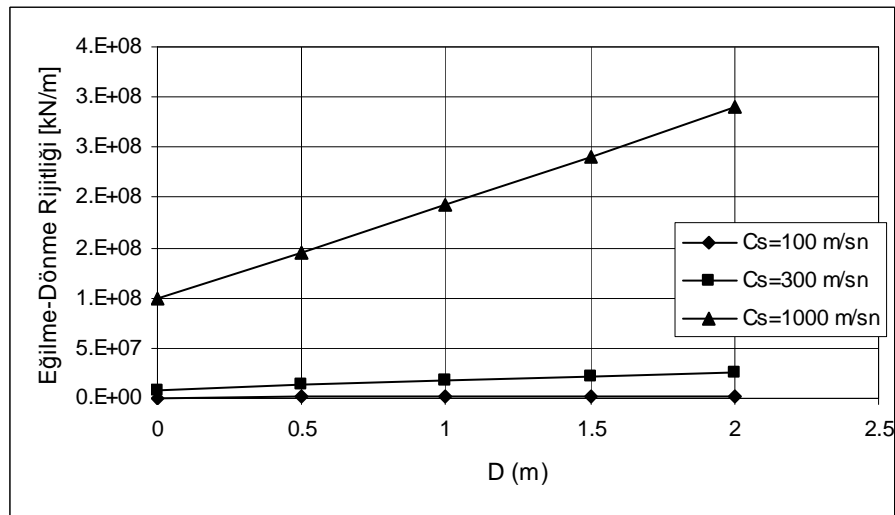


(d) Yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına ve temel gömülme derinliğine bağlı değişimi (Tabaka kalınlığı, H=20 m)





(e) Düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına ve temel gömülme derinliğine bağlı değişimi (Tabaka kalınlığı, H=20 m)



(f) Eğilme-Dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına ve temel gömülme derinliğine bağlı değişimi (Tabaka kalınlığı, H=20 m)

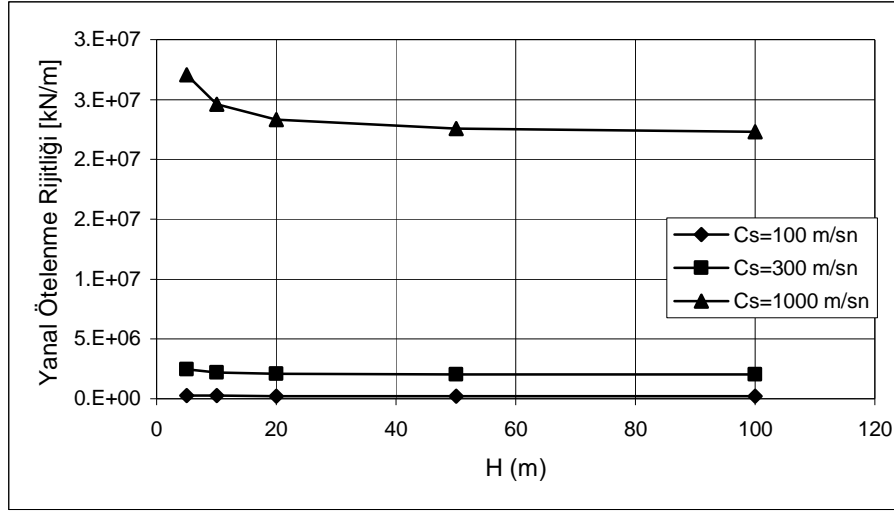
Şekil 3.2. Tabakalı zemin durumu (H=5m, 20m) için kayma dalga hızlarının değişimi dikkate alınarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine bağlı (D=0, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m) değişimi

Şekil 3.2a'da yanal ötelenme rijitliğinin, yumuşak zemin ortamında daha küçük değerler aldığı görülmektedir (Zemin kayma dalga hızının 1000 m/sn'deki yanal ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 100 kat fazladır). Ayrıca temelin gömülme derinliği arttıkça yanal ötelenme rijitlik değeri artmaktadır (Yanal ötelenme rijitlik değerleri, temel gömülme derinliğinin 0 m'den 2 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık 2.4 kat artmıştır). Şekil 3.2b'de düşey ötelenme rijitliğinin, zemin ortamının yumuşak olduğu durumlarda daha küçük değerler

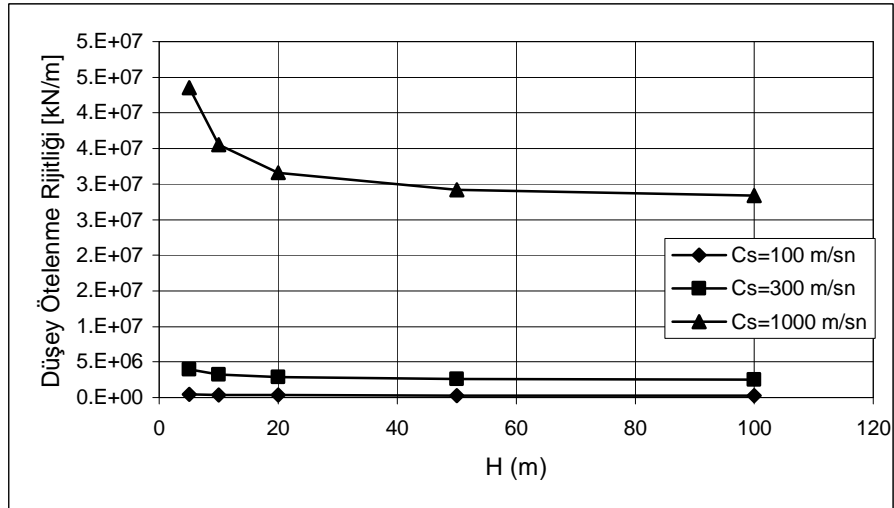
aldığı görülmektedir (Zemin kayma dalga hızının 300 m/sn'deki düşey ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 9 kat daha fazladır). Temelin gömülme derinliği arttıkça düşey ötelenme rijitlik değerinin arttığı görülmektedir (Düşey ötelenme rijitlik değerleri, temel gömülme derinliğinin 0 m'den 2 m'ye çıkması sonucunda 2 kat artmıştır). Şekil 3.2c'de eğilme-dönme rijitliğinin zemin ortamının yumuşaklığı arttıkça küçüldüğü görülmektedir (Zemin kayma dalga hızının 1000 m/sn'deki eğilme-dönme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 100 kat fazladır). Temelin gömülme derinliği arttıkça eğilme-dönme rijitlik değerinin arttığı gözlenmektedir (Eğilme-dönme rijitlik değerleri, temel gömülme derinliğinin 0 m'den 2 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık 3.5 kat artmıştır).

Zemin tabaka kalınlığının 20 m olduğu durumda yanal, düşey ötelenme ve eğilme-dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine bağlı değişimlerini gösteren Şekil 3.2 (d-f)'deki grafiklerin; zemin tabaka kalınlığının 5 m olduğu durumdaki yanal, düşey ötelenme ve eğilme-dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine bağlı değişimlerini gösteren Şekil 3.2(a-c)'deki grafiklerle aynı özellikleri gösterdiği fakat rijitlik değerlerinin daha küçük olduğu görülmektedir (zemin kayma dalga hızı 100 m/sn olan yüzeysel temelde zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda yanal ötelenme rijitlik değeri %14 azalmakta, düşey ötelenme rijitlik değeri %27.5 azalmakta, eğilme-dönme rijitlik değeri %5.3 azalmaktadır).

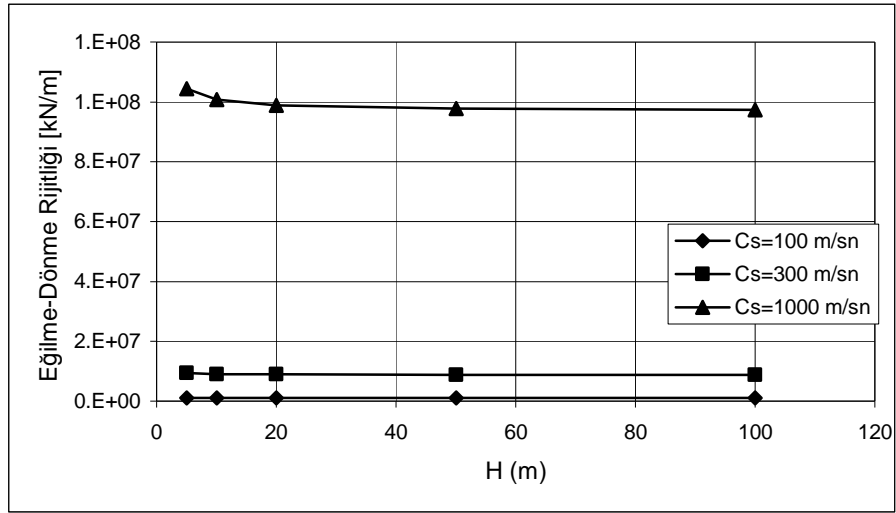
Yapının temeli ile zemin arakesitinde zemin tabaka kalınlığındaki değişimler dikkate alınarak elde edilen yanal, düşey ötelenme ve eğilme-dönme rijitliklerinin zeminin cinsine ve temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi Şekil 3.3’de incelenmiştir.



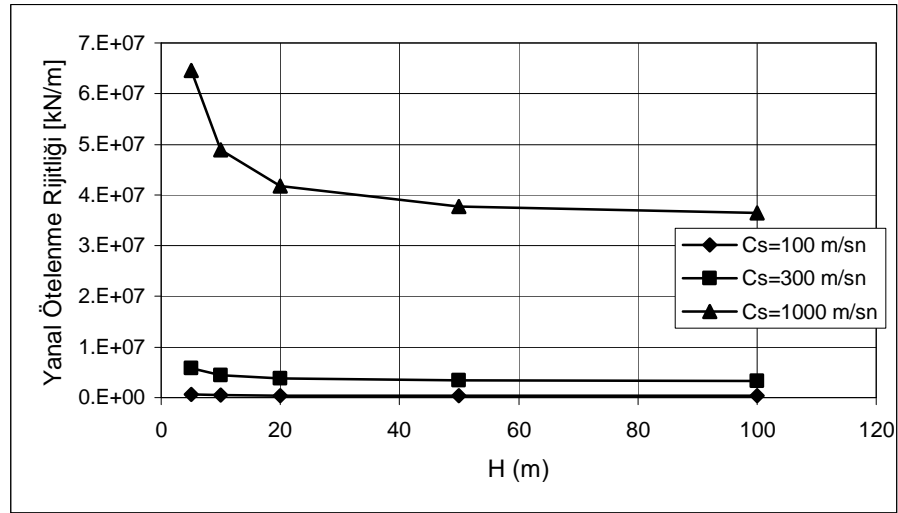
(a) Tabakalı zemin durumunda yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (Temel gömülme derinliği, D=0 m)



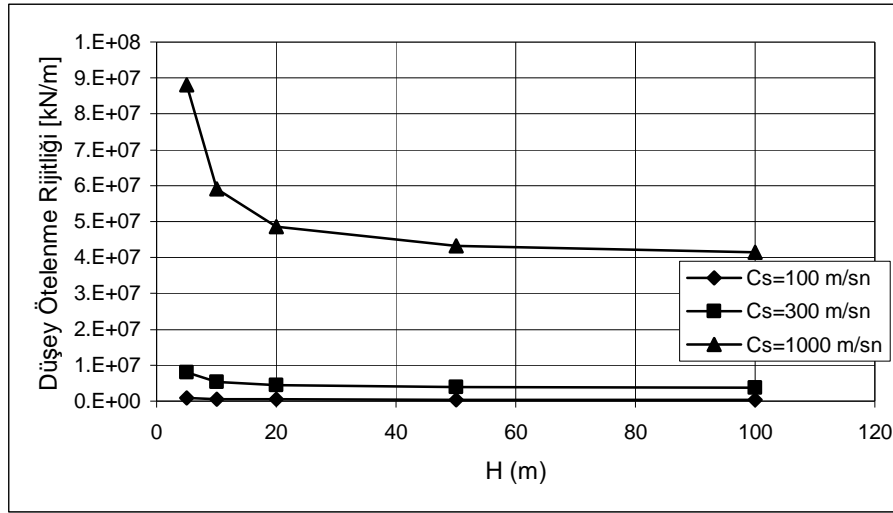
(b) Tabakalı zemin durumunda düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (Temel gömülme derinliği, D=0 m)



