

**PLANDA SİMETRİK OLMAYAN ÇOK KATLI YAPILARIN ZEMİNLE
DİNAMİK ETKİLEŞİMİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM YÖRÜMLÜ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Y. Müh. Erkan ÇELEBİ

(501952023)

104259

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Ekim 2000

Tezin Savunulduğu Tarih: 22 Şubat 2001

Tez Danışmanı: Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Nahit KUMBASAR (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Nuray AYDINOĞLU (B.Ü.)

Prof. Dr. Zekai CELEP (İ.T.Ü.)

Prof. Dr. Zekeriya POLAT (Y.T.Ü.)

ŞUBAT 2001

ÖNSÖZ

Çalışmalarımın her aşamasında yakın ilgi ve değerli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç.Dr. Necmettin Gündüz'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmaya yön göstericiliği ve katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Nahit Kumbasar'a, Sayın Prof. Dr. Nuray Aydınolu'na, Sayın Prof. Dr. Zekai Celep'e ve Sayın Prof. Dr. Zekeriya Polat'a burada teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında sürekli desteklerini ve sabırlarını gösteren aileme teşekkür ederim.

KASIM 2000

Erkan ÇELEBİ



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu	1
1.2. Konu İle İlgili Çalışmalar	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	5
2. PLANDA SİMETRİK OLMAYAN BURULMALI BAĞLAŞIK ÇOK KATLI YAPILARIN ELASTİK ZEMİNLE DİNAMİK ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNDE MODAL ANALİZ YÖNTEMİ	6
2.1. Matematik Modeli ve Yapılan Varsayımlar	6
2.2. Hareket Denklemleri	9
2.3. Hareket Denklemlerinin Kararlı Çözümü	16
2.3.1. Zaman Bölgesinde Çözüm	16
2.3.2. Frekans Bölgesinde Çözüm	16
2.3.3. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Hareket Denklemlerinin Fourier Dönüşümü	17
2.3.4. Radyasyon Dalgaları ve Radyasyon Sönümü	19
2.4. Zemin Alt Sistemi ve Empedans Analiz	21
2.4.1. Empedans Fonksiyonları	23
2.4.2. Elastik Yarı Sonsuz Düzlem İçin Geliştirilen Empedans Fonksiyonlarının Hareket Denklemlerinde Kullanılması	24
2.5. Temel Transfer Fonksiyonlarının Elde Edilmesi	40
2.6. Etkileşim Probleminin Çözümünde Kullanılan Analitik Yönteminin Özeti	42
2.7. Geliştirilen Bilgisayar Programının Amacı, Yapısı ve Kapsamı	44
2.7.1. Giriş Bilgileri	44
2.7.2. Çıkış Bilgileri	44
3. PLANDA SİMETRİK OLMAYAN BURULMALI BAĞLAŞIK TEK KATLI YAPILARIN ELASTİK ZEMİNLE DİNAMİK ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNDE DOĞRUDAN ÇÖZÜM YAKLAŞIMI	48
3.1. Planda Simetrik Olmayan Tek Katlı Yapı-Zemin Ortak Sisteminin Matematik Modeli	48
3.2. Yapılan Varsayımlar	49

3.3. Hareket Denklemleri	50
3.4. Hareket Denklemlerinin Frekans Bölgesinde Çözümü	53
3.5. Geliştirilen Bilgisayar Programının Amacı, Yapısı ve Kapsamı	64
3.5.1. Giriş Bilgileri	64
3.5.2. Çıkış Bilgileri	64
4. SAYISAL UYGULAMALAR	68
4.1. Bilgisayar Algoritmasının Doğrulanmasına Yönelik Uygulamalar	68
4.2. Geliştirilen Çözüm Yöntemiyle İlgili Parametrik Çalışmalar	72
4.3. Geliştirilen Çözüm Yönteminin Etkinliğini Gösteren Uygulamalar	85
5. SONUÇLAR	94
KAYNAKLAR	97
EKLER	102
ÖZGEÇMİŞ	107

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Rijitlik ve sönüm sabitleri (Veletsos ve Wei)	28
Tablo 4.1 Şekil değiştirebilen zemin durumları için tek katlı yapı-zemin örnek sisteminde sönüm oranları	71
Tablo 4.2 İki katlı yapı için hesaplanan elastik yerdeğıştirmelerin kayma dalga hızlarına göre maksimum değerleri	78
Tablo 4.3 İki katlı yapı için hesaplanan toplam yerdeğıştirmelerin ve taban kesme kuvvetinin kayma dalga hızlarına göre maksimum değerleri	78
Tablo 4.4 İki katlı yapı için hesaplanan burulma momentlerinin kayma dalga hızlarına göre maksimum değerleri	78
Tablo 4.5 Şekil değiştirebilen zemin durumları için iki katlı yapı-zemin sistemlerinde sönüm oranı	80
Tablo 4.6 Zemin kayma dalga hızlarının 1000m/s ve 700 m/s olmaları durumunda temel yerdeğıştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin e/r parametresine bağılı olarak değışimleri	81
Tablo 4.7 Zemin kayma dalga hızlarının 500m/s ve 300 m/s olmaları durumunda temel yerdeğıştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin e/r parametresine bağılı olarak değışimleri	81
Tablo 4.8 Zemin kayma dalga hızlarının 1000m/s ve 700 m/s olması durumunda temel yerdeğıştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin h/r parametresine bağılı olarak değışimleri	82
Tablo 4.9 Zemin kayma dalga hızlarının 500m/s ve 300 m/s olması durumunda temel yerdeğıştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin h/r parametresine bağılı olarak değışimleri	82
Tablo 4.10 Zemin kayma dalga hızlarının 1000m/s ve 700 m/s olması durumunda temel yerdeğıştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin m ₀ /m parametresine bağılı olarak değışimleri	83
Tablo 4.11 Zemin kayma dalga hızlarının 500m/s ve 300 m/s olması durumunda temel yerdeğıştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin m ₀ /m parametresine bağılı olarak değışimleri	83
Tablo 4.12 Örnek sistemde, elastik ve visko elastik zemin durumları için temel yerdeğıştirme büyüklüklerinin karşılaştırılması	84
Tablo 4.13 Radyasyon sönümünün ihmal edildiğı durumlarda temel öteleme ve eğilme-dönme transfer fonksiyonlarının değışimi.....	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Planda simetrik olmayan çok katlı yapı-temel modeli	7
Şekil 2.2	: İki doğrultuda simetrik olmayan katın rijitliğinin saptanması	11
Şekil 2.3	: Zemin yapı sisteminde deprem dalga yayılımı.....	20
Şekil 2.4	: Elastik yarı sonsuz zemin ortamının idealleştirilmesi.....	21
Şekil 2.5	: Rijit dairesel temel plağı - yarı sonsuz düzlem	23
Şekil 2.6	: Planda simetrik olmayan çok katlı yapı-temel-zemin ortak sisteminin üç boyutlu matematik modeli	39
Şekil 2.7	: Bilgisayar programının akış diyagramının ana hatlarıyla gösterimi.....	45
Şekil 3.1	: Planda simetrik olmayan tek katlı yapı-temel modeli	48
Şekil 3.2	: Planda simetrik olmayan tek katlı yapı-temel-zemin ortak sisteminin üç boyutlu matematik modeli	51
Şekil 3.3	: Bilgisayar programının akış diyagramının ana hatlarıyla gösterimi.....	65
Şekil 4.1	: Tek yönde simetrik, tek katlı yapı-temel örnek sistemlerine ait sayısal özellikler	69
Şekil 4.2	: Tsicnias'ın çözüm yöntemine göre temel plağının burulma dönmesine ait frekans davranış eğrileri	70
Şekil 4.3	: Doğrudan çözüm yaklaşımına göre temel plağının burulma dönmesine ait frekans davranış eğrileri	70
Şekil 4.4	: Modal çözüm yöntemine göre temel plağının burulma dönmesine ait frekans davranış eğrileri	70
Şekil 4.5	: Tek yönde simetrik, iki katlı yapı-temel örnek sistemine ait sayısal özellikler	72
Şekil 4.6	: 18 Mart 1992 Erzincan deprem ivme kaydı (Doğu-Batı bileşeni).....	73
Şekil 4.7	: Zemin kayma dalga hızı 1000 m/s için temel yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi	74
Şekil 4.8	: Zemin kayma dalga hızları 700 m/s, 500m/s, 300m/s için temel ötelenme yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi	75
Şekil 4.9	: Zemin kayma dalga hızları 700 m/s, 500m/s, 300m/s için temel eğilme- dönme yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi	76
Şekil 4.10	: Zemin kayma dalga hızları 700 m/s, 500m/s, 300m/s için temel burulma- dönme yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi	77
Şekil 4.11	: Sayısal uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi	79
Şekil 4.12	: Temel plağının eğilme dönmesine ait frekans davranış eğrileri	80
Şekil 4.13	: Frekansa bağlı ve frekanstan bağımsız çözüm yaklaşımlarından elde edilen boyutsuz temel büyüklüklerine ait sonuçların karşılaştırılması.....	85

Şekil 4.14	: Zemine rijit bağılı sistemin temel transfer fonksiyonları.....	87
Şekil 4.15	: Farklı kayma dalga hızlarına göre temel öteleme transfer fonksiyonları.....	88
Şekil 4.16	: Farklı kayma dalga hızlarına göre temel eğilme-dönme transfer fonksiyonları.....	89
Şekil 4.17	: Farklı kayma dalga hızlarına göre temel burulma-dönme transfer fonksiyonları.....	90
Şekil 4.18	: Farklı kayma dalga hızlarına göre temel öteleme transfer fonksiyonları (Radyasyon sönümü ihmal edilmiş).....	92
Şekil 4.19	: Farklı kayma dalga hızlarına göre temel eğilme(devrilme)-dönme transfer fonksiyonları (Radyasyon sönümü ihmal edilmiş).....	93



SEMBOL LİSTESİ

a_0	: Reissner'in boyusuz frekans parametresi
b, d	: Kat döşemelerinin boyutları
c_1, c_2, c_3	: Elastik yarı sonsuz düzlemin sönüm sabitleri
c_s	: Zeminin kayma dalgası yayılma hızı
$[C]$	: Yapının viskoz sönüm matrisi
E_c	: Betonun elastisite modülü
e	: Dış merkezlik
G	: Zeminin kayma modülü
H_k	: Sistemin k. moduna karşı gelen karmaşık frekans davranış fonksiyonu
h_i	: Temel üst kotundan i. katın yüksekliği
$\{h\}$	: Kat yüksekliklerine ait kolon vektörü
I_{tx}, I_{ty}	: Kat döşemelerinin ve temel plağının eğilme eksenlerine dik doğrultudaki toplam kütsel atalet momentleri
I_t	: Toplam burulma atalet momenti
k_1, k_2, k_3	: Elastik yarı sonsuz düzlemin rijitlik sabitleri
K_{ppx}, K_{ppy}	: x ve y eksenleri doğrultularındaki temel öteleme empedansları
K_{mxx}, K_{mmy}	: Eğilme eksenlerine dik doğrultudaki temel dönme empedansları
K_{tt}	: z eksenli etrafındaki temel dönme empedansı
K_x	: Elastik ortamdaki dairesel plağın birim yatay yerdeğiştirmesine karşı gelen statik rijitlik
K_y	: Elastik ortamdaki dairesel plağın birim dönmesine karşı gelen statik rijitlik
$[K]$	: $3N \times 3N$ mertebeden rijitlik matrisi
m, m_0	: Kat ve temel plağının kütleleri
m_T	: Toplam kütle
$[M]$	: $3N \times 3N$ mertebeden kütle matrisi
M_{ox}, M_{oy}	: Temel tabanında eğilme eksenlerine dik doğrultudaki etkileşim momentleri
$\tilde{M}_x, \tilde{M}_y$	: Eğilme etkileşim momentlerinin Fourier genlikleri
N	: Toplam kat sayısı
P_{ox}, P_{oy}	: Temel tabanında ilgili eksenler doğrultusundaki yatay etkileşim kuvvetleri
$\tilde{P}_x, \tilde{P}_y$	: Yatay etkileşim kuvvetlerinin Fourier genlikleri
q_k	: Sistemin k. modunun normal koordinatı
$R_{oy}, R_{yoy}, R_{\theta o}$	: Temel öteleme, eğilme ve burulma transfer fonksiyonları
r, r_0	: Kat ve temel plağının eylemsizlik yarıçapları

$\{r\}$	: Kat eylemsizlik yarıçaplarına ait kolon vektörü
$T, \bar{T}$	: Yapının rijit zemine mesnetli temel periyodu ve sistemin temel titreşim periyodu
T_o	: Temel tabanındaki burulma etkileşim momenti
$\tilde{T}$	: Burulma etkileşim momentinin Fourier genliği
u_{xi}, u_{yi}	: i. katın x ve y doğrultularındaki öteleme yerdeğiştirmeleri
$u_{\theta i}$	: i. katın düşey eksen etrafındaki dönme yerdeğiştirmesi
u_{gx}, u_{gy}	: x ve y eksenleri doğrultusundaki yer hareketleri
u_{txi}	: i. katın kütle merkezinin x eksenini boyunca toplam yanal yerdeğiştirmesi
u_{tyi}	: i. katın kütle merkezinin y eksenini boyunca toplam yanal yerdeğiştirmesi
$\{u\}$	: Yerdeğiştirme vektörü
u_{ox}, u_{oy}	: Temelin x ve y eksenleri doğrultusundaki öteleme yer değiştirmeleri
$\ddot{u}_g$	: Eşdeğer yer ivmesi
$\tilde{u}_{ox}, \tilde{u}_{oy}$	: Temel öteleme yerdeğiştirmelerinin Fourier genlikleri
$\tilde{u}_{gx}, \tilde{u}_{gy}$	: Yer hareketlerinin Fourier genlikleri
ω	: Dış etkinin titreşim frekansı
ω_1	: Sistemin rijit zemine mesnetli temel titreşim frekansı
ω_k	: Sistemin k. moduna karşı gelen sönümsüz doğal titreşim frekansı
γ_{ox}, γ_{oy}	: Temelin eğilme eksenlerine dik doğrultudaki dönmeleri
$\tilde{\gamma}_{ox}, \tilde{\gamma}_{oy}$	: Eğilme dönmelerinin Fourier genlikleri
θ_o	: Temelin z eksenini etrafındaki dönmesi
$\tilde{\theta}_o$	: Temelin burulma dönmelerinin Fourier genliği
β	: Zeminin malzeme sönümü
ξ_k	: Sistemin k. moduna karşı gelen sönüm oranı
ξ_o	: Temel Sönüm Oranı
$\bar{\xi}$	: Üstyapı-Zemin Sisteminin Sönüm Oranı
ρ	: Zeminin özgül kütlesi
ν	: Poisson oranı
$[\phi]$	: Modal matrisi
$\alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}$	: Sistemin dış yük ifadesindeki k. moda ait katkı çarpanları
α_{4k}, α_{5k}	

PLANDA SİMETRİK OLMAYAN ÇOK KATLI YAPILARIN ZEMİNLE DİNAMİK ETKİLEŞİMİ

ÖZET

Bu çalışmada, planda simetriklik özelliği göstermeyen burulmalı bağlaşıp çok katlı yapı ile zeminden oluşan ortak sistemin deprem yer hareketi etkisi altında zorlanmış titreşimi için geliştirilen matematik model üzerinde Modal çözüm yöntemi kullanılarak üstyapı ile zemin arasındaki karşılıklı etki olayı incelenmiştir.

Bu yaklaşımda üstyapı ve zemin, iki ayrı sistem olarak ele alınmıştır. Ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan dinamik denge denklemleri, daha sonra üstyapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilmiştir. Bu durumda zemin ortamının etkisini, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini gösteren yaylar ve eşdeğer zemin sönümünü (radyasyon sönümü,geometrik sönüm) ifade eden söndürücüler temsil etmektedir.

Bu çözüm yönteminde dinamik dış etkiye ayrık Fourier dönüşümü uygulanarak, dış etki harmonik bileşenlere ayrılır. Sistemin analizi gerekli sayıda harmonik için yapıldıktan sonra, zaman tanım alanında belirlenmesi istenen dinamik büyüklüklerin ters Fourier dönüşümü elde edilmiştir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan hızlı Fourier dönüşümü algoritması yardımıyla dönüşüm işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Önerilen yöntemin etkinliğini ve yeterliliğini gösterebilmek ve yumuşak zemin koşullarının yapının davranışı üzerindeki etkilerinin sonuçlarını değerlendirebilmek amacıyla parametrik çözümlere yer verilmiştir. Gerçek deprem ivme kaydı ve birim genlikli harmonik yer hareketi kullanılarak, planda simetriklik özelliği göstermeyen yapı örnekleri, h/r (kat yüksekliğinin, eylemsizlik yarıçapına oranı), e/r (dış merkezliğin, eylemsizlik yarıçapına oranı) ve m_0/m (temel kütlelerinin, kat kütlelerine oranı) oranlarına göre, zemin ortamının farklı kayma dalga hızlarına bağlı olarak incelenmiştir. Zemin etkisi ile üstyapının davranışında meydana gelen değişimi saptamak amacı ile, temel yerdeğiştirme bileşenlerine ait transfer fonksiyonları elde edilmiştir ve farklı zemin koşullarına bağlı olarak irdelenmiştir.

SOIL-STRUCTURE INTERACTION OF TORSIONALLY COUPLED MULTISTORY BUILDINGS

SUMMARY

An simplified method which uses normal mode approximation implemented in the frequency domain for the earthquake response of three-dimensional multistory asymmetric buildings founded on a flexible foundation is presented.

In this study, the soil is assumed as an elastic halfspace and modelled by equivalent springs and dashpots such that the resulting equations of motion are similar those of a fixed-base structure. However, to accurately represent the elastic halfspace, the properties of springs and dashpots are assumed to depend on the frequency of excitation. Thus, the governing equations for the structure-foundation system are expressed and solved in the Fourier-transformed frequency domain. The governing equations are developed by considering the motions of each floor and the whole system.

In this method, first of all structural deformations are obtained in terms of foundation displacement using a linear combination of vibrational modes of the building on a rigid foundation, which in combination with the dynamic soil-structure interaction force-displacement relationships. In this study, the Fourier transforms are computed very efficiently by Fast Fourier Transform (FFT) algorithm where in they are treated as discrete transforms.

To evaluate the effectiveness of this analysis procedure, asymmetric torsionally coupled multi-storey building excited by real earthquake ground motion and harmonic free-field ground displacement have been examined. Three different values of height to gyration radius ratio (h/r), eccentricity to gyration radius ratio (e/r), mass of the structure to mass of the foundation ratio (m_0/m) depending on shear wave velocity of soil medium are considered. The variation of displacement transfer functions depending on different soil conditions of the soil-structure systems are also obtained.

1.GİRİŞ

1.1 KONU

Bilgisayarların sağladığı hız ve etkinlik yapı mühendisliğini gittikçe daha büyük ve karmaşık problemlerin çözümüne yöneltmektedir. Ayrıca çeşitli dış etkiler altında yapı davranışının gerçeğe daha yakın olarak izlenmek istenmesi durumunda, sistemde göz önüne alınan bilinmeyen sayısının arttırılması ve bunun beraberinde getirdiği çeşitli güçlüklerin de aşılması gerekmektedir. Söz konusu nedenlerle artan işlem hacmine bağlı olarak, mevcut belleğin ekonomik kullanımı ve öngörülen doğruluk düzeyine mümkün olan en kısa sürede erişme isteği, bilgisayar teknolojisindeki tüm gelişmelere rağmen hala önemini korumaktadır.

Nükleer güç santralleri, çok katlı rijit yapılar, barajlar gibi depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen yapı sistemleri, günümüzde zorunlu olarak aktif deprem bölgelerinde yapılmaktadır. Bu tür yapıların gerekli bazı durumlarda, çok değişik özellikler taşıyan zeminler üzerinde kurulması zorunluluğu, üstyapı ile zemin arasındaki dinamik karşılıklı etki probleminin konusunu oluşturmaktadır. Bir bölgedeki yapının ayrıntılı değerlendirilmesinde, zemin-yapı sisteminin dinamik özelliklerinin anlaşılması gereklidir.

Zemin, yapının davranışını değişik şekillerde etkilemektedir:

- a) Yapının altındaki zemin, ana kayadaki deprem etkisini değiştirerek verir. Bu, bazı durumlarda etkinin büyümesi sonucunu doğurur.
- b) Zeminin etkisiyle, yapının periyot ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerinde değişiklikler meydana gelir.
- c) Yapıdaki titreşim enerjisinin önemli bir kısmı, zemine mesnetlenmenin rijit olmaması, zemindeki sönüm ve zeminde yayılma etkisiyle söner.

Genellikle zemin-yapı etkileşimi, b ve c de verilen olayların incelenmesi olarak ele alınır. Bu iki durumda yapının davranışı kısmi olarak zeminden ve benzer şekilde 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 bulunduğunu göstermiştir. Bu değişiklikler, depremin üstyapıya etkisinin karşılığı olarak, üstyapının da zemini ve dolayısıyla deprem kaydını etkilediğini kanıtlamaktadır. Yapının davranışının incelenmesinde ideal yol, deprem hareketinin ana kayaya uygulanması ve bunun üst zeminde ve yapıdaki etkilerinin hesaplanması olarak görülebilir. Ancak yer hareketi için elde edilen bilgilerin ana kayaya ait olmayıp, yeryüzü ölçümlerinden elde edildiği düşünülürse bunun gerçekçi olmadığı ortaya çıkar. Dinamik dış etkiler altında yapı-zemin etkileşimi, yukarıda belirtildiği gibi, zemin ortamının üstyapı ile birlikte analiz edilmesi ile gözönüne alınır. Yapı-zemin etkileşiminde temel sorun, zemin ortamının yapısal anlamda nasıl idealleştirileceğidir. Zeminin dinamik karakterlerinin belirlenmesinde, zemin rijitliğini, sönümü ve sonsuz ortama enerji yayılmasını gözönüne alan modeller çeşitli yaklaşımlarla geliştirilebilir. Bu çalışmada zemin ortamı, yapının temelinde kabul edilen eşdeğer elastik yaylar (zeminin şekil değiştirebilirliğini ifade eden elemanlar) ve sönümleyiciler (radyasyon sönümü, geometrik sönümü ifade eden elemanlar) ile temsil edilmiştir.

Yapı sistemlerinin boyutlandırılmasında temel ortamının şekil değiştirebilirliğinin dikkate alınması kadar önemli hususlardan biri de rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki dış merkezliğin hesaba katılmasıdır. Bir deprem sırasında kütle ve rijitlik dağılımları simetrik olmayan yapılar yanal titreşimlerine ilave olarak burulmalı titreşimler de yapacaklardır. Burulmalı yapıların analizi öteleme serbestlik derecelerine ek olarak, her kat için dönme serbestlik derecesinin dahil edilmesini ve üç boyutlu çerçeve hesapları ile burulma etkisinin gözönüne alınmasını gerektirir.

1.2 KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yapılan parametrik çalışmalar ve geçmişteki depremlerin etkileri üzerindeki araştırmalar, kütle ve rijitlik dağılımları simetriklik özelliği göstermeyen yapılarda, kütle merkezi ile rijitlik merkezinin üst üste düşmemesinden dolayı kat döşemelerinin yanal öteleme hareketi ile dönme hareketi arasında dinamik etkileşim olabileceğini

göstermiştir [1-4]. Ayrıca deprem yer hareketinin belli bir hızla yayılma özelliğinden dolayı yapı temelinin altındaki bütün noktalara aynı anda ulaşmaması üstyapı sistemi planda simetrik olsa dahi bir burulmalı davranış hareketi söz konusu olacaktır. Birçok araştırmacı bu şekilde yayılan dalga etkilerini bilhassa köprü gibi uzun yapılarda incelemişlerdir [5]. Şimdiye kadar çeşitli çalışmalarda burulmalı bağlaşık çok katlı asimetrik yapıların elastik deprem davranışı, dinamik analizin standart metodları yerine geliştirilmiş çözüm yöntemleri kullanarak irdelenmiştir [6-8]. Ancak bu çalışmalarda planda simetrik olmayan yapıların rijit bir zemine mesnetlendiği kabul edilir. Gerçekte, deprem yer hareketi etkisindeki yapının elastik davranışı, temel ortamının şekil değiştirebilir özelliğinden dolayı etkilenmektedir. Bu nedenle rijit temel varsayımı gerçek koşullara sadece bir yaklaşım getirmektedir. Yüksek binalar, barajlar, nükleer güç santralleri gibi, depreme karşı davranışlarının önemli olduğu bilinen masif sistemlerin yumuşak zeminlerde inşa edilmesi, temelin şekil değiştirmesinin etkilerini de gözönüne almayı gerektirir. Genelde bu tip problemler dinamik zemin-yapı etkileşimi olarak adlandırılır. Zemin-yapı etkileşimini irdeleyen çalışmaların çoğu planda simetrik yapılarla sınırlıdır [9-13]. Genellikle literatürde rijit temel tabanı ile elastik yarı düzlem yüzeyi arakesitindeki dinamik zemin-yapı etkileşim kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri titreşim hareketinin frekansına bağlı olarak elde edilmiştir [14-18]. Cooley ve Tukey [19], mühendislik problemlerinin çözümünde kolaylık sağlayan Fourier serilerinden yararlanarak, hızlı Fourier dönüşüm algoritmasını geliştirmişler ve daha sonraları Bergland [20] bu algoritmayı sistematize ederek ayrık Fourier dönüşümünün kısa sürede yapılabilmesini sağlamıştır. Bazı araştırmacılar düzlem çerçeve sistemler için bu algoritmanın getirdiği olanaklardan yararlanarak tek ve çok katlı lineer elastik yapılarda karşılıklı etki olayının sonuçlarını değerlendirmişlerdir [21,22]. Yine aynı algoritmayı, birçok çalışmada araştırmacılar, normal mod yaklaşımı ile birlikte kullanarak çok katlı düzlemsel yapılarla zemin arasındaki dinamik etkileşimi incelemişlerdir [23-25]. Yapı-zemin ortak sistemlerinin dinamik analizinde elastik zemin bölgesinin sisteme katkısını ifade eden uygun yay ve sönümleyicilerle modellenmesi büyük kolaylıklar sağlamaktadır [26,27]. Bu idealleştirme hem bilgisayar programlarının bellekte kapladıkları hacmi azaltır, hem de daha basit yaklaşık çözüm teknikleri kullanma imkanı verir. Ancak, zeminin katkısını ifade eden bu fiktif elemanların özelliklerinin titreşim hareketinin frekansına bağlı oluşu, dinamik problemin çözümünü

güçleştirmektedir. Jennings, Bielak ve Tsai, Niehoff, Swatta ve Hadjian, yapı-zemin etkileşimi probleminde, bu güçlülüğü aşabilmek amacıyla temel ortamını temsil edebilecek yaklaşık sabit değerli (frekanstan bağımsız) rijitlik ve sönüm terimlerinin kullanılmasını önermişlerdir [28-29]. Perelman, Parmelee ve Lee ve Richart, Hall ve Woods, sabit katsayılı temel empedanslarını kullanarak elastik zemin üzerindeki tek katlı yapıların sismik davranışını incelemişlerdir [30-31]. Yine aynı araştırmacılar ile birlikte Ghafer ve Chapel de, çok katlı yapıların zeminle dinamik etkileşimini, frekanstan bağımsız temel empedans katsayılarını kullanarak irdelenmişlerdir [32]. Modal analiz açısından, üstyapı-zemin ortak sisteminde birinci titreşim modunun sistemin davranışına en büyük oranda katkıda bulunduğu, birçok araştırmacı tarafından kanıtlanmıştır [33]. Ayrıca birçok araştırmacı, rijitlik ve enerji kaybı katsayılarını, depremlerdeki hakim frekansları kapsayan belirli bir frekans bölgesi içinde sabit olarak kabul eden bir yaklaşıma yöneltmiştir [34-35]. Bununla birlikte Wu ve Smith zemin-yapı etkileşimli çok katlı düzlemsel sistemlerin yapısal davranışını elde etmek için frekans bölgesinde modların süperpozisyonunu kullanarak etkili bir çözüm yöntemi elde etmişlerdir [36]. Geliştirilen çözüm yönteminde, Veletsos ve Wei tarafından dairesel rijit plak için elde edilen frekansa bağlı temel empedans fonksiyonları kullanılmıştır [37]. Balendra lineer elastik temel üzerinde yer alan asimetric çok katlı yapıların deprem davranışını incelerken zemin-yapı ara kesitinde yazılan kuvvet yerdeğiştirme bağıntılarında, zemin yerine kullanılan eşdeğer yay ve söndürücülere ait empedans katsayılarını harmonik zorun frekansından bağımsız olarak ele almıştır [38]. Tsicnias ve Hutchinson, kütle dağılımı simetriklik göstermeyen tek katlı burulmalı bağlaşıklık yapıların zeminle dinamik etkileşimi probleminde doğrudan çözüm yaklaşımı getirmişler ve kontrol parametrelerine bağlı olarak harmonik yer hareketi altındaki sistemin yapısal davranışını incelemişlerdir [39]. Planda simetrik olmayan çok katlı yapıların zemin-yapı etkileşim probleminde, modal analiz tekniğini kullanmayı tercih eden araştırmacılar, sistemin normal koordinatlarını, bütün sisteme ait hareket denklemlerinde ifade ederek sadece temel yerdeğiştirmelerine bağlı beş integro-diferansiyel denklem takımına dönüştürme imkanı elde etmişlerdir [40-42]. Temel tabanı ile elastik yarı düzlem yüzeyinde Veletsos ve Verbic [43], Veletsos ve Nair [44] tarafından geliştirilen zamana bağlı zemin-yapı etkileşim kuvvet-yerdeğiştirme bağıntıları kullanmışlardır. Temel yerdeğiştirmelerinin zaman bölgesindeki çözümü, özellikle çok serbestlik dereceli

sistemler için hem oldukça karmaşık hem de matematik detayları içeren büyük hesapsal gayretler gerektirir. İşlem hacminin fazla olması nedeniyle hem bilgisayar programlama tekniği açısından hem de belleğin ekonomik kullanımı açısından uygunluğu tartışılmaktadır.