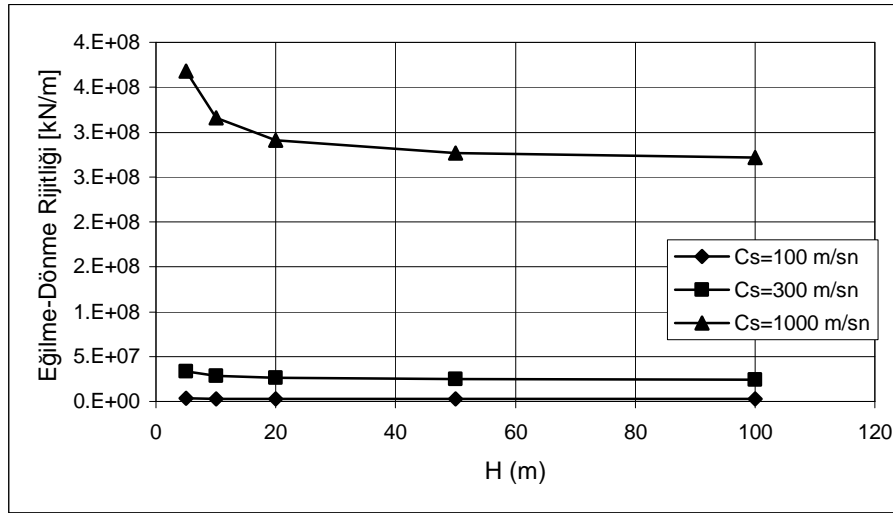
(c) Tabakalı zemin durumunda eğilme-dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (Temel gömülme derinliği,  $D=0$  m)



(d) Tabakalı zemin durumunda yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (Temel gömülme derinliği,  $D=2$  m)



(e) Tabakalı zemin durumunda düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (Temel gömülme derinliği,  $D=2$  m)



(f) Tabakalı zemin durumunda eğilme-dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (Temel gömülme derinliği,  $D=2$  m)

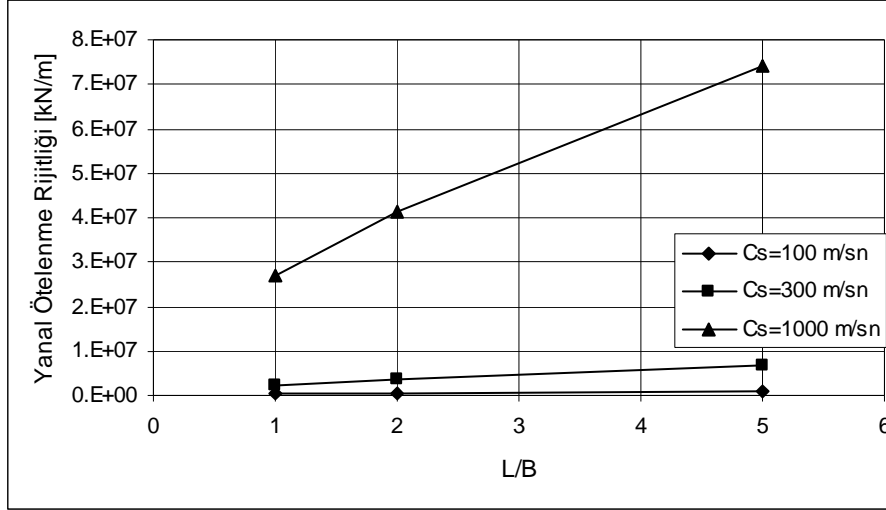
Şekil 3.3. Tabakalı zemin durumu ( $H=5$ m,  $10$ m,  $20$ m,  $50$ m,  $100$ m) için zeminin kayma dalga hızına bağlı olarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin temel gömülme derinliğine ( $D=0$ m ve  $2$ m) bağlı değişimi

Şekil 3.3a'da yanal ötelenme rijitliğinin yumuşak zemin ortamında daha küçük değerler aldığı görülmektedir (Zemin kayma dalga hızının  $1000$  m/sn'deki yanal ötelenme rijitlik değeri,  $100$  m/sn'deki değerinden  $100$  kat fazladır). Ayrıca zemin tabaka kalınlığı arttıkça yanal ötelenme rijitlik değeri azalmaktadır (Yanal ötelenme rijitlik değerleri, zemin tabaka kalınlığının  $5$  m'den  $100$  m'ye çıkması sonucunda yaklaşık %17.5 oranında azalmaktadır). Şekil 3.3b'de düşey ötelenme rijitliği zemin ortamının yumuşaması durumunda daha küçük değerler

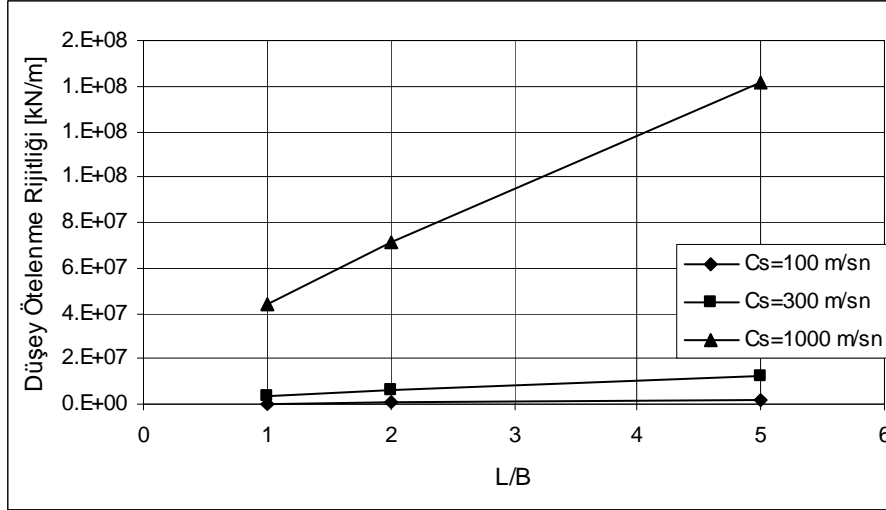
almaktadır (Zemin kayma dalga hızının 300 m/sn'deki düşey ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 9 kat daha fazladır). Zemin tabaka kalınlığındaki artışın ise düşey ötelenme rijitlik değerini azalttığı görülmektedir (Düşey ötelenme rijitlik değerleri, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 100 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık %34.8 oranında azalmaktadır). Şekil 3.3c'de görüldüğü gibi eğilme-dönme rijitliği yumuşak zemin ortamında daha küçük değerler almaktadır (Zemin kayma dalga hızının 1000 m/sn'deki düşey ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 100 kat fazladır). Zemin tabaka kalınlığındaki artışın ise eğilme-dönme rijitlik değerini azalttığı gözlenmektedir (Eğilme-dönme rijitlik değerleri, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 100 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık %6.7 oranında azalmaktadır).

Temel gömülme derinliğinin 2 m olduğu durumda yanal, düşey ötelenme ve eğilme-dönme rijitliklerinin zemin tabaka kalınlıklarına bağlı değişimlerini gösteren Şekil 3.3(d-f)'deki grafiklerin; Temelin zemine yüzeysel gömülü olduğu durumdaki yanal, düşey ötelenme ve eğilme-dönme rijitliklerinin zemin tabaka kalınlıklarına bağlı değişimlerini gösteren Şekil 3.3(a-c)'deki grafiklerle aynı özellikleri gösterdiği fakat rijitliklerinin daha büyük değerler aldığı görülmektedir (Zemin kayma dalga hızı 100 m/sn ve zemin tabaka kalınlığı 5 m olan yapı temelinin gömülme derinliğinin 0 m'den 2 m'ye çıkması durumunda yanal ötelenme rijitlik değeri 2.4 kat, düşey ötelenme rijitlik değeri 2 kat, eğilme-dönme rijitlik değeri 3.5 kat artmıştır).

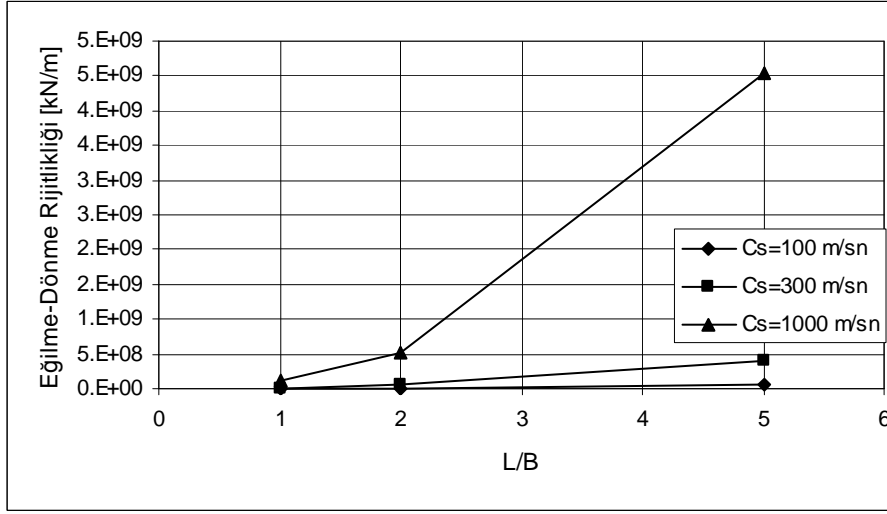
Temel tabanı ile zemin arakesitinde L/B oranının değişimine bağlı elde edilen statik ötelenme ve dönme rijitlik değerlerinin zemin ortamının özelliklerine ve temelin gömülme derinliğine bağlı değişimi Şekil 3.4'te görülmektedir.



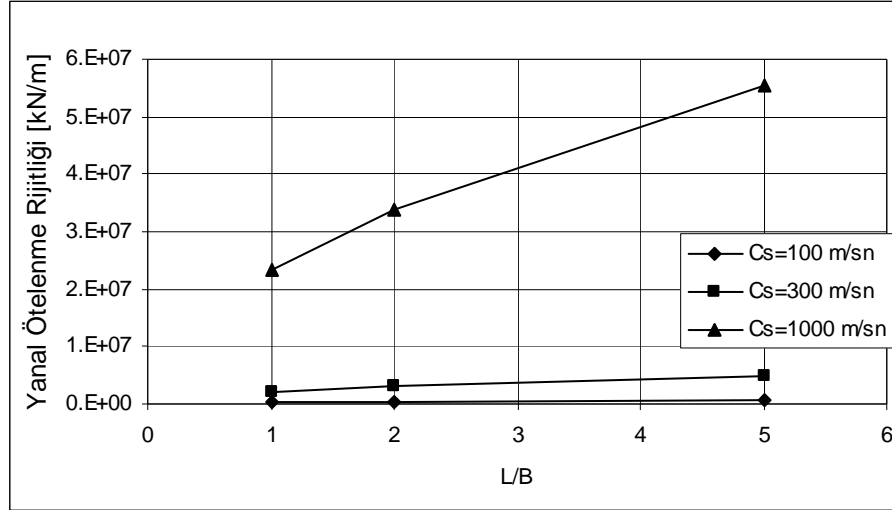
(a) Yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (D=0 m ve H=5 m)



(b) Düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (D=0 m ve H=5 m)

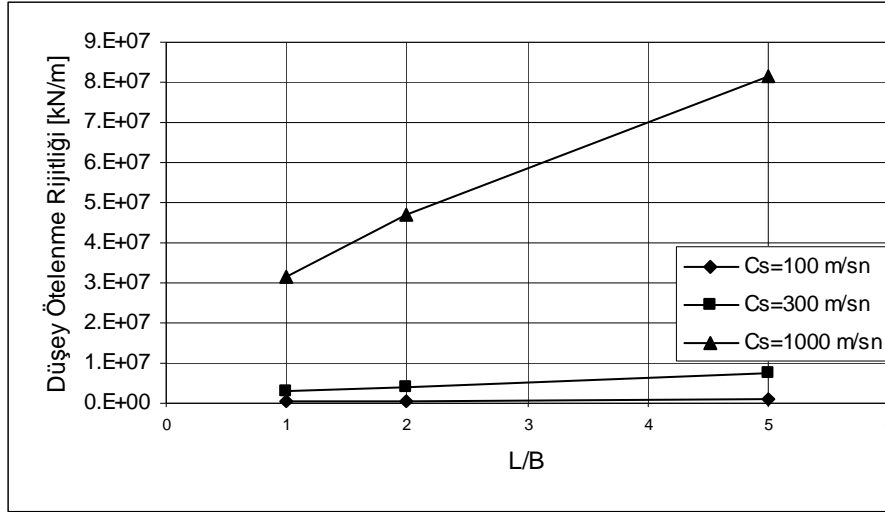


(c) Eğilme-Dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=0 m ve H=5 m)