1.3 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın amacı, planda simetrik olmayan çok katlı yapıların üstyapı-zemin etkileşim probleminde, frekansa bağlı temel empedans katsayılarını ve normal mod yaklaşımını, geliştirilen matematik model üzerinde, sistemin hareket denklemlerini uygun bir biçimde kullanarak bilgisayar programlama tekniği açısından geçerli, işlem hacmi fazla olmayan basitleştirilmiş bir çözüm metodu ortaya koymaktır. Geliştirilen çözüm yönteminde, frekans tanım alanının tercih edilmesinin ana nedeni özetlenecek olursa, radyasyon nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için eşdeğer anlamda kullanılan radyasyon sönümün, çözümün zaman tanım alanında yapılması durumunda, analitik ifadeye katılmasının kolay olmayışıdır. Ayrıca, yapı-zemin etkileşimli problemlerin, zaman bölgesindeki çözümü, özellikle çok serbestlik dereceli sistemler için hem oldukça karmaşık ve hem de büyük hesap yükü gerektirir. İşlem hacminin fazla olması nedeniyle hem bilgisayar programlama tekniği açısından hem de belleğin ekonomik kullanımı açısından uygunluğu tartışılır. Önerilen yöntemin etkinliğini ve yeterliliğini gösterebilmek ve yumuşak zemin koşullarının yapının davranışı üzerindeki etkilerinin sonuçlarını değerlendirebilmek amacıyla, gerçek deprem ivme kaydı ve birim genlikli harmonik yer hareketi kullanılarak, planda simetriklik özelliği göstermeyen yapı örnekleri, h/r (kat yüksekliğinin, eylemsizlik yarıçapına oranı), e/r (dış merkezliğin, eylemsizlik yarıçapına oranı) ve m_0/m (temel kütlelerinin, kat kütlelerine oranı) parametrelerine göre, zemin ortamının farklı kayma dalga hızlarına bağlı olarak incelenmiştir. Ayrıca, zeminin etkisi ile üstyapının davranışında meydana gelen değişimi saptamak amacı ile, temel yerdeğiştirme bileşenlerine ait transfer fonksiyonları elde edilmiştir.

2. PLANDA SİMETRİK OLMAYAN BURULMALI BAĞLAŞIK ÇOK KATLI YAPILARIN ELASTİK ZEMİNLE DİNAMİK ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNDE MODAL ANALİZ YÖNTEMİ

2.1 MATEMATİK MODEL VE YAPILAN VARSAYIMLAR

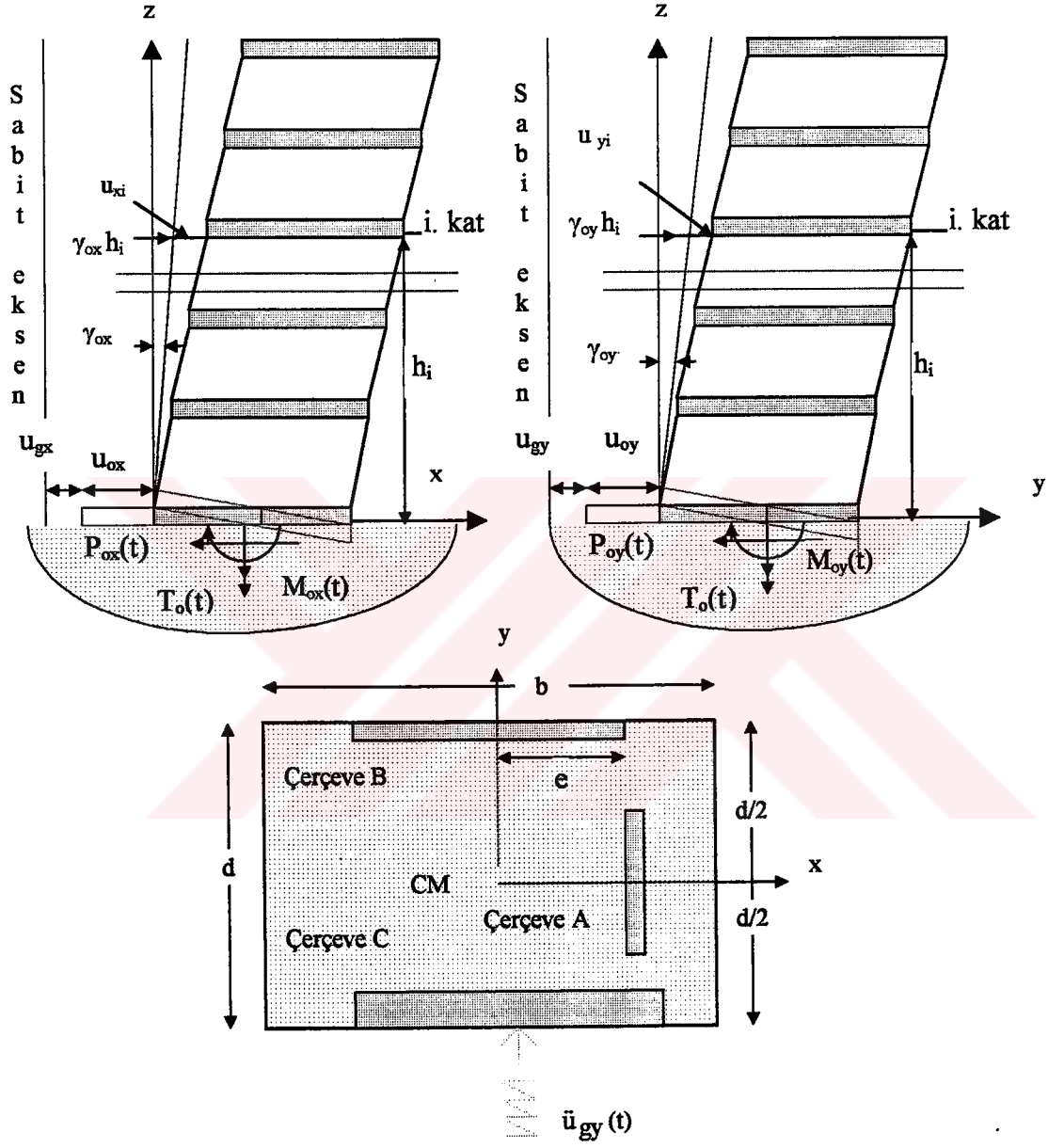
Bu çalışmada kullanılan üstyapı-zemin sistemi, şekil değiştirebilir zemin kütlesi üzerindeki rijit plağa oturan, planda simetrik olmayan N katlı bir yapıdan meydana gelmektedir (Şekil 2.1).

Yapısal simetri bozukluğunun, taşıyıcı sistemi oluşturan çerçeve elemanların rijitliklerinin veya kat kütlelerinin planda simetrik dağılmamasından ileri geldiği bilinmektedir. Bu çalışmada ise çerçeve tipi elemanlar, sistem iki doğrultuda simetriklik özelliği göstermeyecek şekilde döşeme asal eksenlerine paralel olarak düzenlenmiştir. Ayrıca çerçeveler kayma çerçevesi olarak ele alınmıştır. Çerçevelerin rijitlik dağılımları simetri özelliği göstermediğinden dolayı kütle ile rijitlik merkezleri arasındaki dış merkezlik “e” nin bütün katlarda sabit olduğu kabul edilmiştir. Planda dikdörtgen olarak ele alınan ve boyutları b ve d (yer hareketinin etkili olduğu doğrultu) ile gösterilen döşeme plağının, sonsuz rijit olduğu, ve kütlesi olmayan, eksenleri doğrultusunda uzayıp kısalmayan kolonlar üzerinde oturduğu varsayılmaktadır.

Ayrıca yapı kütesinin planda düzgün dağıldığı, kat seviyelerinde toplandığı varsayılmıştır. Bundan dolayı kütle merkezi (CM), her katta, kat döşemesinin geometrik merkezi üzerine düşmektedir. Burada da çok katlı yapıların çoğunda olduğu gibi, söz konusu sistemde bütün katların kütle merkezlerinin aynı bir düşey eksen üzerinde bulunduğu varsayılmıştır.

X-Z düzleminde
şematik kesit

Y-Z düzleminde
şematik kesit



Şekil 2.1 Planda simetrik olmayan çok katlı yapı-temel modeli

Yapıların Standart Dinamik Analizine Kısa Bir Bakış

Zemin-yapı etkileşiminin gözönüne alınmadığı durumlarda, çok serbestlik dereceli bir sistemin y eksenine doğrultusunda yer hareketi etkisindeki zorlanmış titreşimi,

$$\begin{aligned}
 & [M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = -[M]\{\ddot{u}_{gy}(t)\} \\
 & \begin{bmatrix} [m_x] & [0] & [0] \\ [0] & [m_y] & [0] \\ [0] & [0] & [m_\theta] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\ddot{u}_x(t)\} \\ \{\ddot{u}_y(t)\} \\ \{\ddot{u}_\theta(t)\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [K_{xy}] & [K_{x\theta}] \\ [K_{yx}] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u_x(t)\} \\ \{u_y(t)\} \\ \{u_\theta(t)\} \end{bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} [m_x] & [0] & [0] \\ [0] & [m_y] & [0] \\ [0] & [0] & [m_\theta] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{1\}\ddot{u}_{gx}(t) \\ \{1\}\ddot{u}_{gy}(t) \\ \{1\}\ddot{u}_{g\theta}(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

diferansiyel denklemi ile verilir. Bu denklemde $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ matrisleri sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. Yerdeğiştirme vektörü $U(t)$ nin çözümü için yaygın olarak Mod Birleştirme Yöntemi uygulanır. Bu yöntemde önce sistemin sönümsüz serbest titreşimi ele alınır. Serbest titreşim frekansları ω_k ve bunlara karşı gelen mod vektörleri $\{\phi_k\}$ bulunur. Daha sonra sistemin sönümlü ve zorlanmış davranışı ele alınarak, bu durumda çözüm vektörünün, mod vektörlerinin eşzamanlı lineer birleşimi olarak ifade edilebileceği kabul edilir:

$$\{U(t)\} = \begin{Bmatrix} \{u_x(t)\} \\ \{u_y(t)\} \\ \{u_\theta(t)\} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{3N} \{\phi_k\} q_k(t) = [\phi] \{q(t)\}, \quad \{\phi_k\} = \begin{Bmatrix} \phi_k^x \\ \phi_k^y \\ \phi_k^\theta \end{Bmatrix} \tag{2.2a}$$

$$\{u_x(t)\} = \begin{Bmatrix} u_{x1} \\ u_{x2} \\ \vdots \\ u_{xN} \end{Bmatrix}, \quad \{u_\theta(t)\} = \begin{Bmatrix} u_{\theta1} \\ u_{\theta2} \\ \vdots \\ u_{\theta N} \end{Bmatrix}, \quad \{u_y(t)\} = \begin{Bmatrix} u_{y1} \\ u_{y2} \\ \vdots \\ u_{yN} \end{Bmatrix}$$

$$[\phi] = \begin{bmatrix} [\phi_{xx}] & [\phi_{xy}] & [\phi_{x\theta}] \\ [\phi_{yx}] & [\phi_{yy}] & [\phi_{y\theta}] \\ [\phi_{\theta x}] & [\phi_{\theta y}] & [\phi_{\theta\theta}] \end{bmatrix}_{(3N \times 3N)} \quad \{q(t)\} = \begin{Bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_{3N}(t) \end{Bmatrix}_{(3N \times 1)} \tag{2.2b}$$

dir; $[\phi]$ modal matrisi, $N \times N$ mertebeden alt matrislerden meydana gelmektedir; $\{u_x(t)\}$, $\{u_y(t)\}$, $\{u_\theta(t)\}$ ise katların x ve y doğrultularındaki öteleme yerdeğiştirmelerini ve kat kütle merkezlerinden geçen düşey eksen etrafındaki dönme yerdeğiştirmesini göstermektedir. $q_k(t)$ zamana bağlı fonksiyonlarına sistemin “Normal Koordinatları” denir. Bu katsayılar, mod şekillerinin çözüme, zamana bağlı olarak değişen katlarını göstermektedir. Genellikle bu katkı karşı gelen titreşim frekansı arttıkça azalır. Bu sebeple, sayısal çözümlerde ilk birkaç modla hesap yapmak yeterli yaklaşım sağlayabilir. Yerdeğiştirme için yapılan (2.2a) kabulü, (2.1) hareket denkleminde yerine konulur. Bu denklemlerin her iki tarafı $\{\phi_k\}^T$ ile çarpıldıktan sonra mod vektörlerine ait ortogonallik bağıntılarının yazılmasıyla,

$$\begin{aligned} \{\phi_k\}^T [M] \{\phi_\ell\} &= \delta_{k\ell} M_k & \{\phi_k\}^T [K] \{\phi_\ell\} &= \delta_{k\ell} K_k = \delta_{k\ell} \omega_k^2 M_k \\ \{\phi_k\}^T [C] \{\phi_\ell\} &= \delta_{k\ell} C_k = \delta_{k\ell} 2M_k \xi_k \omega_k \quad (\delta_{k\ell} \text{ Kronecker Deltası}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

sistemin dinamik davranışını gösteren diferansiyel denklem sistemi, geliştirilmiş koordinat q_k , geliştirilmiş kütle M_k , geliştirilmiş rijitlik K_k , geliştirilmiş sönüm C_k kullanılarak ayrık duruma getirilmiş olur [45].