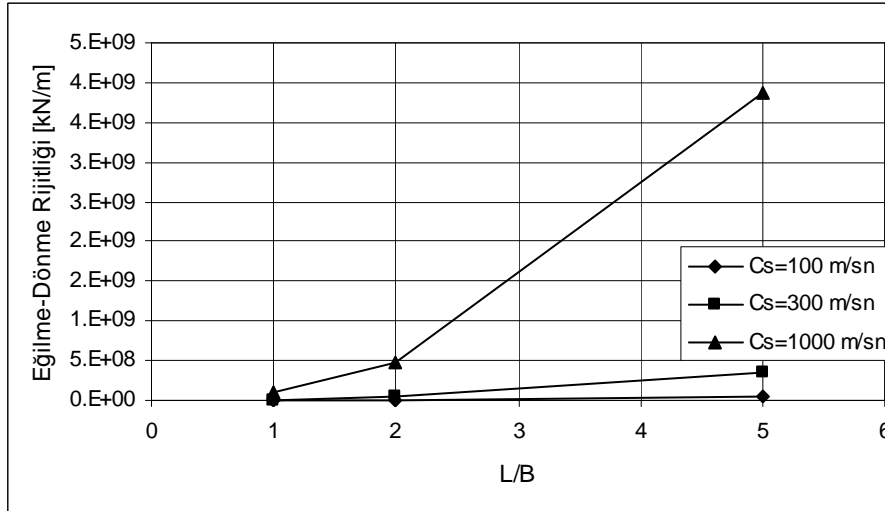


(d) Yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=0 m ve H=20 m)

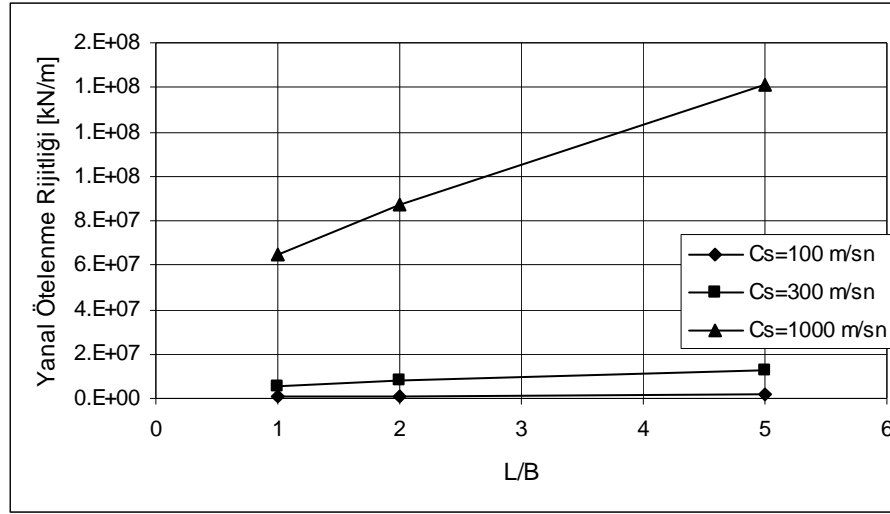




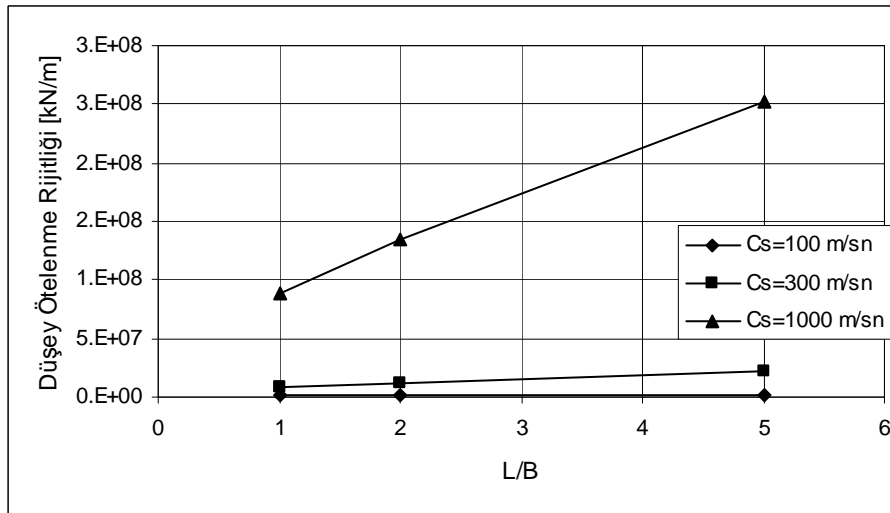
(e) Düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (D=0 m ve H=20 m)



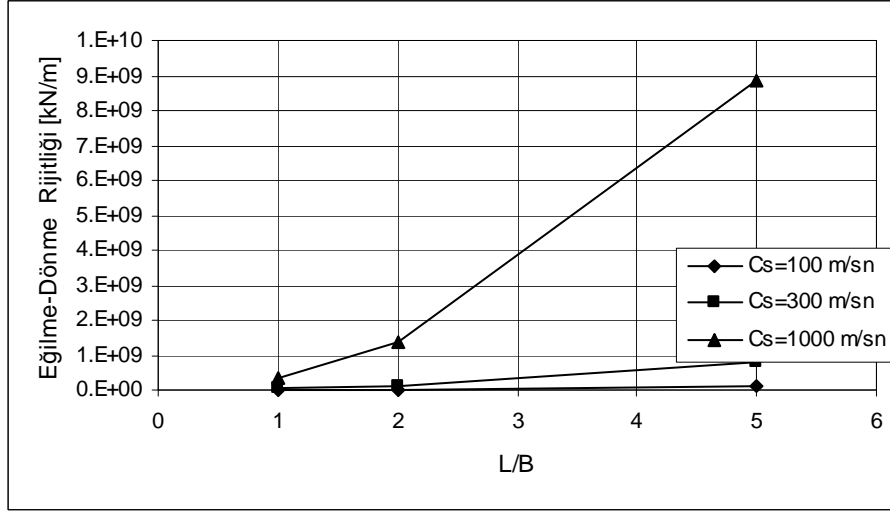
(f) Eğilme-Dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi (D=0 m ve H=20 m)



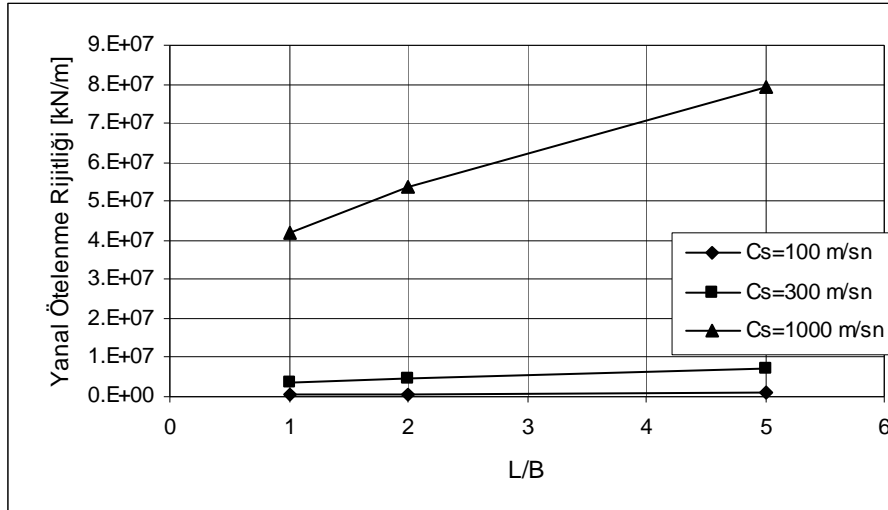
(g) Yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=2 m ve H=5 m)



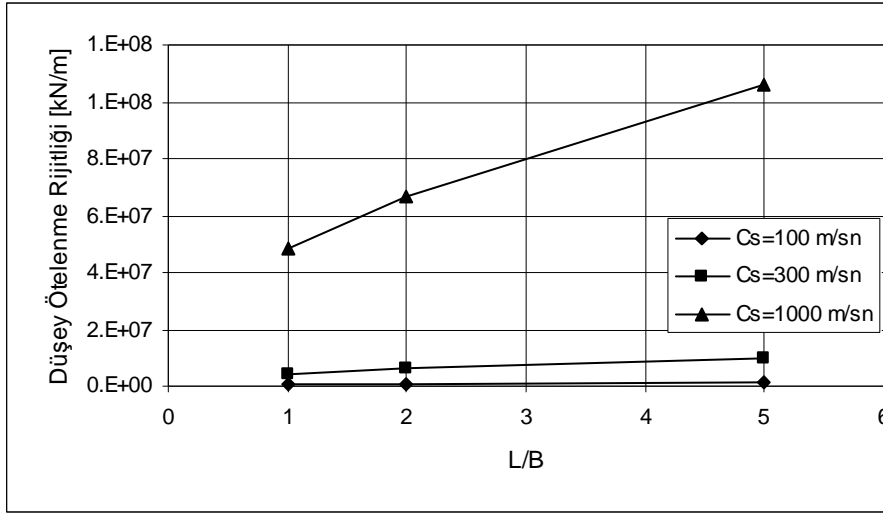
(h) Düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=2 m ve H=5 m)



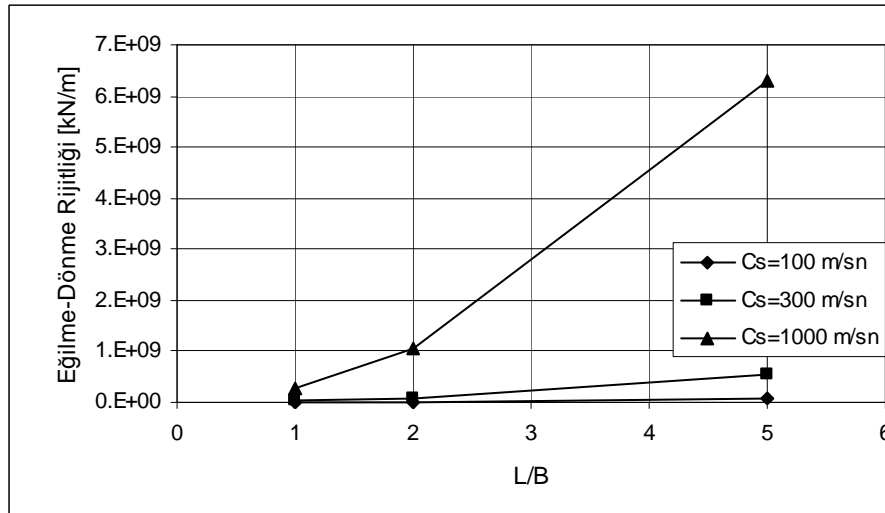
(ı) Eğilme-Dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=2 m ve H=5 m)



(k) Yanal ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=2 m ve H=20 m)



(l) Düşey ötelenme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=2 m ve H=20 m)



(m) Eğilme-Dönme rijitliğinin farklı zemin koşullarına bağlı değişimi  
(D=2 m ve H=20 m)

Şekil 3.4. Tabakalı zemin durumu (H=5 m, 20 m) için temel gömülme derinliği (D=0 m, 2 m) ile zeminin kayma dalga hızının ( $c_s=100$  m/sn, 300 m/sn, 1000 m/sn) değişimi dikkate alınarak zemin ötelenme ve dönme rijitliklerinin L/B oranına bağlı (L/B=1, 2 ve 5) incelenmesi

Şekil 3.4(a-c)'de rijitlik değerleri yüzeysel temeller (D=0) ve belirli bir tabaka kalınlığındaki (H=5 m) zeminler için incelenmiştir. Şekil 3.4a'da yanal ötelenme rijitliğinin yüzeysel temellerde ve belirli bir tabaka kalınlığında olan yumuşak zeminlerde daha küçük değerler aldığı görülmektedir (Zemin kayma dalga hızının 1000 m/sn'deki yanal ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 100 kat fazladır). Ayrıca L/B oranı arttıkça yanal ötelenme rijitliği de artmaktadır (Yanal ötelenme rijitlik değerleri, L/B oranının 1 m'den 5 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık 2.75 kat artmaktadır). Şekil 3.4b'de düşey ötelenme rijitliği

yumuşak zeminlerde daha küçük değerler almaktadır (Zemin kayma dalga hızının 300 m/sn'deki yanal ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 9 kat daha fazladır). L/B oranının artmasıyla düşey ötelenme rijitliğinin de arttığı görülmüştür (Düşey ötelenme rijitlik değerleri, L/B oranının 1 m'den 5 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık 3.25 kat artmaktadır). Şekil 3.4c eğilme-dönme rijitliği yumuşak zeminlerde daha küçük değerler almaktadır (Zemin kayma dalga hızının 1000 m/sn'deki yanal ötelenme rijitlik değeri, 100 m/sn'deki değerinden 100 kat fazladır). Eğilme-dönme rijitlik değerleri, L/B oranının artması sonucunda artış göstermektedir (Eğilme-dönme rijitlik değerleri, L/B oranının 1 m'den 5 m'ye çıkması sonucunda yaklaşık 44 kat artmaktadır).