$$M_k \ddot{q}_k(t) + C_k \dot{q}_k(t) + K_k q_k(t) = -\{\phi_k\}^T [M] \{\tilde{l}\} \ddot{u}_{gy}(t) \quad (2.4)$$

$$\ddot{q}_k(t) + 2\xi_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\frac{\{\phi_k\}^T [M] \{\tilde{l}\} \ddot{u}_{gy}(t)}{M_k} \quad (2.5)$$

2.2 HAREKET DENKLEMLERİ

Burada i. katın kütle merkezinin x ve y eksenleri yönündeki öteleme yer değiştirmeleri sırasıyla u_{xi} , u_{yi} ve düşey eksen etrafındaki dönmesi $u_{\theta i}$ olarak tanımlanmıştır. Dış etki olarak da üstyapı-zemin ortak sisteminin, temel seviyesinde y eksenini doğrultusu boyunca bir yerdeğiştirme hareketine maruz kaldığı varsayılacaktır. Yer hareketinin dönme ve burulma bileşenleri dikkate alınmayacaktır. Bununla birlikte temel ortamının şekil değiştirebilir özelliğinden dolayı, yapı sistemi ayrıca 5 serbestlik derecesine daha sahip olur; bunlar sırasıyla, temelin x ve y eksenleri doğrultularındaki öteleme yer değiştirmeleri (u_{ox} ve u_{oy}), temelin yatay eksenler etrafında dönmeleri (γ_{ox} ve γ_{oy}) ve

burulma dönmesidir (θ_o). Eğilme (devrilme) dönmeleri, dönme eksenine dik eksenin adıyla tanımlanmıştır. Böylece bütün sistem N katlı bir yapı için, $3N+5$ serbestlik derecesine sahip olacaktır.

$$[M]\{\ddot{U}_t(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{0\}$$

$$\{U_t(t)\} = \begin{Bmatrix} (u_{gx} + u_{ox})\{1\} \\ (u_{gy} + u_{oy})\{1\} \\ (u_{g\theta} + \theta_o)\{1\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} (\gamma_{gx} + \gamma_{ox})\{h\} \\ (\gamma_{gy} + \gamma_{oy})\{h\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{u_x\} \\ \{u_y\} \\ \{u_\theta\} \end{Bmatrix} \quad u_{gx}, u_{g\theta}, \gamma_{gx}, \gamma_{gy} = 0 \quad (2.5a)$$

Ayrıca herhangi bir i. katın kütle merkezinin toplam yanal yerdeğiştirmesi ile kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafındaki toplam dönmesi sırasıyla, x eksen doğrultusu boyunca $u_{xi} = u_{ox} + h_i\gamma_{ox} + u_{xi}$, y eksen doğrultusu boyunca $u_{yi} = u_{gy} + u_{oy} + h_i\gamma_{oy} + u_{yi}$, toplam dönmesi $u_{\theta i} = u_{\theta i} + \theta_o$ olarak ifade edilir. h_i i. katın zemin seviyesinden yüksekliğini gösterir. Kütle merkezi (CM) etrafında her katın dengesi düşünülerek, N-katlı asimetrik üstyapının hareket denklemleri, temelin şekil değiştirebilir özelliğini de hesaba katarak sönümsüz sistemler için şöyle ifade edilebilir:

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = -[M] \begin{Bmatrix} \{1\}\ddot{u}_{ox}(t) + \{h\}\ddot{\gamma}_{ox}(t) \\ \{1\}\ddot{u}_{gy}(t) + \{1\}\ddot{u}_{oy}(t) + \{h\}\ddot{\gamma}_{oy}(t) \\ \{1\}\ddot{\theta}_o(t) \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} [m_x] & [0] & [0] \\ [0] & [m_y] & [0] \\ [0] & [0] & [m_\theta] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_x(t)\} \\ \{\ddot{u}_y(t)\} \\ \{\ddot{u}_\theta(t)\} \end{Bmatrix}$$

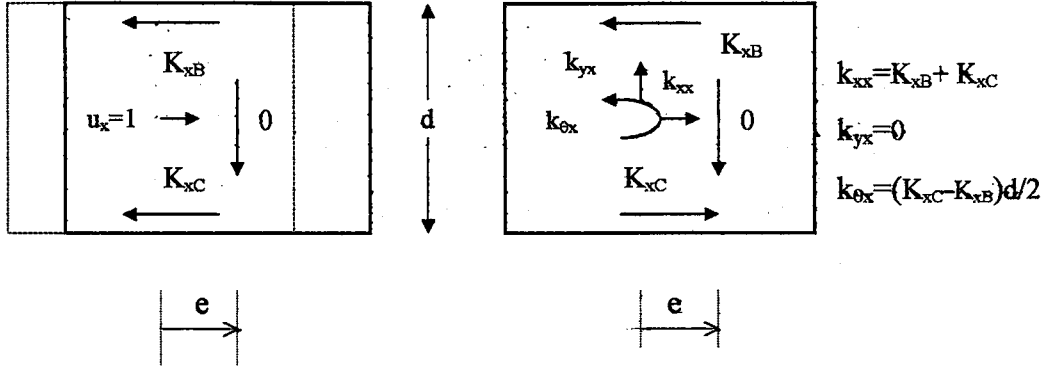
$$+ \begin{bmatrix} [K_{xB}] + [K_{xC}] & [0] & (d/2)([K_{xB}] - [K_{xC}]) \\ [0] & [K_{yA}] & e[K_{yA}] \\ (d/2)([K_{xB}] - [K_{xC}]) & e[K_{yA}] & e^2[K_{yA}] + (d^2/4)([K_{xB}] + [K_{xC}]) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_x(t)\} \\ \{u_y(t)\} \\ \{u_\theta(t)\} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

$$= - \begin{bmatrix} [m_x] & [0] & [0] \\ [0] & [m_y] & [0] \\ [0] & [0] & [m_\theta] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{1\}\ddot{u}_{ox}(t) + \{h\}\ddot{\gamma}_{ox}(t) \\ \{1\}\ddot{u}_{gy}(t) + \{1\}\ddot{u}_{oy}(t) + \{h\}\ddot{\gamma}_{oy}(t) \\ \{1\}\ddot{\theta}_o(t) \end{Bmatrix}$$

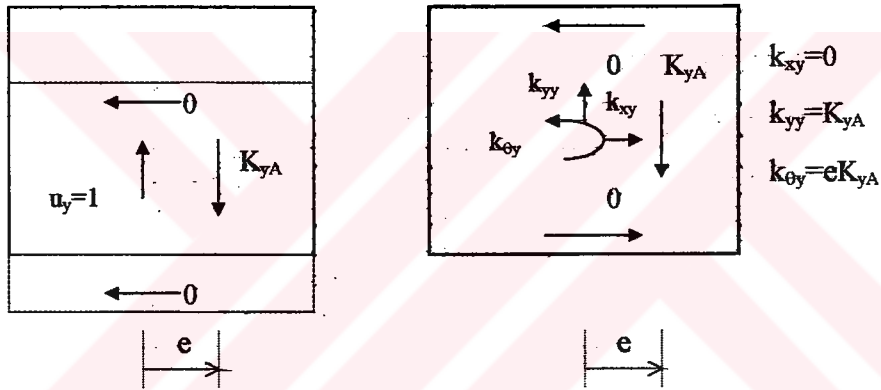
Yukarıdaki eşitlik temel yerdeğiştirmelerine ve yer hareketine göre bağlaşıklık $3N$ denklemden oluşan bir diferansiyel denklem sistemini ifade etmektedir. $[m_x]$ ve $[m_y]$, $N \times N$ mertebeden bir köşegen kütle alt matrisi; $[m_\theta]$, $N \times N$ mertebeden ilgili eksene göre bir köşegen dönme atalet momenti alt matrisini; $[K]$, sistemdeki ilgili çerçevelerin $3N \times 3N$ mertebeden rijitlik matrisini gösterir [46].

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_{xB}] + [K_{xC}] & [0] & (d/2)([K_{xB}] - [K_{xC}]) \\ [0] & [K_{yA}] & e[K_{yA}] \\ (d/2)([K_{xB}] - [K_{xC}]) & e[K_{yA}] & e^2[K_{yA}] + (d^2/4)([K_{xB}] + [K_{xC}]) \end{bmatrix}$$

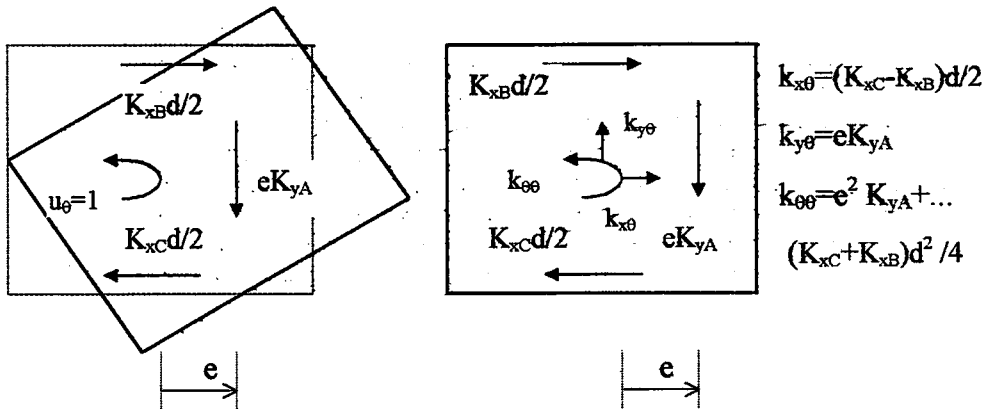
a-) $u_x=1, u_y=u_\theta=0$



b-) $u_x=0, u_y=1, u_\theta=0$



c-) $u_x=0, u_y=0, u_\theta=1$



Şekil 2.2 İki doğrultuda simetrik olmayan katın rijitliklerinin saptanması

Sistemin rijitlik matrisinde her bir kolondaki terimler, kat döşemelerine ait serbestlik dereceleri, diğerleri kilitli tutulurken, sırasıyla birim yerdeğiştirme yapmaya zorlanarak çerçevelerin bu yerdeğiştirmelere göstereceği statik kuvvetler tepkisiyle ile bulunabilir (Şekil 2.2). Bu matrislerin açılımları sırası ile aşağıda verilmiştir. Kütle alt matrisi $[m] = [m_x] = [m_y]$ olup,

$$[m_x] = [m_y] = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & \\ & m_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & m_i & & \\ & & & & \ddots & \\ & 0 & & & & m_{N-1} \\ & & & & & & m_N \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

m_i , herhangi bir katın kat seviyesinde toplanmış kütlesini gösterir.

Dönme atalet momenti alt matrisi $[m_\theta]$,

$$[m_\theta] = \begin{bmatrix} m_1 r_1^2 & & & & & \\ & m_2 r_2^2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & m_i r_i^2 & & \\ & & & & \ddots & \\ & 0 & & & & m_{N-1} r_{N-1}^2 \\ & & & & & & m_N r_N^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada r_i her hangi bir i . kat döşemesinin eylemsizlik yarıçapını gösterir. Rijitlik alt matrisleri ise, sırasıyla $[K_{xB}]$, $[K_{xC}]$ ve $[K_{yA}]$ Şekil 1’de gösterilen B ve C çerçevelerinin x yönündeki öteleme rijitlik matrislerini ve A çerçevesinin y yönündeki öteleme rijitlik matrisini temsil etmektedir. Planda x doğrultusunda yerleştirilen B ve C çerçevelerinin öteleme rijitlik alt matrisi (2.9) ile, y doğrultusundaki A çerçevesine ait rijitlik alt matrisi (2.10) bağıntısıyla hesaplanır.

$$K_{xiB} = \sum_{j=1}^s k_{jxiB}, \quad K_{xiC} = \sum_{j=1}^s k_{jxiC}, \quad \text{ve} \quad K_{yiA} = \sum_{j=1}^s k_{jyiA} \quad i. \text{ katın } x \text{ ve } y \text{ yönlerindeki ilgili}$$

çerçevelerin toplam öteleme rijitlikleridir. k_{jxiB} , k_{jxiC} ve k_{jyiA} sırasıyla i . katın B, C ve A

çerçeve elemanlarına ait j nolu kolonlarının öteleme rijitliklerini gösterir. İlgili çerçevedeki toplam kolon sayısı s ile ifade edilmiştir. Alt matrislere ait rijitlikler, $[K_{xB}], [K_{xC}] = [K_{xx}]$,

$$[K_{xx}] = \begin{bmatrix} K_{x1} + K_{x2} & -K_{x2} & & & 0 \\ -K_{x2} & K_{x2} + K_{x3} & -K_{x3} & & \\ & & \ddots & & \\ & 0 & -K_{xi} & K_{xi} + K_{x(i+1)} & -K_{x(i+1)} \\ & & & & \ddots & -K_{xN} \\ & & & & -K_{xN} & K_{xN} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Alt matrislere ait rijitlikler, $[K_{yA}] = [K_{yy}]$,

$$[K_{yy}] = \begin{bmatrix} K_{y1} + K_{y2} & -K_{y2} & & & 0 \\ -K_{y2} & K_{y2} + K_{y3} & -K_{y3} & & \\ & & \ddots & & \\ & 0 & -K_{yi} & K_{yi} + K_{y(i+1)} & -K_{y(i+1)} \\ & & & & \ddots & -K_{yN} \\ & & & & -K_{yN} & K_{yN} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

(2.6) ortak sistemin hareket denklemlerinde, dış merkezliğin sıfır ($e=0$) olması, B ve C çerçevelerinin alt matrislerine ait öteleme rijitliklerinin eşit alınması ($[K_{xB}] = [K_{xC}]$), öteleme ve dönme arasındaki bağışıklığı ortadan kaldırır ($[K_{x0}]$ ve $[K_{y0}]$ matrisleri sıfır matrisine dönüşür). Böylece (2.6) hareket denklemi, simetrik bir yapının x ve y doğrultularındaki öteleme ve dönme hareketlerine karşı gelen, birbirinden bağımsız hareket denklemlerine dönüşür.