Şekil 3.4(d-f)'de şekil 3.4(a-c)'ye göre zemin tabaka kalınlığı artmıştır (H=5 m'den H=20 m'ye çıkmıştır). Bu artış ötelenme (yanal ve düşey) ve eğilme-dönme rijitliklerinin değerlerinde düşüşe neden olmuştur (zemin kayma dalga hızı 100 m/sn olan yüzeysel temel durumu için, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda yanal ötelenme rijitlik değeri %13.8, düşey ötelenme rijitlik değeri %27.5, eğilme-dönme rijitlik değeri %5.3 azalmıştır).

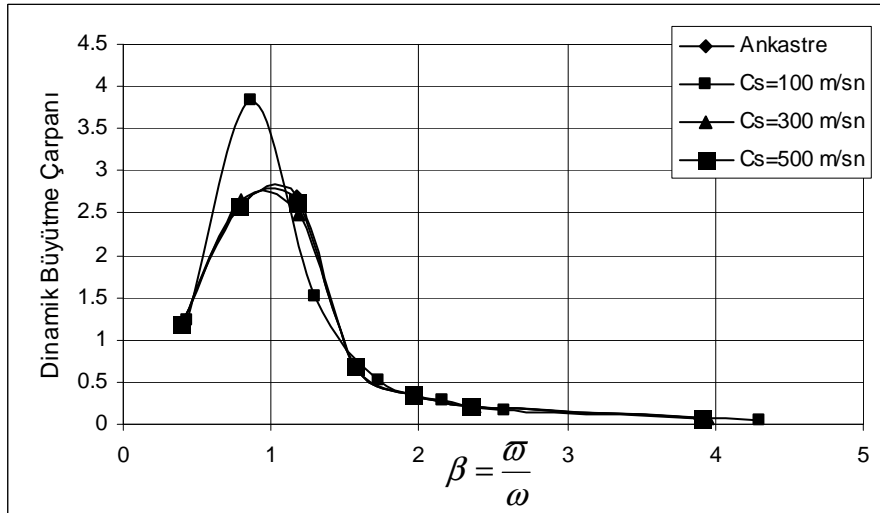
Şekil 3.4(g-i)'de şekil 3.4(a-c)'ye göre temel gömülme derinliği artmıştır (D=0 m'den D=2 m'ye çıkmıştır). Temel gömülme derinliğindeki bu artış ötelenme (yanal ve düşey) ve eğilme-dönme rijitliklerini arttırmıştır (zemin kayma dalga hızı 100 m/sn ve zemin tabaka kalınlığı 5 m olan yapı temelinin gömülme derinliğinin 0 m'den 2 m'ye çıkması durumunda yanal ötelenme rijitlik değeri 2.4 kat, düşey ötelenme rijitlik değeri 2 kat, eğilme-dönme rijitlik değeri 3.5 kat artmıştır).

Şekil 3.4(k-m)'de şekil 3.4(g-i)'ye göre temel gömülme derinliğinin 2 m olması durumunda zemin tabaka kalınlığının artışı incelenmiştir (H=5 m'den H=20 m'ye çıkmıştır). Bu artışın ötelenme (yanal ve düşey) ve eğilme-dönme rijitlikleri değerlerinde düşüşe neden olduğu gözlenmektedir (zemin kayma dalga hızı 100 m/sn ve temel gömülme derinliği 2 m olan yapının zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda yanal ötelenme rijitlik değeri %35.4, düşey ötelenme rijitlik değeri %44.8, eğilme-dönme rijitlik değeri %20.8 oranında azalmıştır).

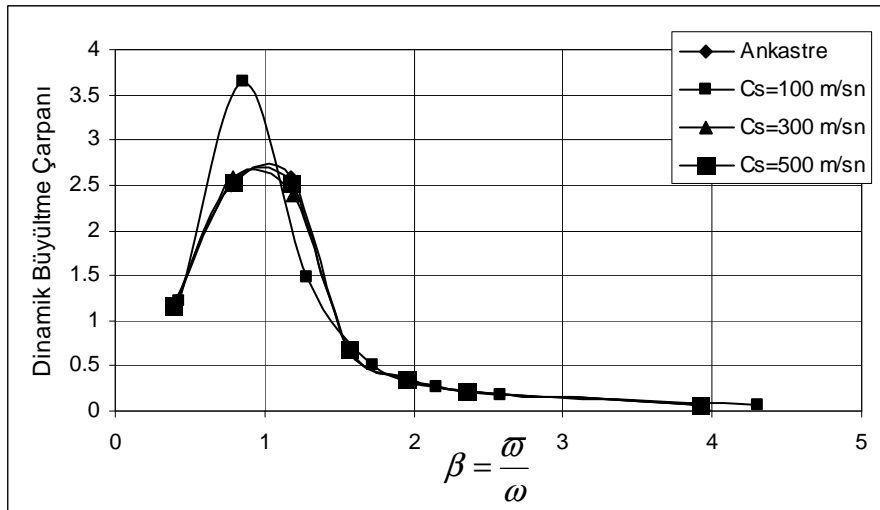
Şekil 3.4(k-m)'de Şekil 3.4(a-c)'ye göre temel gömülme derinliğindeki ve zemin tabaka kalınlığındaki artışlar incelenmiştir (D=0 m'den, 2 m'ye; H=5 m'den H=20 m'ye çıkmıştır).

### 3.2. TSD ve ÇSD düzlem çerçeve sistemlerin dinamik büyütme çarpanlarının ve yerdeğiştirmelerinin değişen empedans fonksiyonlarına dayalı incelenmesi

Kat seviyesinde sinüzoidal yatay yükü zorlanmış tek katlı düzlem çerçevesel sistemin dinamik davranışını temsil eden dinamik büyütme çarpanının zemin rijitliklerine bağlı değişimi farklı titreşim frekansları için şekil 3.5'te elde edilmiştir.



(a) Tek katlı sönümsüz sistemlerde DMF değerlerinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açısal frekansına bağlı değişimi



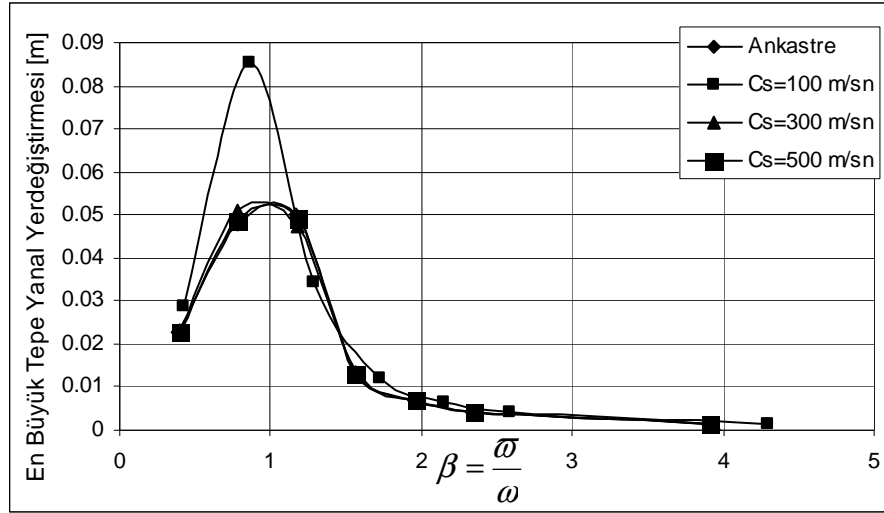
(b) Tek katlı sönümlü sistemlerde DMF değerlerinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açısal frekansına bağlı değişimi

Şekil 3.5. Tek katlı düzlem çerçevesel sistemin oturduğu zeminin şekil değiştirme özelliklerine bağlı olarak dinamik büyütme çarpanının boyutsuz açısal frekans değerine göre değişimi

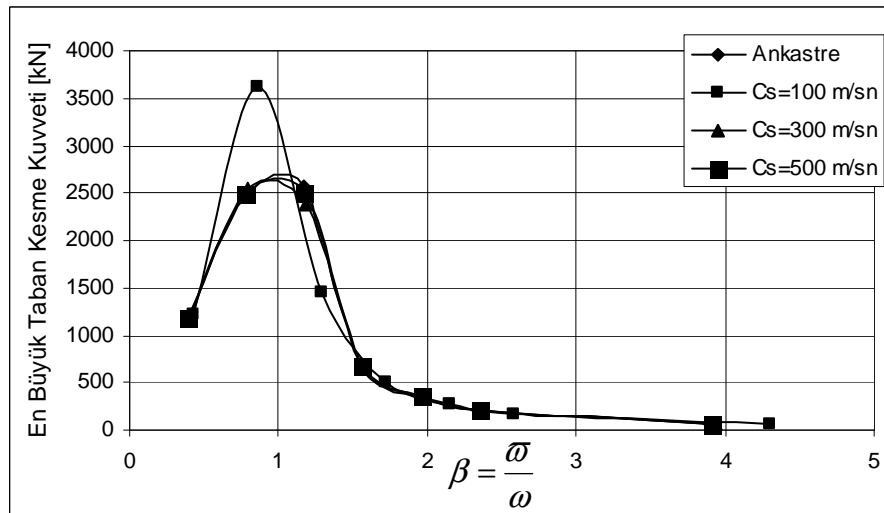
Şekil 3.5a'da sönümsüz tek katlı düzlem çerçeve sistemine ait dinamik büyütme çarpanı ( $R_d$ ) yapı temelinin oturduğu zemin rijitliğine bağlı olarak incelendiğinde  $R_d$ 'nin zeminin rijitlik değişiminden farklı şekillerde etkilendiği ortaya çıkmaktadır (Dış yükün açısal frekansının 5 Hz olması durumunda zemin kayma dalga hızının 100 m/sn'den 500 m/sn'ye çıkması dinamik büyütme çarpanını %3.7 oranında azaltmıştır; dış yükün açısal frekansının 30 Hz olması durumunda ise zemin kayma dalga hızının 100 m/sn'den 500 m/sn'ye çıkması dinamik büyütme çarpanını %25 oranında arttırmıştır). Zemin ortamının rijitliği azaldıkça  $R_d$  eğrisindeki pik değerlerin sola doğru kaydığı görülmektedir. Zeminin en yumuşak olduğu durumda ( $c_s=100$  m/sn)  $R_d$ 'nin pik değeri en büyük değerini almaktadır (Rezonans durumuna karşılık gelen dinamik büyütme çarpanının değeri, zemin kayma dalga hızı 100 m/sn iken 500 m/sn'ye göre %17 daha büyük bir değer almaktadır).

Şekil 3.5b'de sönümlü tek katlı düzlem çerçevesi sistemin zeminle dinamik etkileşimi incelendiğinde dinamik büyütme çarpanında yapısal sönümden kaynaklanan bir azalma olduğu görülmektedir (Dış yükün 5 Hz'lik açısal frekans değeri için; dinamik büyütme çarpanının sönümlü sistemlerde sönümsüz sistemlere göre zemin kayma dalga hızının 100 m/sn olması durumunda %0.14, 500 m/sn olması durumunda %0.1 azaldığı gözlenmektedir).

Tek katlı sönümsüz düzlem çerçevesi sistemde zemin özellikleri dikkate alınarak temel dinamik büyüklüklerin (tepe yanal yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve devrilme momentlerinin) dış yükün açısai frekansına bağlı değişimleri Şekil 3.6'da incelenmiştir.

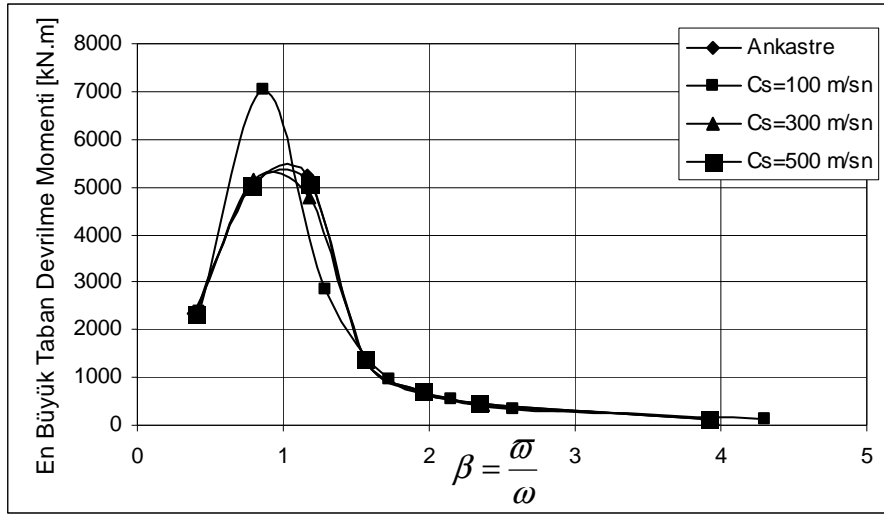


(a) En büyük tepe yanal yer değiştirmesinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açısai frekansına bağlı değişimi



(a) En büyük taban kesme kuvvetinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açısai frekansına bağlı değişimi





(c) En büyük taban devrilme momentinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açılal frekansına bağlı değişimi

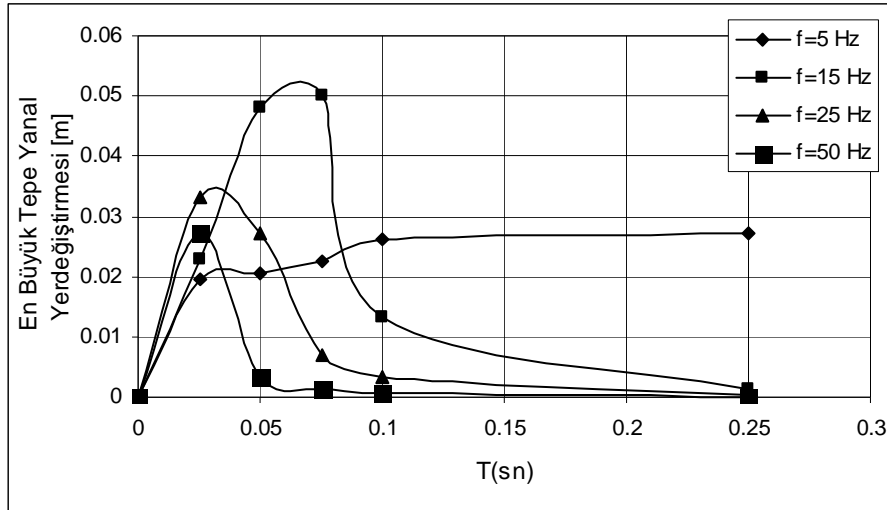
Şekil 3.6. Tek katlı sönümsüz düzlem çerçeve sistemi için farklı zemin koşullarına göre elde edilen temel dinamik büyüklüklerin dış yükün açılal frekansına bağlı değişimleri

Şekil 3.6a'da tek katlı düzlem çerçevesel sistemin ( $T=0.075$  sn) en büyük tepe yanal yerdeğiştirmesinin ( $u_{max}$ ) dış yükün açılal frekansına bağlı değişimi yapı temelinin oturduğu farklı zemin rijitliklerine göre incelenmiştir. Zemin ortamının kayma dalga hızı ( $c_s$ ) küçüldükçe tepe yanal yerdeğiştirmesinin aldığı pik değerler artmıştır (Dış yükün açılal frekansı 10 Hz olarak alındığında; tepe yanal yerdeğiştirmesi değeri, zemin kayma dalga hızınının 100 m/sn olması durumunda 500 m/sn'ye göre %75 daha fazla çıkmaktadır). Zemin rijitliği değeri küçüldükçe tepe yanal yerdeğiştirme eğrisinin en büyük değerinin rezonans değerinden ( $\beta=1$ ) sola doğru kaydığı görülmektedir.

Şekil 3.6b'de tek katlı düzlem çerçeve sisteminin en büyük taban kesme kuvvetinin titreşim frekansına bağlı değişimi farklı zemin koşulları için elde edilmiştir. Yapının oturduğu zeminin çok rijit olması (ankastre durum) durumuna karşı gelen en büyük taban kesme kuvveti, en yumuşak zemin durumuna ( $c_s=100$  m/sn) karşı gelen değerle karşılaştırıldığında bu dinamik büyüklüğün temel ortamının rijitliğiyle ters orantılı değiştiiği görülmektedir (Zeminin en yumuşak olduğu duruma karşılık gelen en büyük taban kesme kuvveti değeri, zeminin rijit özellik gösterdiği durumdaki değerinden %40 daha büyük çıkmaktadır).

Şekil 3.6c’de sönümsüz tek katlı düzlem çerçeveli sistemin en büyük taban devrilme momenti, dış yükün açısai frekansının değişimine bağlı olarak farklı zemin koşulları için incelenmiştir. Yumuşak zemin koşullarının ( $c_s=100$  m/sn) tek katlı düzlem çerçeve sisteminde taban devrilme momentinin pik değerlerini artırdığı ortaya çıkmıştır (Zemin kayma dalga hızının 100 m/sn olduğu durumdaki taban devrilme momentinin pik değeri, zemin kayma dalga hızının 500 m/sn olduğu durumdakinden %40 daha fazladır).

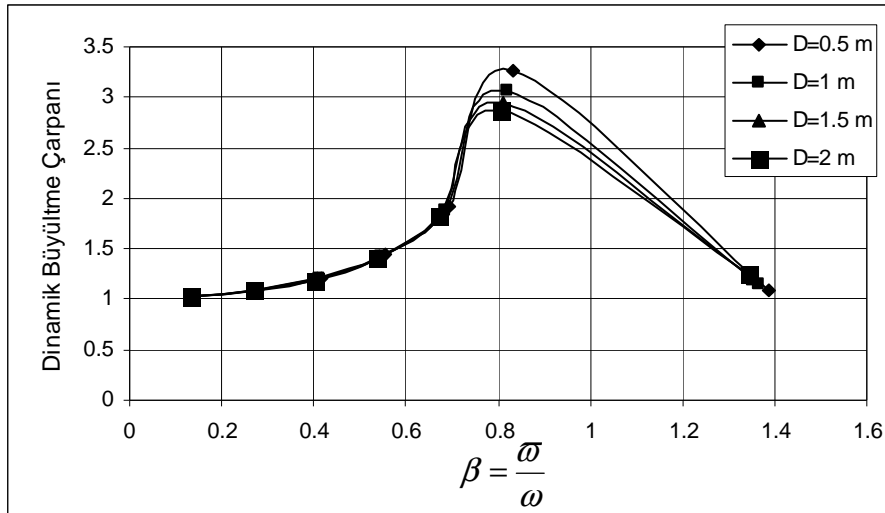
Zemine rijit bağlı tek katlı yapı sisteminin davranış spektrum eğrileri sinüzoidal karakterdeki dinamik dış yükün farklı frekanslarına bağlı olarak şekil 3.7’de elde edilmiştir.



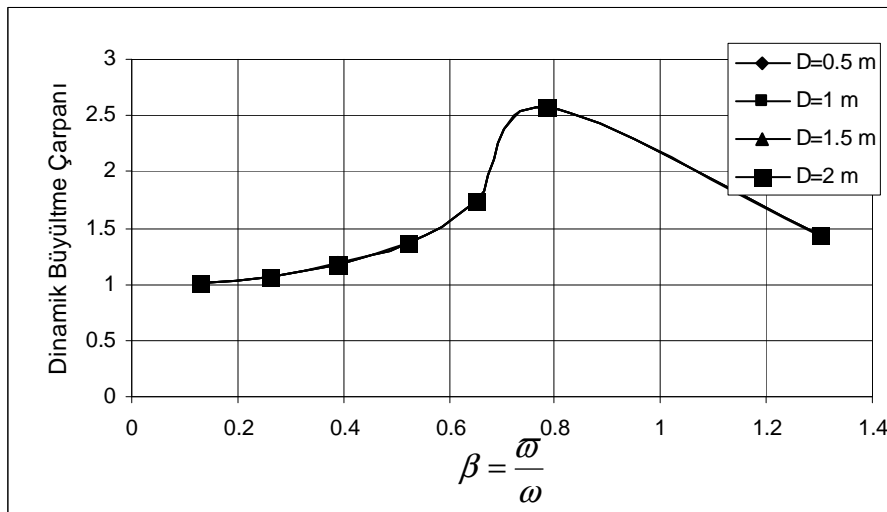
Şekil 3.7. Tek katlı yapı sisteminin en büyük yanal yer değişirmelerinin dış yükün farklı frekanslarına bağlı değişimi

Tek katlı düzlem çerçeveli sistemin en büyük tepe yanal yerdeğişirmesi, dış yükün açısai frekansının ve sistemin periyodunun değişimlerine bağlı incelenmiştir. Sisteme etkileyen en büyük dinamik etki dış yükün açısai frekansının 15 Hz olduğu durumda oluşurken (0.05 m yerdeğişirmeye sebep olmuştur), en küçük dinamik etki ise dış yükün açısai frekansının 50 Hz olduğu durumda oluşmuştur (0.000065 m’lik yerdeğişirmeye sebep olmuştur).

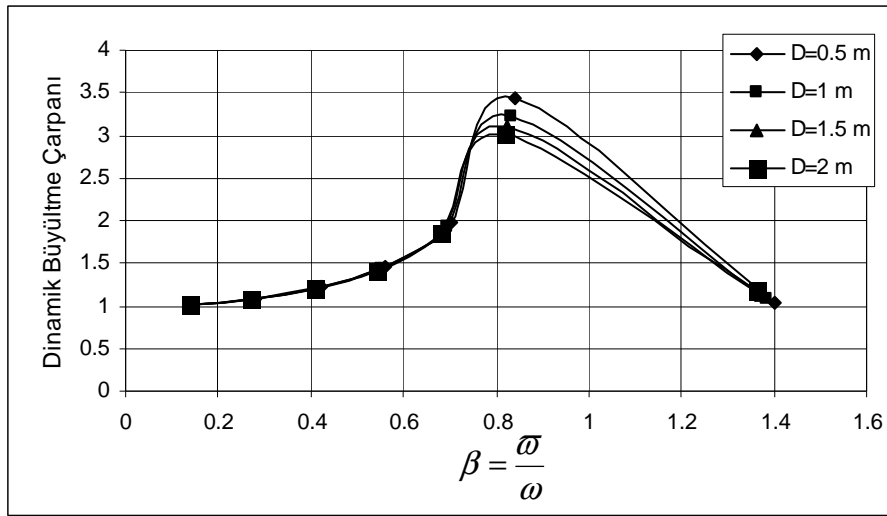
Ana kaya tabanlı düzlem çerçeve sisteminin zeminin cinsine ( $c_s=100$  m/sn ve 500 m/sn) ve zemin tabaka kalınlıklarına ( $H=5$  m ve 20m) bağlı olarak farklı temel gömülme derinlikleri ( $D=0.5$  m, 1 m, 1.5 m, 2 m) için dinamik büyültme çarpanının açısal frekansa bağlı değişimi şekil 3.8’de incelenmiştir.