Sistemin hareket denklemleri sönümsüz sistemler için yazılmıştır. Yapı-zemin ortak sisteminde, rijit zemine mesnetlenmiş sistemin modlarının dikliği kullanılarak normal modlar gibi benzer mod şekilleri ile işlem yapılacağı düşünüldüğünde, (2.6) denklemleri ayrıklaştırılabilir ve genelleştirilmiş koordinatlara göre ifade edilebilir:

$$\ddot{q}_k(t) + 2\xi_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -F_k(t), \quad k=1,2,3,\dots,3N, \quad (2.11)$$

Burada ω_k ve ξ_k , sistemin k. normal moduna karşı gelen sönümsüz doğal frekans ve sönüm oranını göstermektedir. Çok katlı burulmalı yapıların modal analiz sonucu ayrıklaştırılan diferansiyel denklemine (2.1), elastik zeminin katkısı da dikkate alınarak,

$$\{\phi_k\}^T [M] \{\ddot{q}(t)\} + \{\phi_k\}^T [K] \{q(t)\} = -\{\phi_k\}^T [M] \left\{ \begin{array}{c} \{1\} \ddot{u}_{ox}(t) + \{h\} \ddot{y}_{ox}(t) \\ \{1\} \ddot{u}_{gy}(t) + \{1\} \ddot{u}_{oy}(t) + \{h\} \ddot{y}_{oy}(t) \\ \{1\} \ddot{\theta}_o(t) \end{array} \right\}$$

$$\ddot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -(\{\phi_k^x\}^T [m_x] \{1\} \ddot{u}_{ox}(t) + \{\phi_k^x\}^T [m_x] \{h\} \ddot{y}_{ox}(t) +$$

$$\{\phi_k^y\}^T [m_y] \{1\} (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t)) + \{\phi_k^y\}^T [m_y] \{h\} \ddot{y}_{oy}(t) + \{\phi_k^\theta\}^T [m_\theta] \{1\} \ddot{\theta}_o(t)) \frac{1}{M_k} = F_k(t)$$

(2.12a)

hareket denklemine dönüştürmek mümkün olur. Bu durumda

$$F_k(t) = \alpha_{1k} \ddot{u}_{ox}(t) + \alpha_{2k} \ddot{y}_{ox}(t) + \alpha_{3k} (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t)) + \alpha_{4k} \ddot{y}_{oy}(t) + \alpha_{5k} \ddot{\theta}_o(t)$$

(2.12b)

olarak düzenlenebilir. Kuvvet ifadesinde yer alan α_{1k} , α_{2k} , α_{3k} , α_{4k} ve α_{5k} , k. moda ait kat sayıları göstermektedir ve aşağıda (2.13-2.14) nolu bağıntılarıyla verilmiştir. Temel tabanı üst kotundan ölçülen kat yüksekliklerine ait kolon vektörü $\{h\}$ ile gösterilmiştir.

$$\alpha_{1k} = \frac{\{\phi_k^x\}^T [m_x] \{1\}}{M_k}, \quad \alpha_{2k} = \frac{\{\phi_k^x\}^T [m_x] \{h\}}{M_k}, \quad \alpha_{3k} = \frac{\{\phi_k^y\}^T [m_y] \{1\}}{M_k}$$

$$\alpha_{4k} = \frac{\{\phi_k^y\}^T [m_y] \{h\}}{M_k}, \quad \alpha_{5k} = \frac{\{\phi_k^\theta\}^T [m_\theta] \{1\}}{M_k}$$

(2.13)

Genelleştirilmiş kütle M_k ,

$$M_k = \{\phi_k^x\}^T [m_x] \{\phi_k^x\} + \{\phi_k^y\}^T [m_y] \{\phi_k^y\} + \{\phi_k^\theta\}^T [m_\theta] \{\phi_k^\theta\}$$

(2.14)

$\{\phi_k^x\}$, $\{\phi_k^y\}$ ve $\{\phi_k^\theta\}$ vektörleri, k. titreşim moduna karşı gelen titreşim matrisinin alt vektörleridir. Her katın yerdeğiştirme vektörü mod süperpozisyonu yöntemiyle elde edilecektir:

$$\{U(t)\} = \sum_{k=1}^{3N} \{\phi_k\} q_k(t) = \sum_{k=1}^{3N} \begin{Bmatrix} \phi_k^x \\ \phi_k^y \\ \phi_k^\theta \end{Bmatrix} q_k(t) = [\phi] \{q(t)\} \quad (2.15)$$

$\{q(t)\}$, 3N elemanlı genelleştirilmiş koordinat vektörünü ifade etmektedir.

Problemin çözümünün tamamlanabilmesi için daha iki izdüşüm ve üç moment denge denklemlerine ihtiyaç vardır. Bu denklemler bütün sistemin dengesini düşünerek yazılabilir. Bunlar,

$$m_o \ddot{u}_{ox}(t) + \sum_{i=1}^N m_i (\ddot{u}_{ox}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \ddot{u}_{xi}(t)) + P_{ox}(t) = 0 \quad (2.16a)$$

$$m_o (\ddot{u}_{oy}(t) + \ddot{u}_{gy}(t)) + \sum_{i=1}^N m_i (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \ddot{u}_{yi}(t)) + P_{oy}(t) = 0 \quad (2.16b)$$

$$I_{tx} \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \sum_{i=1}^N m_i h_i (\ddot{u}_{ox}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \ddot{u}_{xi}(t)) + M_{ox}(t) = 0 \quad (2.16c)$$

$$I_{ty} \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \sum_{i=1}^N m_i h_i (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \ddot{u}_{yi}(t)) + M_{oy}(t) = 0 \quad (2.16d)$$

$$m_o r_o^2 \ddot{\theta}_o(t) + \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 (\ddot{\theta}_o(t) + \ddot{u}_{\theta i}(t)) + T_o(t) = 0 \quad (2.16e)$$

m_o ve r_o sırasıyla temel plağının kütlesi ve eylemsizlik yarıçapıdır. I_{tx} ve I_{ty} ise döşemelerin ve temel plağının x ve y eksenleri etrafındaki kütleli atalet momentlerinin toplamlarını gösterir. Dönmeler, dönme eksenine dik eksenin adıyla adlandırılmaktadır. $P_{ox}(t)$, $P_{oy}(t)$, $M_{ox}(t)$, $M_{oy}(t)$ ise sırasıyla ilgili eksenlere göre temel tabanındaki yatay zemin-yapı etkileşim kuvvetleri ve eğilme etkileşim momentlerini ifade eder. $T_o(t)$ burulma etkileşim momentidir. Bütün bu etkileşim kuvvetleri ve momentleri, daha sonra temel yerdeğiştirmelerine bağlı olarak ifade edilecektir.

2.3 HAREKET DENKLEMLERİNİN KARARLI ÇÖZÜMÜ

2.3.1 Zaman Bölgesinde Çözüm

Genelleştirilmiş koordinatlarda yazılan yapı-zemin ortak sisteminin hareket denklemlerinden (2.11), normal koordinat $q_k(t)$ temel yerdeğiştirmelerine ve yer hareketine bağlı olarak,

$$q_k(t) = -\frac{1}{\omega_{Dk}} \int_0^t F_k(\tau) e^{-\xi_k \omega_k (t-\tau)} \sin \omega_{Dk} (t-\tau) d\tau \quad (2.17)$$

olarak çözülebilir. Burada ω_{Dk} k. moda karşı gelen sönümlü doğal frekans olup $\omega_{Dk} = \omega_k \sqrt{1-\xi_k^2}$ dir. Kat yerdeğiştirmeleri (2.15) ve bunlara karşı gelen normal koordinatlara (2.17) bağlı kat ivmeleri, bütün sistemin denge denklemlerinde (2.16) yerine konularak, sadece temel yerdeğiştirmelerine u_{ox} , u_{oy} , γ_{ox} , γ_{oy} , θ_o ve temel ile zeminin arakesitindeki etkileşim kuvvetleri ve momentlerine bağlı integralli ve diferansiyelli terimler içeren denklem sistemine dönüşür.

Etkileşim kuvvetleri ve momentleri $P_{ox}(t)$, $P_{oy}(t)$, $M_{ox}(t)$, $M_{oy}(t)$, $T_o(t)$ yerine Veletsos ve Verbic [43], Veletsos ve Nair [44] tarafından geliştirilen zamana bağlı zemin-yapı etkileşim kuvvet-yerdeğiştirme bağlıntıları kullanılabilir. Yukarıda belirtilen araştırmacıların ileri sürdüğü temel yerdeğiştirmelerine bağlı ifadeler sistemin (2.16) denge denklemlerinde yer aldığında, planda simetrik olmayan yapı-temel sistemlerinin davranışı için hareket denklemi sadece temel yerdeğiştirmelerine bağlı olarak elde edilmiş olur. Bu denklemler zaman bölgesinde adım adım integre edilerek temele ait yerdeğiştirmeler hesaplanır [40, 42].

2.3.2 Frekans Bölgesinde Çözüm

Temel yerdeğiştirmelerinin zaman bölgesindeki çözümü, özellikle çok serbestlik dereceli sistemler için hem oldukça karmaşık ve hem de büyük hesap yükü gerektirir. İşlem hacminin fazla olması nedeniyle hem bilgisayar programlama tekniği açısından hem de belleğin ekonomik kullanımı açısından uygunluğu tartışılır. Genellikle dinamik zemin-yapı etkileşim kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri titreşim hareketinin frekansına

bağlıdır. Frekans bölgesinde araştırma, çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemlerinin Fourier dönüşümünü gerektirir. Bu yöntemde dinamik dış etkiye ayrık Fourier dönüşümü uygulanarak, dış etki harmonik bileşenlere ayrılır. Sistemin analizi gerekli sayıda harmonik için yapıldıktan sonra, zaman tanım alanında belirlenmesi istenen dinamik büyüklüklerin ters Fourier dönüşümü elde edilir. Cooley ve Tukey [19] tarafından geliştirilen hızlı Fourier dönüşüm algoritması, ikili aritmetik düzen yardımıyla, ayrık Fourier dönüşümünün kısa sürede yapılabilmesini sağlamaktadır. Chopra ve Gutierrez [21], çok katlı düzlemsel yapılarla zemin arasındaki karşılıklı etkileşim probleminde, genelleştirilmiş koordinat dönüşümünü gerçekleştirerek sistemin hareket denklemlerindeki bilinmeyen sayısını azaltmış ve hızlı Fourier dönüşüm algoritmasını kullanarak doğrudan çözüm yaklaşımından daha basit ve etkili bir yöntem elde etmişlerdir.

2.3.3 Çok serbestlik Dereceli Sistemlerin Hareket Denklemlerinin Fourier Dönüşümü

Çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi normal koordinatlarda yazıldığında, (2.11) nolu

$$\ddot{q}_k(t) + 2\xi_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -F_k(t)$$

eşitlik elde edilmişti. Bu hareket denkleminin sağ tarafındaki ifadenin temelin şekil değiştirebilir durumunu da hesaba kattığı gözönüne alınsın. Normal koordinatın ve dış yükün ters dönüşümleri yazıldığında,

$$q_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{q}_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.18a)$$

$$\dot{q}_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i\omega \tilde{q}_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.18b)$$

$$\ddot{q}_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -\omega^2 \tilde{q}_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.18c)$$

$$F_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.18d)$$

ifadeleri elde edilir. Bunlar (2.11) bağıntısında kullanıldığında,

$$\tilde{q}_k(\omega) = -\frac{\tilde{F}_k(\omega)}{\omega_k^2 + 2i\xi_k \omega_k \omega - \omega^2} \quad (2.19)$$

$$H_k(\omega) = -\frac{1}{\omega_k^2 + 2i\xi_k \omega_k \omega - \omega^2} \quad (2.20)$$

elde edilir. Bağıntıdaki $\tilde{F}_k(\omega)$, $F_k(t)$ nin Fourier dönüşümünü göstermektedir.

$H_k(\omega)$, harmonik olarak değişen yer hareketine karşı sistemin kararlı davranışını göstermekte olup Karmaşık Frekans Davranış Fonksiyonu olarak adlandırılır. Burada ω dış yükün frekansını, ω_k ise sistemin k. moduna ait sönümsüz serbest titreşim frekansını göstermektedir. (2.18a ve 2.19) eşitlikleri düzenlenerek,

$$q_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_k(\omega) \tilde{F}_k(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.21a)$$

$$\tilde{q}_k(\omega) = H_k(\omega) \tilde{F}_k(\omega) \quad (2.21b)$$

yazılabilir. Burada $\tilde{q}_k(\omega)$, $q_k(t)$ nin Fourier dönüşümünü göstermektedir:

$$\tilde{q}_k(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} q_k(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.22)$$

Sistemin kat yerdeğiştirmelerinin frekans alanındaki görüntüleri ise (2.15) den

$$\{\tilde{U}(\omega)\} = \begin{Bmatrix} \tilde{u}_x(\omega) \\ \tilde{u}_y(\omega) \\ \tilde{u}_\theta(\omega) \end{Bmatrix} = [\phi] \{\tilde{q}(\omega)\} \quad (2.23)$$

ile frekans alanında ve ters Fourier dönüşümü yapılarak

$$\{U(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{\tilde{U}(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega \quad (2.24)$$

kat yerdeğiştirmelerinin zaman alanındaki kararlı davranışı bulunabilir. Buradaki $\tilde{U}(\omega)$ yapı-temel ortak sistemine ait hareket denkleminin frekans alanındaki çözümü olarak isimlendirilebilir.

Çözüm için frekans tanım alanının tercih edilmesinin nedeni, radyasyon nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için eşdeğer anlamda kullanılan radyasyon sönümünün frekansa bağlı yazılabilmesi, ve çözümün zaman tanım alanında yapılması durumunda, zamana bağlı ifade edilmesinden dolayı analitik işlemlerin kolay olmayışdır.

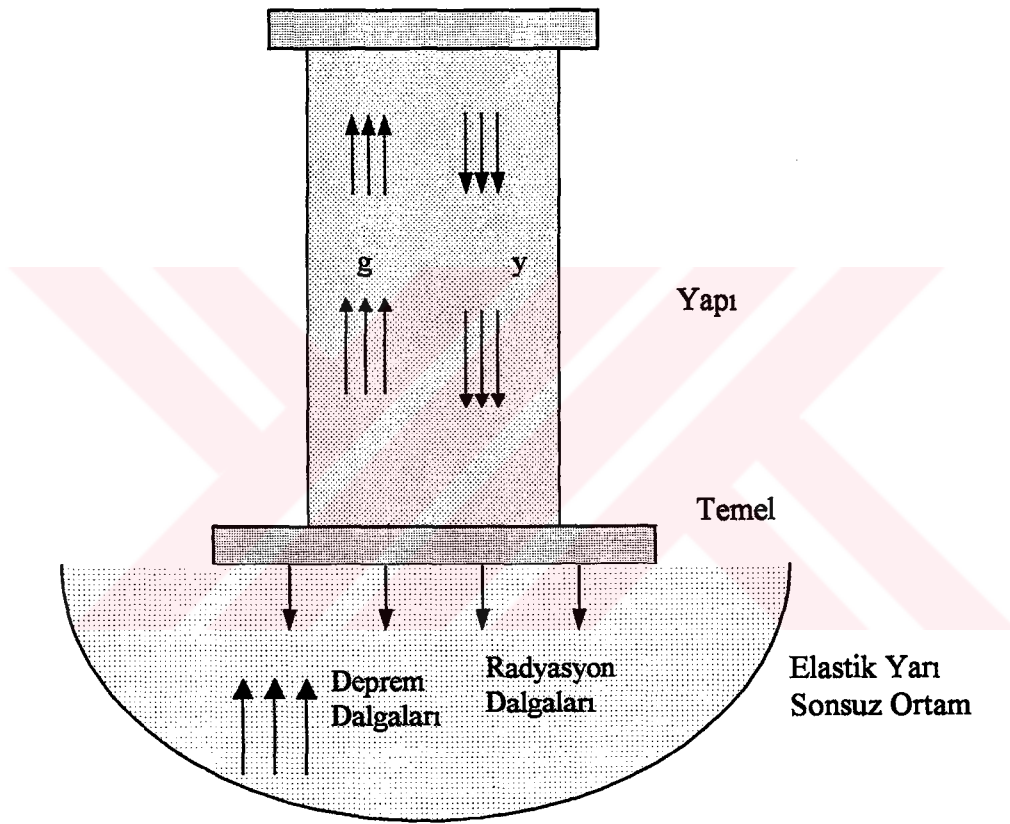
Bu durumun oluşturduğu matematiksel güçlükler nedeni ile, yapı-zemin etkileşimi analizinin frekans tanım alanında yapılması uygun olmaktadır. Bu tür analizde dinamik dış etkiye ayrık Fourier dönüşümü uygulanarak, dış etki harmonik bileşenlerine ayrılır. Sistemin analizi gerekli sayıda harmonik için yapıldıktan sonra, zaman tanım alanında belirlenmesi istenen dinamik büyüklükler ters Fourier dönüşümü ile elde edilir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform -FFT) algoritması yardımı ile dönüşüm işlemlerinin bilgisayarda kolaylıkla yapılması mümkün olmaktadır [47].

2.3.4 Radyasyon Dalgaları ve Radyasyon Sönümü

Zeminden gelen deprem dalgaları yapı temelının alt yüzeyine ulaştığında, bunların bir kısmı yapı içerisine geçer ve yapının üst katlarına doğru (g) yayılır. Bir kısmı da yansıyarak zemin ortamına geri döner. Yapının üst kısmına ulaşan dalgalar yansıyarak temele doğru ilerler (y). Bu dalgaların bir kısmı zemine geçerken diğer kısmı yapının üstüne doğru tekrar geri yansır (Şekil 2.3).

Bu çevrimsel süreç içerisinde, zeminden gelen deprem dalgalarının etkisi ile titreşen üst yapıdan zemine geri dönen dalgalar, zemin ortamının sınırsızlığı nedeni ile radyasyona uğrarlar. Yapı içerisine girdikten sonra zemin ortamına tekrar geri dönen bu deprem dalgalarına Radyasyon Dalgaları denir.

Bu durum üst yapıdan zemine aktarılan dinamik enerjinin bir kısmının zeminde, zeminin dinamik malzeme davranışının tümü ile bağımsız olarak salt geometrik nedenlerle yutulması anlamına gelir. Bu nedenle söz konusu enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen zemin sönümünün belirlenmesi gerekir [48,50].



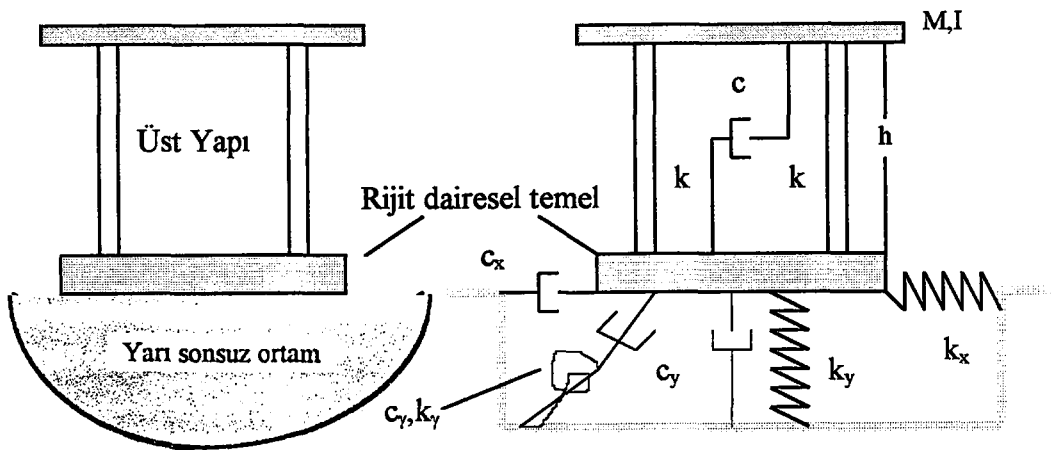
Şekil 2.3 Zemin-yapı sisteminde deprem dalga yayılımı

2.4 ZEMİN ALT SİSTEMİ VE EMPEDANS ANALİZİ

Bu çalışmanın amacı, planda simetrik olmayan çok katlı yapıların zemin-yapı etkileşim probleminde, frekansa bağlı empedans katsayılarını ve rijit zemine mesnetlenmiş sistemin modlarının dikliğini uygun biçimde kullanarak, zaman bölgesinde elde edilen çözümlere göre daha elverişli, işlem hacmi fazla olmayan, basitleştirilmiş bir çözüm metodu ortaya koymaktır.

Buraya kadar ki bölümlerde, üstyapının deprem yer hareketi etkisindeki zorlanmış titreşim denklemleri temelin şekil değiştirebilir özelliğini de dikkate alarak (2.6) ile ifade edilmişti. Ayrıca çözümün tamamlanması için gerekli beş denge denklemi (2.16a-e) de, bütün sistemin dengesi düşünülerek, yapı temelinin zeminle arakesitinde yazılmıştı. Her katın yerdeğiştirme vektörü, mod birleştirme yöntemi kullanılarak yapı-zemin ortak sistemine ait hareket denkleminin frekans alanındaki çözümünden zaman alanındaki kararlı davranışı (2.23-2.24) bulunabilmekteydi. Problemin doğrudan çözüm yaklaşımının tamamlanabilmesi için temel ile zeminin temas yüzeyinde yazılan denklemlerdeki etkileşim kuvvetlerini $P_{ox}(t)$, $P_{oy}(t)$, $M_{ox}(t)$, $M_{oy}(t)$, $T_o(t)$ yer hareketinin titreşim frekansına bağlı ifade edebilmek gerekir.

Zemin bölgesi yerine uygun yay ve sönümleyicilerin yerleştirilmesi (Şekil 2.4) zemin-yapı sistemlerinin dinamik analizinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır; bu yaklaşım hem bilgisayar programlarının bellekte kapladıkları hacmi azaltmakta, hem de daha basit, yaklaşık çözüm teknikleri kullanma imkanı vermektedir.

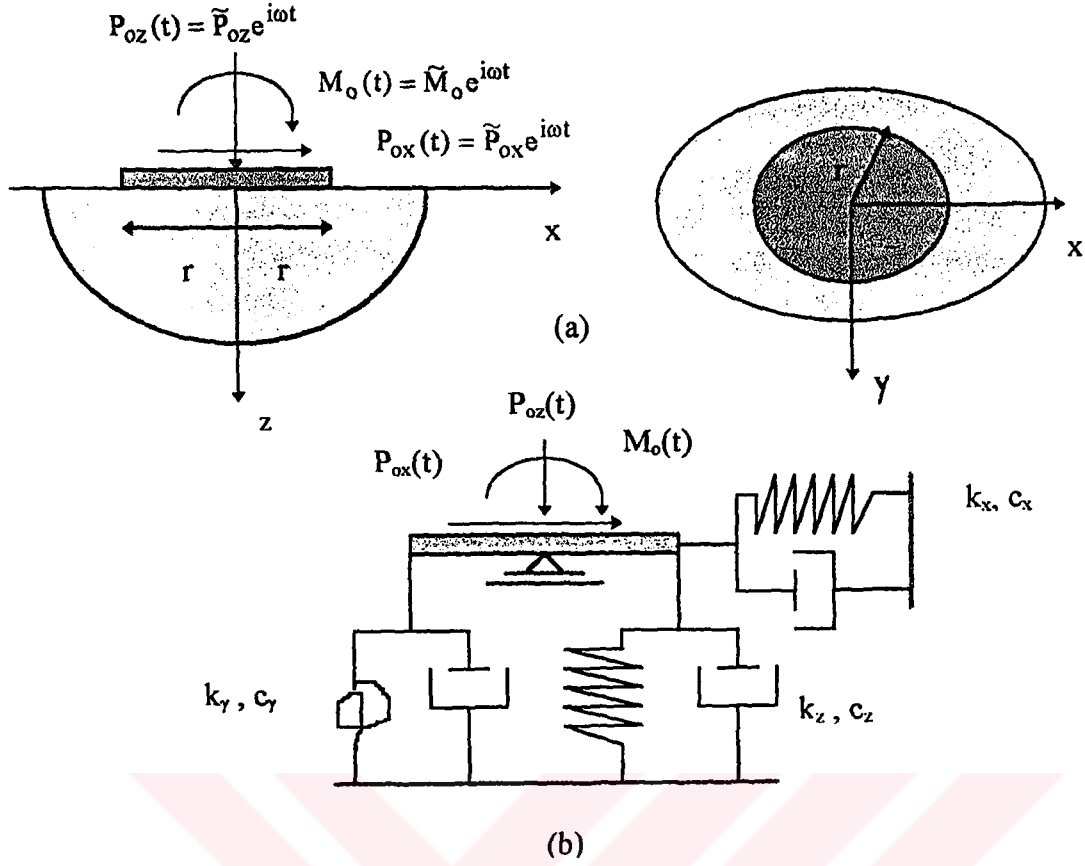


Şekil 2.4 Elastik yarı sonsuz zemin ortamının idealleştirilmesi

Yapı-zemin ortak sistemini birbiriyle etkileşen iki alt sistem olarak incelemek gerekir. Zemin alt sisteminin katkısı, etkileşim yerdeğiştirmelerinden dolayı yapı-zemin arakesitinde geliştirilen elastik etkileşim kuvvetleri ile temsil edilir. Bu kuvvetlerin yapı alt sisteminde gösterilmesi ile yapının dinamik dış yükler altındaki davranışı hesap edilebilir. Bir başka ifade ile bu yaklaşımda iki ayrı sistem olarak ele alınan üstyapı ve zeminin denge denklemleri ayrı ayrı yazılır, daha sonra da üstyapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Aydınoğlu ve arkadaşları [52] , göreceli olarak yumuşak zemine oturan deprem yüklerinin tamamen perdelerle taşıdığı 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 koşullarının eşdeğer deprem yer ivmesi üzerindeki etkilerine mühendisçe yaklaşımlar getirmişlerdir.

Dinamik dış etkiler altında rijit temel plağının tabanındaki gerilme yayılımı bilinmediğinden, bu yayılım için birçok araştırmacı değişik kabuller yaparak sonuca gitmişlerdir. [49-51],

Bu çalışmada zemin homogen, izotrop ve lineer elastik yarı sonsuz ortam olarak ele alınmıştır. Temel tabanı ile elastik düzlem arasındaki etkileşim kuvvetleri, elastik düzlem üzerindeki kütlesiz rijit dairesel plağın harmonik yükler altında titreştirilmesi sonucu elastodinamiğin bir karışık sınır değeri probleminin çözümünden elde edilmiştir. Burada (Şekil 2.5) görülüyor ki düşey ile eğilme hareketleri arasındaki küçük etkileşim (bağlıklık) ihmal edildiğinde [37], elastik düzlemin dış yüklere karşı koyma davranışı lineer elastik yaylar ve sönümleyicilerin bileşimi ile temsil edilebilmektedir .



Şekil 2.5 Rijit dairesel temel plağı - yarı sonsuz düzlem

Bu gösterimde (Şekil 2.5b) yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini; sönümleyiciler ise enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen eşdeğer (fiktif) zemin sönümünü (radyasyon sönümü veya geometrik sönüm) açıklamaktadır.

Zeminin katkısını ifade eden bu eşdeğer elemanların özellikleri temel-yarı düzlem sisteminin karakteristiklerine ve titreşim hareketinin frekanslarına bağlıdır. Gerçekte bu eşdeğer yaylar ve sönümleyicilerin özelliklerinin frekansa bağımlılığı, yapı dinamiği problemlerini özellikle karşılıklı etkileşen sistemlerin davranışının araştırılmasını daha karmaşık hale getirmektedir.