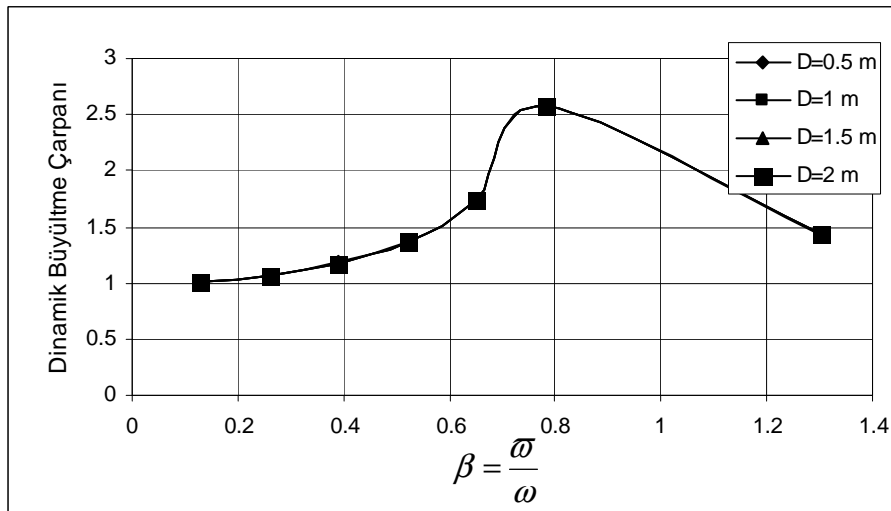
(a) Dinamik büyültme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi ( $H=5$  m ve  $c_s=100$  m/sn)



(b) Dinamik büyültme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi ( $H=5$  m ve  $c_s=500$  m/sn)



(c) Dinamik büyütme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi (H=20 m ve  $c_s=100$  m/sn)



(d) Dinamik büyütme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi (H=20 m ve  $c_s=500$  m/sn)

Şekil 3.8. Tek katlı düzlem çerçeve sisteminde ana kaya tabanlı değişken zemin özelliklerine ( $C_s=100$  m/sn ve 500 m/sn ile H=5 m ve 20 m) sahip farklı temel gömülme derinlikleri (D=0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m) dikkate alınarak dinamik büyütme çarpanının açılal titreşim frekansına bağlı değişimi

Şekil 3.8a'da ana kaya tabanlı tek tabakalı yumuşak zemine ( $c_s=100$  m/sn ve H=5 m) oturan tek serbestlik dereceli düzlem çerçeve sisteminin dinamik büyütme çarpanının ( $R_d$ ) açılal titreşim frekansına bağlı değişimi temelin farklı gömülme derinlikleri göz önüne alınarak incelenmiştir. Burada temelin gömülme derinliği arttıkça  $R_d$ 'nin azaldığı gözlenmiştir (Dış yükün 5 Hz'lik açılal frekans değeri için,

temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %1.2 azaldığı; dış yükün 30 Hz'lik açısai frekans değeri için ise, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %12 azaldığı ortaya çıkmaktadır).

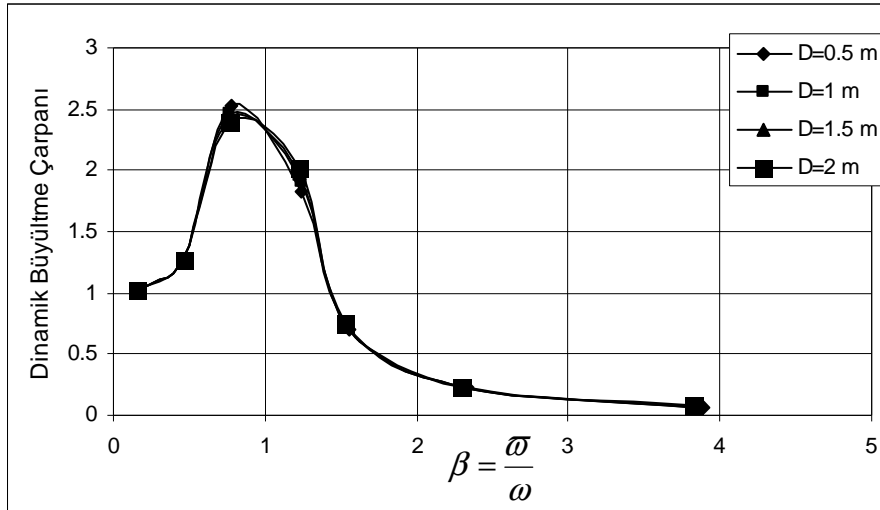
Şekil 3.8b'de ana kaya tabanlı tek tabakalı zemine ( $c_s=500$  m/sn ve  $H=5$  m) oturan TSD'li düzlem çerçeve sistemde temelin gömülme derinliği değeri nin değişiminin  $R_d$ 'de ihmal edilecek derecede az bir değişiklik meydana getirdiği ortaya çıkmıştır (Dış yükün 5 Hz'lik açısai frekans değeri için, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %0.005 azaldığı; dış yükün 30 Hz'lik açısai frekans değeri için ise, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %0.4 azaldığı ortaya çıkmaktadır).

Şekil 3.8c'de ana kayaya oturan yumuşak zemin ( $c_s=100$  m/sn) tabakasının kalınlığının arttırılması ( $H=5$  m'den  $H=20$  m'ye ) sonucunda söz konusu üstyapının dinamik davranışı değişmiştir. Tabaka kalınlığının 4 kat arttırılması sonucunda aynı temel gömülme derinliği için üstyapının  $R_d$  değeri artışı göstermiştir (Dış yükün 5 Hz'lik açısai frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'de %0.05'lik artış; dış yükün 30 Hz'lik açısai frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda ise  $R_d$ 'de %5.5'lik bir artış olmaktadır). Temel gömülme derinliği arttıkça  $R_d$  azalmıştır (Dış yükün 5 Hz'lik açısai frekans değeri için, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %0.1 azaldığı; dış yükün 30 Hz'lik açısai frekans değeri için ise, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %12.3 azaldığı ortaya çıkmaktadır).

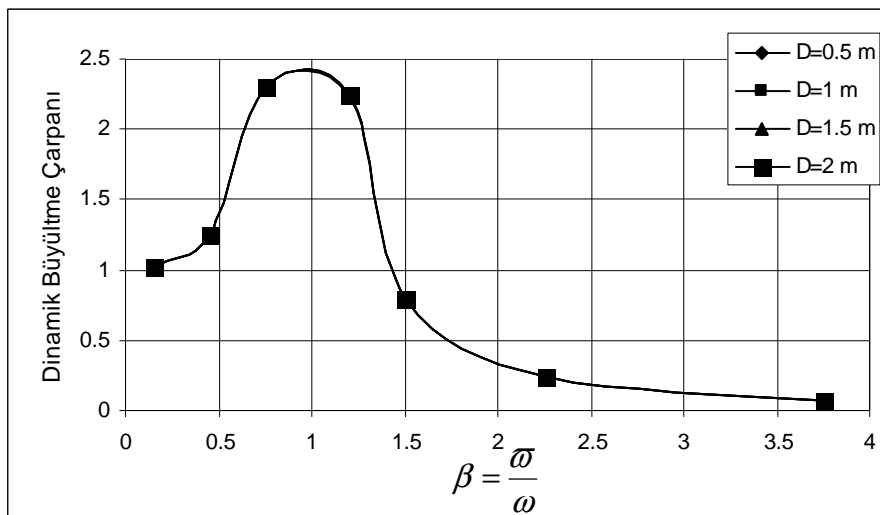
Şekil 3.8d'de ana kaya tabanlı tek tabakalı zemine ( $C_s=500$  m/sn ve  $H=20$  m) oturan TSD'li düzlem çerçevesel sistemde temelin gömülme derinliği değeri nin değişiminin  $R_d$ 'de çok küçük değişimlere neden olduğu gözlenmiştir (Dış yükün 5 Hz'lik açısai frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'de %0.002'lik artış; dış yükün 30 Hz'lik açısai frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin tabaka

kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda ise  $R_d$ 'de %0.16'lık bir artış olmaktadır).

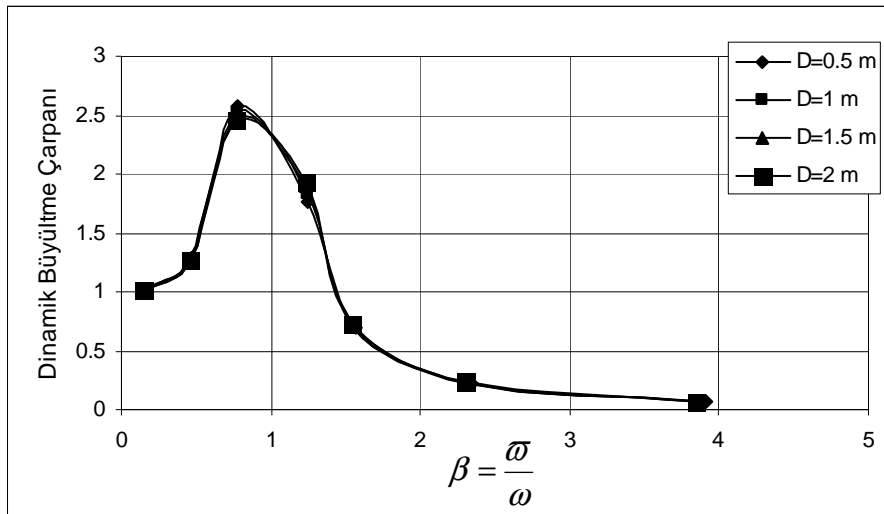
Çok serbestlik dereceli sistemde zeminin cinsi ve zemin tabaka kalınlığı dikkate alınarak farklı temel gömülme derinliklerinde toplam kat yüksekliği 12 m olan bir yapının  $R_d$ 'si açılmal frekansın değişimine bağılı olarak şekil 3.9'da incelenmiştir.



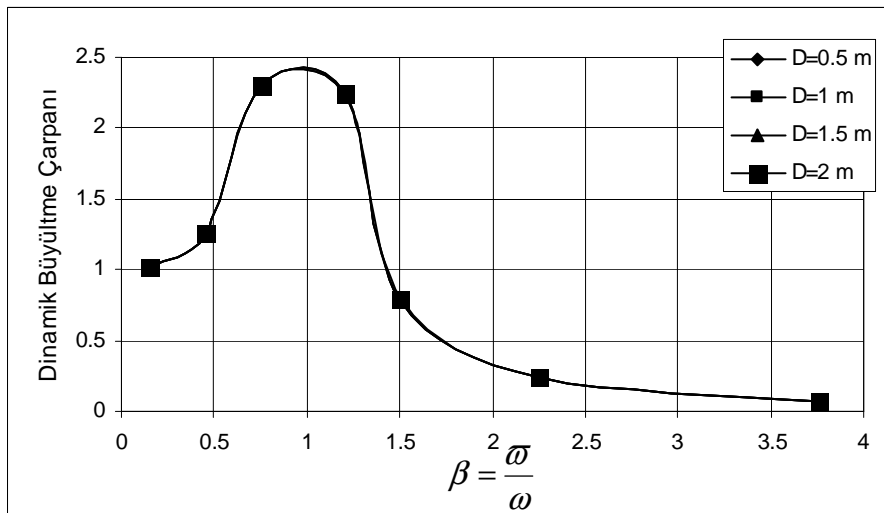
(a) Dinamik büyütme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi  
( $H=5$  m ve  $c_s=100$  m/sn)



(b) Dinamik büyütme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi  
( $H=5$  m ve  $c_s=500$  m/sn)



(c) Dinamik büyütme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi (H=20 m ve c<sub>s</sub>=100 m/sn)



(d) Dinamik büyütme çarpanının gömülme derinliklerine göre değişimi (H=20 m ve c<sub>s</sub>=500 m/sn)

Şekil 3.9. Çok katlı düzlem çerçeve sistemin değişken zemin özelliklerine (C<sub>s</sub>=100m/sn ve 500m/sn ile H=5m, ve 20m) bağlı farklı temel gömülme derinlikleri (D=0.5m, 1m, 1.5m, 2m) dikkate alınarak dinamik büyütme çarpanının açılal titreşim frekansına bağlı değişimi

Şekil 3.9a'da çok katlı düzlem çerçeve sistemin yumuşak ve tabakalı zemin koşullarında (c<sub>s</sub>=100 m/sn ve H=5 m) R<sub>d</sub>'nin temelin gömülme derinliği değişiminden farklı şekillerde etkilendiği ortaya çıkmaktadır (Dış yükün 5 Hz'lik açılal frekans değeri için, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda R<sub>d</sub>'nin %5 azaldığı; dış yükün 25 Hz'lik açılal frekans değeri için ise,

temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %3.8 arttığı ortaya çıkmaktadır).