2.4.1 Empedans Fonksiyonları

Temel plağı ile elastik yarı düzlem arakesitinde yer alan etkileşim kuvvetleri (P_o , M_o) ile bunlara karşı gelen temel ötelemesi ile dönmesi (u_o ve γ_o) arasındaki kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi harmonik titreşim durumunda, düzlem sistemler için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{Bmatrix} P_o(t) \\ M_o(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pp}(\omega) & K_{pm}(\omega) \\ K_{mp}(\omega) & K_{mm}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_o(t) \\ \gamma_o(t) \end{Bmatrix} \quad (2.25)$$

Empedans fonksiyonları $K_{pp}(\omega)$, $K_{pm}(\omega)$, $K_{mp}(\omega)$, $K_{mm}(\omega)$, dairesel plağa ayrı ayrı uygulanan harmonik yatay kuvvet ile harmonik eğilme momentinden meydana gelen iki sınır değer probleminin çözümünden elde edilir. Dairesel plağın rijit kabul edilmesinden dolayı bir düzgün yatay öteleme; titreşim düzlemine dik bir düşey eksen etrafında da rijit bir dönme meydana gelecektir. Sınır şartı olarak, yarı sonsuz ortamın serbest yüzeyinde gerilmelerin sıfır olduğu kabul edilir. İzotrop elastik yarı düzlem üzerinde yer alan dairesel plaklar için bu karışık sınır değer problemlerinin kesin çözümü olmamasına rağmen, temel yüzeyi ile plak arasında değme koşulları ile ilgili bazı basitleştirilmiş kabuller kullanılarak yaklaşık çözümler elde edilmiştir [26].

2.4.2 Elastik Yarı Sonsuz Düzlem İçin Geliştirilen Empedans Fonksiyonlarının Hareket Denklemlerinde Kullanılması

Şimdiye kadar yarı elastik düzlem üzerinde yer alan rijit dairesel plak durumu için (Şekil 3a) birçok çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir [55]. Kuvvet genlikleri, P_o ve M_o , bunlara karşı gelen yerdeğiştirme genlikleri, u_o ve γ_o , arasındaki ilişki,

$$\begin{Bmatrix} P_o \\ M_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_{11} + ia_0 c_{11})K_x & (k_{21} + ia_0 c_{21})K_{xr} \\ (k_{21} + ia_0 c_{21})K_{xr} & (k_{22} + ia_0 c_{22})K_\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_o \\ \gamma_o \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Fiktif rijitlik ve sönüme ait boyutsuz katsayıların değerleri (k ve c ler), Poisson oranı ν ve frekans parametresine ($a_0 = \frac{\omega r}{c_s}$) bağlıdır. Bu ifade de r dairesel plağın yarıçapını; ω dış etkinin titreşim frekansını; c_s kayma dalgası yayılma hızını göstermektedir. Bu hız, $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ olarak bilinir. G ve ρ sırasıyla yarı sonsuz düzlem malzemesinin kayma modülünü ve kütleli yoğunluğunu gösterir ve $i = \sqrt{-1}$ dir.

Dairesel temel plağında birim yatay yerdeğiştirme yaptırabilmek için (diğer serbestlik bileşenleri kilitli tutularak) gerekli yatay statik kuvvet $K_x = \frac{8Gr}{(2-\nu)}$, plağı, kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafında birim açıyla döndürebilmek için gerekli statik moment $K_\gamma = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}$ bulunur. Empedans fonksiyonlarının reel kısmı temelin dinamik rijitlik katsayılarını, sanal kısmı ise temelden uzaklaşarak yarı elastik düzleme yayılan radyasyon dalgalarının meydana getirdiği enerji kaybını ifade eden sönüm katsayılarını gösterir.

Elastik yarı düzlem için empedans fonksiyonlarına ait değerler farklı Poisson oranlarına göre boyutsuz titreşim frekansına (a_0) bağlı olarak Veletsos ve Wei [37] tarafından elde edilmiştir, bu çalışmada bu katsayılardan yararlanılmıştır.

Temel empedans fonksiyonlarının frekansa bağımlı olmasından dolayı zemin-yapı ortak sistemine ait hareket denklemlerinin çözümü karmaşık hale gelmektedir. Bu yüzden birçok araştırmacı titreşim kaynağının frekansından bağımsız sabit değerli temel empedans (2.27a) katsayıları önermişlerdir [31]. Bu sabit parametreler genel uygulamalarda kabul görmektedir. Fakat frekanstan bağımsız yaklaşık empedansların kullanılmasının düşünülmesi, elbette dinamik problemlerin çözümünde mümkün olabilecek en son basitleştirme örneğidir.

$$\begin{Bmatrix} P_o \\ M_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_o \\ \dot{\phi}_o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_o \\ \phi_o \end{Bmatrix} \quad (2.27a)$$

Bu bağıntıya ait empedans değerleri elastik düzlemdeki rijit dairesel plak için:

$$k_x = \frac{32Gr(1-\nu)}{(7-8\nu)}, \quad k_\gamma = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}, \quad c_x = 0.576k_x r \left(\sqrt{\frac{\rho}{G}} \right), \quad c_\gamma = \frac{0.3}{1+B_\gamma} k_\gamma r \left(\sqrt{\frac{\rho}{G}} \right),$$

$$B_\gamma = \frac{3(1-\nu)I_t}{8\rho r^5} \text{ ve } I_t \text{ temel ile yapının atalet momentlerinin toplamını göstermektedir.}$$

Yukarıdaki empedans sabitleri için değerler düşey ve burulma hareketi ve dikdörtgen şekilli temeller için de verilebilir [53].

Şimdiye kadar empedans fonksiyonları üzerinde yapılan çalışmaların çoğunda, yarı sonsuz temel ortamı elastik olarak alınmıştır. Zeminin malzeme sönümü ihmal edilmektedir. Zeminin elastik veya visko-elastik olarak düşünülmesi arasındaki belirgin farklılık visko-elastik model için artan sönümde yatmaktadır. Bazı araştırmacılar, yarı düzlemin geometrik sönümüne zeminin malzeme sönümünün de eklenmesini önermektedirler [31]. Visko-elastik yarı düzlem için elde edilen empedans fonksiyonları, dinamik denge denklemlerinin çözümünde, aynı yarı elastik düzlemdeki empedans fonksiyonları gibi davranırlar. Ancak, dinamik problemlerin çözümlerinde, malzeme sönümünün ihmal edilmesi, yapıların yerdeğiştirme davranışında bir miktar artma eğilimine neden olur.

$$\begin{Bmatrix} P_o \\ M_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_{11} + ia_o c_{11})(1 + 2i\beta)K_x & (k_{21} + ia_o c_{21})(1 + 2i\beta)K_{xr} \\ (k_{21} + ia_o c_{21})(1 + 2i\beta)K_{xr} & (k_{22} + ia_o c_{22})(1 + 2i\beta)K_\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_o \\ \gamma_o \end{Bmatrix} \quad (2.27b)$$

Verilen (2.27b) bağıntısı malzeme sönümünün de dikkate alınmasıyla elde edilmiştir. Bu ifadede β zeminin içsel sönüm (malzeme sönümü) oranını göstermektedir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi bu çalışmanın konusu olan çok katlı planda simetrik olmayan yapıların zeminle dinamik etkileşimini yansıtacak ortak sistemin hareket denklemlerinin doğru çözümü, temas yüzeyindeki etkileşim kuvvetlerine ait empedans fonksiyonlarının doğru seçilmesine ve düzlemsel modelde değil de üç boyutlu uzayda yazılmasına bağlı olacaktır.

Bu çalışmada, homogen, izotrop, elastik yarı sonsuz ortam için, yer hareketinin titreşim frekanslarına bağlı empedans fonksiyonlarına ait sayısal değerler, öteleme ve eğilme titreşimleri için Veletsos ve Wei [37], burulma titreşimleri için Veletsos ve Nair'den alınarak [44] daha gerçekçi bir yaklaşım elde edilmiştir. Temel ortamının rijitliği ve sönüm, titreşim hareketinin frekansına bağlı oldukları için, etkileşim kuvvetleri, eğilme ve burulma momentleri ve bunlara karşı gelen yanal temel ötelemeleri, eğilme ve burulma dönmeleri arasındaki ilişki, frekans alanında aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Elastik düzlemdeki kütsüz rijit plağa etkiyen harmonik yükler $P_{ox}(t) = \tilde{P}_{ox}e^{i\omega t}$, $P_{oy}(t) = \tilde{P}_{oy}e^{i\omega t}$, $M_{ox}(t) = \tilde{M}_{ox}e^{i\omega t}$, $M_{oy}(t) = \tilde{M}_{oy}e^{i\omega t}$, $T_o(t) = \tilde{T}_oe^{i\omega t}$, sonucu herhangi bir titreşim frekansında plağın göstereceği kararlı davranış harmonik yerdeğiştirmeler cinsinden, $u_{ox}(t) = \tilde{u}_{ox}e^{i\omega t}$, $u_{oy}(t) = \tilde{u}_{oy}e^{i\omega t}$, $\gamma_{ox}(t) = \tilde{\gamma}_{ox}e^{i\omega t}$, $\gamma_{oy}(t) = \tilde{\gamma}_{oy}e^{i\omega t}$, $\theta_o(t) = \tilde{\theta}_oe^{i\omega t}$ ifade edilerek aşağıdaki (2.28) bağıntısında elde edilir. $\tilde{P}_{ox}, \tilde{P}_{oy}, \tilde{M}_{ox}, \tilde{M}_{oy}, \tilde{T}_o, \tilde{u}_{ox}, \tilde{u}_{oy}, \tilde{\gamma}_{ox}, \tilde{\gamma}_{oy}$ ve $\tilde{\theta}_o$ sırasıyla $P_{ox}, P_{oy}, M_{ox}, M_{oy}, T_o, u_{ox}, u_{oy}, \gamma_{ox}, \gamma_{oy}, \theta_o$ 'ın Fourier genlikleridir.

$$\begin{Bmatrix} \tilde{P}_{ox} \\ \tilde{P}_{oy} \\ \tilde{M}_{ox} \\ \tilde{M}_{oy} \\ \tilde{T}_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ppx}(\omega) & K_{pxpy}(\omega) & K_{pxmx}(\omega) & K_{pxmy}(\omega) & K_{pxt}(\omega) \\ K_{pypx}(\omega) & K_{ppy}(\omega) & K_{pymx}(\omega) & K_{pymy}(\omega) & K_{pyt}(\omega) \\ K_{mxx}(\omega) & K_{mxy}(\omega) & K_{mmx}(\omega) & K_{mmy}(\omega) & K_{mxt}(\omega) \\ K_{myx}(\omega) & K_{myy}(\omega) & K_{mymx}(\omega) & K_{myy}(\omega) & K_{myt}(\omega) \\ K_{tpx}(\omega) & K_{tpy}(\omega) & K_{tmx}(\omega) & K_{tmy}(\omega) & K_{tt}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ox} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\theta}_o \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

Bu çalışmada temel plağının düşey doğrultudaki yerdeğiştirme bileşeni dikkate alınmamıştır. Ayrıca her iki doğrultuya ait yatay kuvvet bileşenlerinin birbirine olan etkileri ve eğilme momenti bileşenlerinin kendi aralarındaki etkileşimleri, kuvvet ve eğilme momenti bileşenlerinin burulma momenti ile karşılıklı etkileşimleri söz konusu olmadığından sıfıra eşittir [16]. Bununla birlikte, çoğu uygulamalarda görülmüştür ki yatay kuvvet ile eğilme momentleri arasındaki etkileşim ihmal edildiğinde, önemsenmeyecek derecede hatalar meydana gelmektedir [37]. Burada da bunlara ait empedans fonksiyonları dikkate alınmamıştır. Bütün bunlar tekrar değerlendirildiğinde (2.28) bağıntısı aşağıdaki biçimde yazılarak işlem hacmi, çözümün kesinliliğinden de fazla ödün vermeden, azaltılmış olur.

$$\begin{Bmatrix} \tilde{P}_{ox} \\ \tilde{P}_{oy} \\ \tilde{M}_{ox} \\ \tilde{M}_{oy} \\ \tilde{T}_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ppx}(\omega) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{ppy}(\omega) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{mmx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{mmy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{tt}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ox} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\theta}_o \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

Öteleme ve eğilme dönmesine ait empedans fonksiyonlarına (2.25), bu çalışmada incelenen problemin tabiatı gereği burulma empedans fonksiyonları da ilave edildiğinde,

$$K_{ppx}(\omega) = (k_1 + ia_o(\omega)c_1)K_x \quad (2.30a)$$

$$K_{ppy}(\omega) = (k_1 + ia_o(\omega)c_1)K_y \quad (2.30b)$$

$$K_{mmx}(\omega) = (k_2 + ia_o(\omega)c_2)K_{\gamma x} \quad (2.30c)$$

$$K_{mmy}(\omega) = (k_2 + ia_o(\omega)c_2)K_{\gamma y} \quad (2.30d)$$

$$K_{tt}(\omega) = (k_3 + ia_o(\omega)c_3)K_{\theta} \quad (2.30e)$$

ifadeleri elde edilir. Burada her iki eksen doğrultusu boyunca, yatay statik kuvvet değerleri ile statik eğilme moment değerleri birbirine eşit alındığından, her iki doğrultudaki öteleme empedans fonksiyonları ve dönme empedans fonksiyonları da birbirine eşit olacaktır ($K_{ppx} = K_{ppy}$, $K_{mmx} = K_{mmy}$). Burulma empedans fonksiyonuna ait

burulma momenti statik değeri, $K_{\theta} = \frac{16c_s^2 \rho r^3}{3}$ ifadesinden hesaplanır. Yapı-zemin

ortak sisteminin tamamı için yazılan dinamik denge denklemlerinde kullanılacak elastik yarı düzlemin dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları Tablo 2.1 de, Poisson oranı $\nu=1/3$ için verilmiştir.