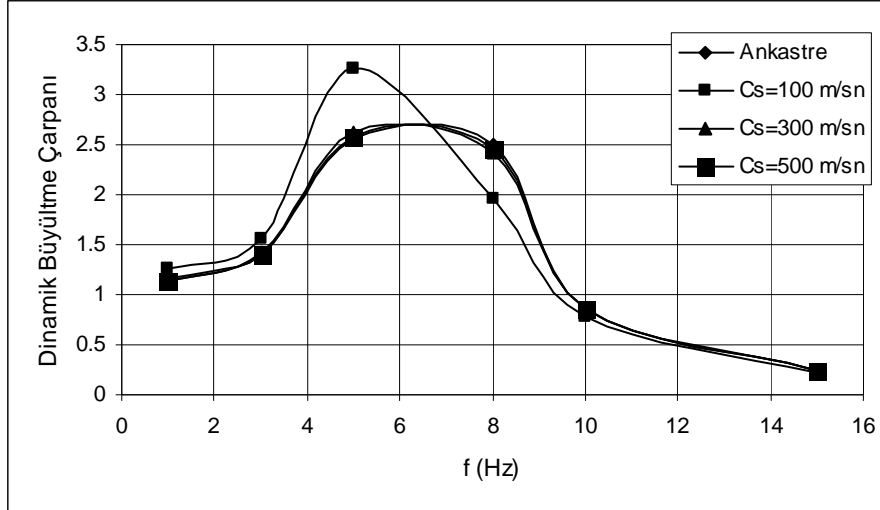
Şekil 3.9b'de temelin gömülme derinliğinin sert zemin koşullarında ( $c_s=500$  m/sn) çok serbestlik dereceli sistemlerde  $R_d$ 'nin üzerinde etkisinin ihmal edilecek boyutlara gerilediği ortaya çıkmaktadır (Dış yükün 5 Hz'lik açısal frekans değeri için, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %0.2 azaldığı; dış yükün 25 Hz'lik açısal frekans değeri için ise, temel gömülme derinliğinin 0.5 m'den 2 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'nin %0.16 arttığı ortaya çıkmaktadır).

Şekil 3.9c'de çok serbestlik dereceli yumuşak ve tabakalı ( $c_s=100$  m/sn ve  $H=20$  m) zemine oturan düzlem çerçeve sistemde zemin tabaka kalınlığının artmasının ( $H=5$  m'den;  $H=20$  m'ye)  $R_d$  üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir (Dış yükün 5 Hz'lik açısal frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda  $R_d$ 'de %2'lik artış; dış yükün 25 Hz'lik açısal frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin tabaka kalınlığının 5 m'den 20 m'ye çıkması durumunda ise  $R_d$ 'de %1.4'lük bir azalma olmaktadır).

Şekil 3.9d'de çok katlı düzlem çerçeve sistemde zeminin sertleşmesinin  $R_d$ 'nin değerinde değişimlere neden olduğu gözlenmektedir (Dış yükün 5 Hz'lik açısal frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin kayma dalga hızının 100 m/sn'deki  $R_d$  değerinin 500 m/sn 'deki değerden %12 fazla; dış yükün 25 Hz'lik açısal frekans değeri ve 0.5 m'lik temel gömülme derinliği için, zemin kayma dalga hızının 100 m/sn'deki  $R_d$  değerinin 500 m/sn 'deki değerden %8 düşük çıktığı görülmektedir).



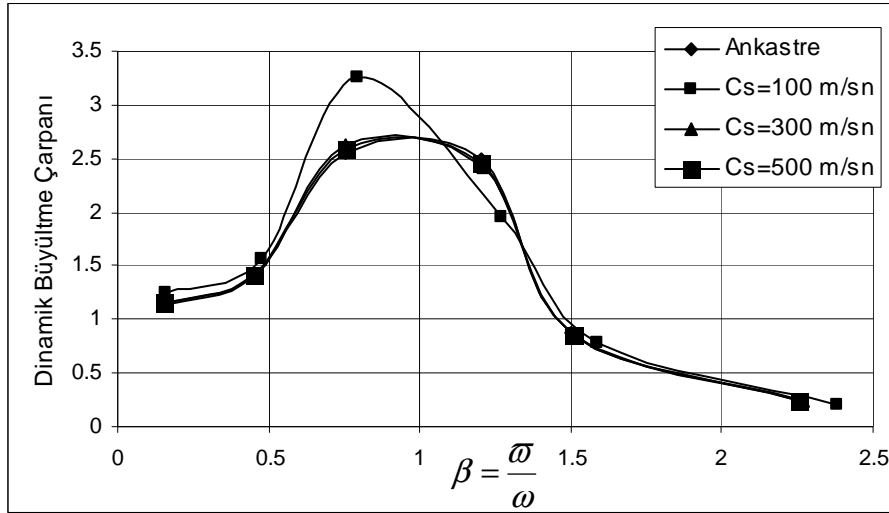
Çok katlı düzlem çerçeve sisteminin farklı zemin özelliklerine ( $c_s=100\text{m/sn}$ ,  $300\text{m/sn}$ ,  $500\text{m/sn}$ ) bağlı olarak değişen frekanslar ( $0 \leq f \leq 16\text{ Hz}$ ) için  $R_d$  değişimi şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. Çok katlı düzlem çerçevesel sistemde dinamik büyütme çarpanının yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine ve dış yükün farklı değerlerdeki frekanslarına bağlı değişimi

Dış yükün açısal frekansının ve zemin rijitliğinin değişiminin  $R_d$ 'yi değişken bir biçimde etkilediği gözlenmektedir (Zeminin kayma hızının  $100\text{ m/sn}$  olduğu durumda dış yükün açısal frekansının  $5\text{ Hz}$ 'deki değeri  $15\text{ Hz}$ 'deki değerinden  $15$  kat fazla çıkmaktadır; Zeminin kayma hızının  $500\text{ m/sn}$  olduğu durumda dış yükün açısal frekansının  $5\text{ Hz}$ 'deki değeri  $15\text{ Hz}$ 'deki değerinden  $11$  kat fazla çıkmaktadır. Dış yükün açısal frekansının  $5\text{ Hz}$  olduğu durumda zemin kayma dalga hızının  $100\text{ m/sn}$ 'deki değeri  $500\text{ m/sn}$ 'deki değerinden  $\%26$  daha fazla; dış yükün açısal frekansının  $15\text{ Hz}$  olduğu durumda zemin kayma dalga hızının  $100\text{ m/sn}$ 'deki değeri  $500\text{ m/sn}$ 'deki değerinden  $\%13$  daha az çıkmaktadır).

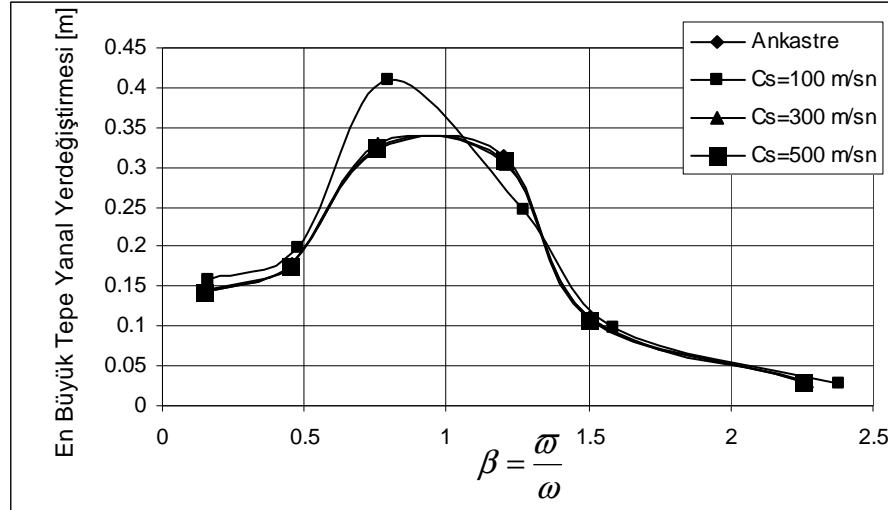
Sönümsüz çok katlı düzlem çerçeve sisteminde farklı zemin koşulları ( $c_s=100\text{m/sn}$ ,  $300\text{m/sn}$ ,  $500\text{m/sn}$ ) dikkate alınarak dinamik büyültme çarpanının dış yükün açısıl frekansına bağlı değişimi şekil 3.11’de incelenmiştir.



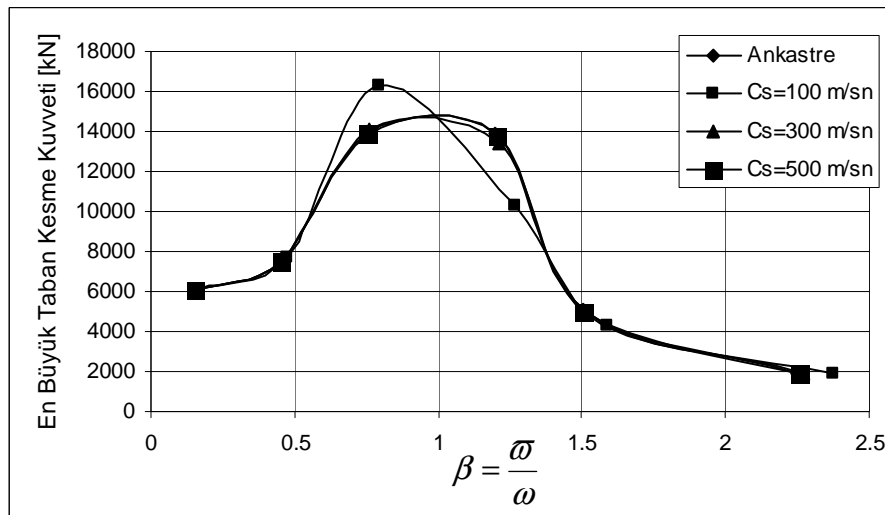
Şekil 3.11. Çok katlı düzlem çerçeve sisteminde yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine bağlı olarak dinamik büyültme çarpanının dış yükün açısıl frekansına bağlı değişimi

Çok katlı düzlem çerçeve sistemine ait dinamik büyültme çarpanı ( $R_d$ ) yapı temelinin oturduğu zemin rijitliğine bağlı olarak incelendiğinde  $R_d$ 'nin en büyük değerinin zeminin en yumuşak ( $c_s=100\text{ m/sn}$ ) olduğu durumlarda oluştuğu görülmektedir (Dış yükün açısıl frekansının  $5\text{ Hz}$  olduğu durumlarda dinamik büyültme çarpanının pik değerlere ulaştığı ve zemin kayma dalga hızının  $100\text{ m/sn}$ 'deki değerinde  $500\text{ m/sn}$ 'deki değerine oranla  $R_d$ 'nin pik değerinin %21 fazla çıktığı görülmektedir). Zemin ortamının rijitliği azaldıkça  $R_d$  eğrisinin pik değerlerinin sola doğru kaydığı görülmektedir. Zemin yumuşadıkça  $R_d$ 'nin pik değerleri büyümektedir (Rezonans durumuna karşılık gelen dinamik büyültme çarpanının değeri, zemin kayma dalga hızı  $100\text{ m/sn}$  iken  $500\text{ m/sn}$ 'ye göre %7 daha büyük bir değer çıkmaktadır).

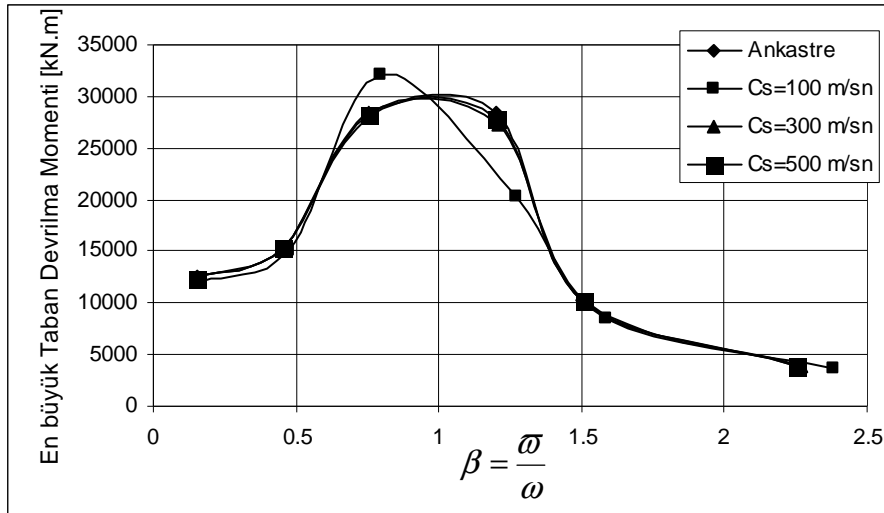
Çok katlı sönümsüz düzlem çerçevesi sistemin temel dinamik büyüklüklerinin (tepe yanal yerdeğiştirmesi, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momenti) değerleri, zemin özelliklerine ( $c_s=100$  m/sn, 300 m/sn, 500 m/sn) ve dış yükün açısai frekansının değişimine bağlı olarak Şekil 3.12’de incelenmiştir.



(a) En bŐyŐk tepe yanal yer değiştirmesinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açısai frekansına bağlı değişimi



(b) En bŐyŐk taban kesme kuvvetinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açısai frekansına bağlı değişimi



(c) En büyük taban devrilme momentinin farklı zemin koşullarına ve dış yükün açılal frekansına bağlı değişimi

Şekil 3.12. Çok katlı düzlem çerçeve sistemin en büyük tepe yanal yerdeğiştirmesi, en büyük taban kesme kuvveti ve en büyük taban devrilme momenti değerlerinin yapı temelinin oturduğu zeminin rijitliğine ve dış yükün açılal frekansına bağlı değişimi

Şekil 3.12a'da çok katlı düzlem çerçeve sistemin en büyük tepe yanal yerdeğiştirmesinin dış yükün açılal frekansına bağlı değişimi yapı temelinin oturduğu farklı zemin rijitliklerine göre incelenmiştir. En büyük tepe yanal yerdeğiştirmesinin yumuşak zemin ortamında olduğu görülmektedir (dış yükün açılal frekansının 5 Hz zemin kayma dalga hızının 100 m/sn olduğu durumda tepe yanal yerdeğiştirmesi pik değere ulaşmıştır). Dış yükün açılal frekansının 5 Hz olduğu durumda tüm zemin koşulları için tepe yanal yerdeğiştirmesinin pik değerlerine ulaşmıştır. Zemin yumuşadıkça tepe yanal yerdeğiştirme eğrisinin en büyük değerinin rezonans değerinin ( $\beta = 1$ ) sola doğru kaydığı görülmektedir.

Şekil 3.12b'de çok katlı düzlem çerçeve sistemde en büyük taban kesme kuvvetinin titreşim frekansına bağlı değişimi farklı zemin koşulları için elde edilmiştir. Yapının oturduğu zeminin çok rijit olması (ankastre durum) durumuna karşı gelen en büyük taban kesme kuvveti, en yumuşak zemin durumuna ( $c_s=100$  m/sn) karşı gelen değerle karşılaştırıldığında bu dinamik büyüklüğün temel ortamının rijitliğiyle ters orantılı değiştirdiği görülmektedir (Zeminin en yumuşak olduğu duruma karşılık gelen en büyük taban kesme kuvveti değeri, zeminin rijit özellik gösterdiği durumdaki

değerinden %18 daha büyük çıkmaktadır). En büyük taban kesme kuvvetinin yumuşak zemin ( $c_s=100$  m/sn) ortamında olduğu görülmektedir.

Şekil 3.6c'de çok katlı düzlem çerçeve sistemin en büyük taban devrilme momenti, dış yükün açısal frekansının değişimine bağlı olarak farklı zemin koşulları için incelenmiştir. Yumuşak zemin koşullarının ( $c_s=100$  m/sn) çok katlı düzlem çerçeve sisteminde taban devrilme momentinin pik değerlerini artırdığı ortaya çıkmıştır (Taban devrilme momentinin pik değeri, yumuşak zemini ifade eden 100 m/sn'lik kayma dalga hızında 500 m/sn'lik sert zemin koşuluna göre %13 daha fazla çıkmaktadır).

## BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dinamik büyültme çarpanının ( $R_d$ ) yapı-zemin dinamik etkileşim problemi üzerindeki etkilerini gösterebilmek için üstyapıya katlar seviyesinde harmonik karakterde statik genliği doğrusal arttıran sinüzoidal dış yükler etki ettirilmiştir. Yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkilişimini incelemek için tüm problemi temsil edebilecek uygun matematik modeller ve onun sayısal uygulamaları çeşitli kontrol parametrelerine bağlı ayrıntılı olarak sistematik araştırmalar yürütülerek etkin nümerik ve analitik çözüm yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. Sayısal modelin çözümü için temel-zemin arakesitinde frekanstan bağımsız sabit katsayılı empedans katsayıları gömülü ve yüzeysel temel durumları için kullanılmıştır. En büyük yanal yerdeğiştirme, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momenti gibi temel dinamik büyüklüklerin farklı zemin koşullarına ve zemin tabakası kalınlığına bağlı olarak dış yükün geniş frekans aralığına göre değişimleri elde edilmiştir. Değişen zemin koşullarında yapının dinamik özelliklerinin kontrol parametrelerine bağlı nasıl ve ne oranda değiştirdiği karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Temel ortamının titreşim frekansından bağımsız ötelenme (yanal, düşey) ve dönme rijitlik katsayıları incelenmiş ve aşağıda verilen sonuçlara varılmıştır;

- Zemin ortamı yumuşadıkça rijitliklerin daha küçük değerler aldığı,
- Temel gömülme derinliği arttıkça rijitlik değerlerinin de doğru orantılı olarak arttığı,
- Zemin tabaka kalınlığı arttıkça rijitlik değerlerinin azaldığı,
- L/B oranının artmasının rijitlik değerlerini arttırdığı

Tek katlı düzlem çerçevesi sönümlü ve sönümsüz sistemlerde zemin ortamı yumuşadıkça dinamik büyültme çarpanı ( $R_d$ ) eğrisindeki pik değerlerin grafiklerde sola doğru kaydığı ve zeminin yumuşak olduğu ( $c_s=100$  m/sn) durumda  $R_d$ 'nin diğer

zemin koşullarına oranla en büyük pik değeri aldığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca  $R_d$ 'nin dış yükün açısai frekansının değışimine bağlı olarak zemin rijitliğinden artan ve azalan şekillerde etkilendiği görülmüştür. Ötelenme (yanal, düşey) ve eğilme-dönme rijitlikleri zemin özellikleri dikkate alınarak dış yükün açısai frekansına bağlı incelenmiş ve en büyük pik değeri yumuşak zemin ( $c_s=100$  m/sn) meydana gelmiştir. Temel gömülme derinliklerinin  $R_d$  üzerindeki etkisi dış yükün açısai frekansına bağlı incelenmiş ve temel gömülme derinliğinin artmasının  $R_d$ 'yi yumuşak zemin koşullarında daha belirgin bir şekilde azalttığı görülmüştür. Ayrıca burada zemin tabaka kalınlığının artmasının ise yumuşak zemin koşullarında  $R_d$ 'de daha etkin bir artışa neden olduğu sonucu gözlenmiştir.

Çok katlı düzlem çerçevesel sistemlerde  $R_d$ 'nin dış yükün açısai frekansının değışimine bağlı olarak temel gömülme derinliğinden artan ve azalan şekillerde etkilendiği görülmüştür. Sert zemin koşullarında ise bu etkileşimin en düşük seviyelere gerilediği görülmektedir. Dış yükün açısai frekansına bağlı olarak değışen zemin koşullarından  $R_d$ 'nin farklı şekillerde etkilendiği sonucu elde edilmiştir. Yapı temelini oturduğu zeminin rijitliği dış yükün açısai frekansının değışimine bağlı olarak dikkate alındığında zemin ortamının yumuşak olması ( $c_s=100$  m/sn) durumunda  $R_d$ 'nin en büyük pik değeri aldığı ortaya çıktığı ve zeminin yumuşaklık derecesi arttıkça  $R_d$ 'nin pik değeri grafiklerde sola doğru kaydığı gözlenmektedir. Ötelenme (yanal, düşey) ve eğilme-dönme rijitlikleri zemin özellikleri dikkate alınarak dış yükün açısai frekansına bağlı incelenmiş ve en büyük pik değeri yumuşak zemin ( $c_s=100$  m/sn) ortamında ortaya çıktığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] PALA, M., Zemin Yapı Dinamik Etkileşiminin Yapay Sinir Ağları İle Analizi. Doktora Tezi, Sakarya, Nisan, 2004
- [2] ÇELEBİ, E., Planda Simetrik Olmayan Yapıların Zeminle Dinamik Etkileşimi, TDV/TR 041-70, İstanbul, Temmuz, 2001
- [3] VELETOS, A.S., WEI, Y.T., 1971, Lateral and rocking vibration of footings, Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE 97, 1227–1248.
- [4] ÇELEBİ E., FIRAT S. and ÇANKAYA I., 2006, The evaluation of impedance functions in the analysis of foundations vibrations using boundary element method, Journal of Applied mathematics and Computation, Volume 173, Issue 1, 636-667.
- [5] DOMINGUEZ, J., ROESSET J:M., Dynamic stiffness of rectangular foundations, MIT Research Report, R.78-20, 1978.
- [6] 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.
- [7] GAZETAS, G., TASSOULAS, J. L., Horizontal Damping of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 458-475, 1987b.
- [8] GAZETAS, G., TASSOULAS, J. L., Horizontal Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 440-457, 1987a.
- [9] APSEL, R. J., LUCO, J. E., 1987, Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: an integral equation approach, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 213-231.
- [10] WOLF, J.P., SONG, C., Finite Element Modelling of Unbounded Media, John Wiley&Sons, London, 1997.
- [11] BU, S., Impedance functions of square foundations embedded in an incompressible half-space, Engineering Analysis with Boundary Element 22 (1998) 1-11



- [12] BU, S., LİN, C.H., Coupled horizontal-rocking impedance functions for embedded square foundations at high frequency factors, Journal of Earthquake Engineering 3 (4) (1999) 561-587
- [13] SIEFFERT, J.G., and CEVAER, F., Handbook of impedance functions, Quest Editions, Presses Academiques, Nantes, France (1991).
- [14] ÇELEBİ, E, ve GÜNDÜZ, A.N.,“Dynamic Response of Multistory Buildings Including Soil-Structure Interaction in Elastic Layered Media” ECCM’99 European Conference on Computational Mechanics August 31-September 3 München, Germany 1999
- [15] FEMA 356, Foundations and Geologic Site Hazards, Washington D.C., November, 2000
- [16] AYDINOĞLU, M.N., Ustyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1977.
- [17] KUTANIS, M., Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi, Doktora Tezi, SAÜ FBE, Sakarya, Kasım, 2001.
- [18] CELEP, Z., KUMBASAR, N, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanlı Yapı Tasarımı. Sema Matbaacılık, İstanbul, 1993.
- [19] CELEP, Z., KUMBASAR, N, Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş. Sema Matbaacılık, İstanbul, 1993.
- [20] ÇELEBİ, E., Yapı-Zemin Dinamik Etkileşim Ders Notları. SAÜ, 2006.

## ÖZGEÇMİŞ

Umut Maltaş, 10.07.1982 de Diyarbakır'da doğdu. İlkokul eğitimini Diyarbakır da, orta ve lise eğitimini Mersin'de tamamladı. 1999 yılında Mersin Hacı Sabancı Lisesinden mezun oldu. 2000 yılında başladığı SAU İnşaat Mühendisliği bölümünü 2004 yılında bitirdi. 2004-2005 yılları arasında Yavuzlar İnşaat bünyesinde TOKİ şantiyelerinde mühendis olarak çalıştı. 2005 yılında SAU Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalında yüksek lisansa başladı. 2006 yılı sonunda Karayolları 5. Bölge Müdürlüğüne mühendis olarak atandı. Şu an Karayolları 5. Bölge Müdürlüğüne bağlı İskenderun 3 Nolu Asfalt Şantiyesinde Şantiye Mühendisi olarak çalışmaktadır.