Tablo 2.1 Rijitlik ve sönüm sabitleri (a_o bağlı olarak)

a_o	k_1	c_1	k_2	c_2
0.00	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
0.25	0.9973	0.5814	0.9826	0.0143
0.50	0.9899	0.5852	0.9381	0.0502
0.75	0.9786	0.5911	0.8818	0.0937
1.00	0.9651	0.5989	0.8251	0.1352
1.25	0.9517	0.6079	0.7723	0.1708
1.50	0.9407	0.6169	0.7240	0.2004
1.75	0.9342	0.6250	0.6794	0.2251
2.00	0.9329	0.6312	0.6379	0.2463
2.25	0.9362	0.6348	0.5992	0.2649

2.50	0.9419	0.6355	0.5638	0.2817
2.75	0.9465	0.6340	0.5324	0.2971
3.00	0.9472	0.6312	0.5058	0.3111
3.25	0.9412	0.6280	0.4849	0.3237
3.50	0.9283	0.6256	0.4700	0.3347
3.75	0.9087	0.6247	0.4609	0.3439
4.00	0.8846	0.6261	0.4546	0.3512
4.50	0.8616	0.6312	0.4494	0.3610
5.00	0.8257	0.6455	0.4393	0.3665
5.50	0.8461	0.6527	0.4181	0.3715
6.00	0.8772	0.6537	0.3929	0.3781
6.50	0.8959	0.6509	0.3792	0.3866
7.00	0.8888	0.6480	0.3918	0.3951
7.50	0.8668	0.6477	0.4341	0.4006
8.00	0.8504	0.6503	0.4906	0.4018

Ayrıca k_3 ve c_3 birim sabitleri aşağıdaki ifadelerden hesap edilir.

$$k_3=1-A, \quad c_3=A, \quad A = 0.425 \frac{(0.687a_0)^2}{(1+0.687a_0)^2} \quad (2.30f)$$

Etkileşim kesme kuvvetlerinin, eğilme momentlerinin ve burulma momentinin frekansa bağlı ifade edilmelerinden dolayı dinamik etkileşim problemini frekans bölgesinde formüle etmek en uygun yoldur. Bütün sistemin dengesi düşünülerek yazılmış olan (2.16a-e) denklem takımında, sırasıyla kat yerdeğiştirme ve temel yerdeğiştirme bileşenleri frekansa bağlı olarak ifade edilirse,

$$\{u_x(t)\} = \{\tilde{u}_x\}e^{i\omega t}, \quad \{\dot{u}_x(t)\} = i\omega\{\tilde{u}_x\}e^{i\omega t}, \quad \{\ddot{u}_x(t)\} = -\omega^2\{\tilde{u}_x\}e^{i\omega t}, \quad (2.31a)$$

$$\{u_y(t)\} = \{\tilde{u}_y\}e^{i\omega t}, \quad \{\dot{u}_y(t)\} = i\omega\{\tilde{u}_y\}e^{i\omega t}, \quad \{\ddot{u}_y(t)\} = -\omega^2\{\tilde{u}_y\}e^{i\omega t}, \quad (2.31b)$$

$$\{u_\theta(t)\} = \{\tilde{u}_\theta\}e^{i\omega t}, \quad \{\dot{u}_\theta(t)\} = i\omega\{\tilde{u}_\theta\}e^{i\omega t}, \quad \{\ddot{u}_\theta(t)\} = -\omega^2\{\tilde{u}_\theta\}e^{i\omega t}, \quad (2.31c)$$

$$u_{ox}(t) = \tilde{u}_{ox}e^{i\omega t}, \quad \dot{u}_{ox}(t) = i\omega\tilde{u}_{ox}e^{i\omega t}, \quad \ddot{u}_{ox}(t) = -\omega^2\tilde{u}_{ox}e^{i\omega t}, \quad (2.31d)$$

$$u_{oy}(t) = \tilde{u}_{oy}e^{i\omega t}, \quad \dot{u}_{oy}(t) = i\omega\tilde{u}_{oy}e^{i\omega t}, \quad \ddot{u}_{oy}(t) = -\omega^2\tilde{u}_{oy}e^{i\omega t}, \quad (2.31e)$$

$$\gamma_{ox}(t) = \tilde{\gamma}_{ox}e^{i\omega t}, \quad \dot{\gamma}_{ox}(t) = i\omega\tilde{\gamma}_{ox}e^{i\omega t}, \quad \ddot{\gamma}_{ox}(t) = -\omega^2\tilde{\gamma}_{ox}e^{i\omega t}, \quad (2.31f)$$

$$\gamma_{oy}(t) = \tilde{\gamma}_{oy} e^{i\omega t}, \dot{\gamma}_{oy}(t) = i\omega \tilde{\gamma}_{oy} e^{i\omega t}, \ddot{\gamma}_{oy}(t) = -\omega^2 \tilde{\gamma}_{oy} e^{i\omega t}, \quad (2.31g)$$

$$\theta_o(t) = \tilde{\theta}_o e^{i\omega t}, \dot{\theta}_o(t) = i\omega \tilde{\theta}_o e^{i\omega t}, \ddot{\theta}_o(t) = -\omega^2 \tilde{\theta}_o e^{i\omega t}, \quad (2.31h)$$

bulunur. Frekans bölgesinde yazılan bu denklemlerde, toplam kütle, $m_T = m_o + \{1\}^T [m] \{1\}$ olarak ifade edilmiştir ($[m_x] = [m_y] = [m]$). Aynı şekilde toplam dönme atalet momentleri ilgili eksenler için $I_{Tx} = I_{tx} + \{h\}^T [m] \{h\}$, $I_{Ty} = I_{ty} + \{h\}^T [m] \{h\}$, toplam burulma atalet momenti için $I_t = m_o r_o^2 + \{1\}^T [m_\theta] \{1\}$ eşitlikleri yazılabilir.

Bu eşitlikler(2.31a-h) yazıldıktan sonra bütün sistem için ifade edilmiş olan hareket denklem takımındaki (2.16a-e) zamana bağlı etkileşim kuvvetleri ve momentleri yerine frekansa bağlı (2.29) nolu ifadeler yerleştirildiğinde, (2.16a) nolu denge denklemini,

$$-\omega^2 m_o \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m] \{\tilde{u}_x(\omega)\} - \omega^2 \{1\}^T [m] \{1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) + K_{ppx}(\omega) \tilde{u}_{ox}(\omega) = 0 \quad (2.32)$$

olarak bulunur. Bu denklem düzenlendiğinde,

$$-\omega^2 \{1\}^T [m] \{\tilde{u}_x(\omega)\} + (K_{ppx}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) = 0 \quad (2.33)$$

elde edilir. (2.16b) nolu denklem düzenlenerek yazılırsa,

$$-\omega^2 \{1\}^T [m] \{\tilde{u}_y(\omega)\} + (K_{ppy}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{oy}(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) = \omega^2 m_T \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.34)$$

elde edilir.(2.16c) nolu denge denklemini ise,

$$\begin{aligned}
& -\omega^2 I_{tx} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{h\}^T [m] \{1\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) \\
& - \omega^2 \{h\}^T [m] \{\tilde{u}_x(\omega)\} + K_{mmx}(\omega) \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) = 0
\end{aligned} \tag{2.35}$$

olarak elde edilir; düzenlenerek yazılırsa,

$$\begin{aligned}
& -\omega^2 \{h\}^T [m] \{\tilde{u}_x(\omega)\} - \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{u}_{ox}(\omega) \\
& + (K_{mmx}(\omega) - \omega^2 (I_{tx} + \{h\}^T [m] \{h\})) \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) = 0
\end{aligned} \tag{2.36}$$

bulunur. Aynı şekilde, (2.16d) nolu denge denklemi düzenlenerek ifade edilirse,

$$\begin{aligned}
& -\omega^2 \{h\}^T [m] \{\tilde{u}_y(\omega)\} - \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{u}_{oy}(\omega) \\
& + (K_{mmy}(\omega) - (\omega^2 I_{ty} + \{h\}^T [m] \{h\})) \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) = \omega^2 \{1\}^T [m] \{h\} \tilde{u}_{gy}(\omega)
\end{aligned} \tag{2.37}$$

şeklinde yazılabilir. Son olarak, z eksenini etrafındaki dönme hareket denkleminin (2.16e),

$$\begin{aligned}
& -\omega^2 m_o r_o^2 \tilde{\theta}_o(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m_\theta] \{1\} \tilde{\theta}_o(\omega) - \omega^2 \{1\}^T [m_\theta] \{\tilde{u}_\theta(\omega)\} \\
& - K_{tt}(\omega) \tilde{\theta}_o(\omega) = 0
\end{aligned} \tag{2.38}$$

elde edilen bu ifade tekrar düzenlenerek,

$$-\omega^2 \{1\}^T [m_\theta] \{\tilde{u}_\theta\} + (K_{tt}(\omega) - \omega^2 (m_o r_o^2 + \{1\}^T [m_\theta] \{1\})) \tilde{\theta}_o(\omega) = 0 \tag{2.39}$$

bulunur. Bundan sonraki ifadelerde $\{1\}^T [m] = \{a\}^T$, $\{1\}^T [m] \{h\} = b$, $\{1\}^T [m] = \{c\}^T$, $\{h\}^T [m] = \{d\}^T$ şeklinde kısaltmalar yapılacaktır.

Frekans bölgesinde x eksenini doğrultusundaki öteleme dinamik denge denklemi (2.33), yukarıdaki kısaltmaları da dikkate alarak tekrar yazılırsa,

$$-\omega^2 \{a\}^T \{\tilde{u}_x(\omega)\} + (K_{ppx}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) = 0 \tag{2.40}$$

şeklinde elde edilir. Kat öteleme yerdeğiştirme bileşeni yerine, (2.23) bağıntısından

$\{\tilde{u}_x(\omega)\} = [\phi^x]_{(N \times 3N)} \{\tilde{q}(\omega)\}_{(3N \times 1)}$ kullanılarak,

$$-\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] \{\tilde{q}(\omega)\} + (K_{ppx}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) = 0 \quad (2.41)$$

yazılabilir. Burada normal koordinat $\tilde{q}_k(\omega)$ yerine (2.21) nolu bağıntıdaki $\tilde{q}_k(\omega) = H_k(\omega) \tilde{F}_k(\omega)$, ($k=1 \dots 3N$) ifadesi; frekans bölgesinde elde edilmiş zeminin şekil değiştirebilir durumunu da dikkate alan dinamik dış yük yerine,

$$\tilde{F}_k(\omega) = \alpha_{1k} \tilde{u}_{ox}(\omega) + \alpha_{2k} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) + \alpha_{3k} (\tilde{u}_{gy}(\omega) + \tilde{u}_{oy}(\omega)) + \alpha_{4k} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) + \alpha_{5k} \tilde{\theta}_o(\omega)$$

yazılarak (2.41) nolu denklem $\{\tilde{q}(\omega)\} = [H(\omega)] \{\tilde{F}(\omega)\}$ bağıntısıyla tekrar düzenlendiğinde,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) + \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) + \{\alpha_3\} (\tilde{u}_{gy}(\omega) + \tilde{u}_{oy}(\omega)) \\ & + \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) + \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) + (K_{ppx}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) = 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

bulunur. Buradan da,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) - \omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) \\ & + (K_{ppx}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ & - \omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \\ & = \omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \end{aligned} \quad (2.43)$$

yazılarak (2.33) nolu hareket denklemi sadece temel yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilmiş olur. Bu denkleme (2.43) bağlı olarak, katsayılar matrisinin birinci satırına ait elemanlar ve sabitler matrisinin ilk elemanı sırasıyla ifade edildiğinde,

$$a_{11}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \quad (2.44a)$$

$$a_{12}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_1\} + K_{ppx} - \omega^2 m_T \quad (2.44b)$$

$$a_{13}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \quad (2.44c)$$

$$a_{14}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_2\} - \omega^2 b \quad (2.44d)$$

$$a_{15}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_4\} \quad (2.44e)$$

$$b_1(\omega) = \omega^2 \{a\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.44f)$$

bulunur. Burada karmaşık frekans davranış fonksiyonunu ifaden eden matris $[H(\omega)]$, köşegen bir matristir. Bu ifadelerde yer alan katkı çarpanları α_{jk} ($j=1,2,3,4,5$), $3N \times 1$ mertebeden vektörlerdir.

$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} H_1(\omega) & & 0 \\ & H_2(\omega) & \\ 0 & & H_{3N}(\omega) \end{bmatrix}_{3N \times 3N} \quad (2.44g)$$

Frekans bölgesinde y eksenini doğrultusundaki öteleme hareket denkleminde (2.34)

kat öteleme yerdeğiştirme bileşeni yerine (2.23) bağıntısından

$\{\tilde{u}_y(\omega)\} = [\phi^y]_{(N \times 3N)} \{\tilde{q}(\omega)\}_{(3N \times 1)}$ yararlanarak,

$$-\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] \{\tilde{q}(\omega)\} + (K_{ppy}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{oy}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) = \omega^2 m_T \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.44h)$$

yazılabilir. Buradan da,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) + \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) + \{\alpha_3\} (\tilde{u}_{gy}(\omega) + \tilde{u}_{oy}(\omega)) \\ & + \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) + \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) + (K_{ppy}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{oy}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \\ & = \omega^2 m_T \tilde{u}_{gy}(\omega) \end{aligned} \quad (2.45)$$

elde edilir. Böylece,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) - \omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) \\ & + (K_{ppy}(\omega) - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{oy}(\omega) - \omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ & - \omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) - \omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \\ & = \omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) + \omega^2 m_T \tilde{u}_{gy}(\omega) \end{aligned} \quad (2.46)$$

yazılarak, (2.34) nolu hareket denklemi sadece temel yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilmiş olur. Bu denkleme (2.46) bağlı olarak katsayılar matrisinin ikinci satırına ait elemanlar ve sabitler matrisinin ikinci elemanı sırasıyla ifade edildiğinde,

$$a_{21}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \quad (2.47a)$$

$$a_{22}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \quad (2.47b)$$

$$a_{23}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_3\} + K_{ppy} - \omega^2 m_T \quad (2.47c)$$

$$a_{24}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_2\} \quad (2.47d)$$

$$a_{25}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_4\} - \omega^2 b \quad (2.47e)$$

$$b_2(\omega) = (\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_3\} + \omega^2 m_T) \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.47f)$$

bulunur.

Frekans bölgesinde y eksenini etrafındaki dönme hareket denkleminde (2.35) kat öteleme yerdeğiştirme bileşeni yerine (2.23) bağıntısından

$$\{\tilde{u}_x(\omega)\} = [\phi^x]_{(N \times 3N)} \{\tilde{q}(\omega)\}_{(3N \times 1)} \text{ yararlanarak,}$$

$$-\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] \{\tilde{q}(\omega)\} + (K_{mmx}(\omega) - \omega^2 I_T) \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{u}_{ox}(\omega) = 0 \quad (2.48)$$

yazılabilir. Buradan da,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) - \omega^2 \{d\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{u}_{ox}(\omega) \\ & - \omega^2 \{d\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{oy}(\omega) + (K_{mmx}(\omega) - \omega^2 I_T) \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) \\ & - \omega^2 \{d\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{d\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \\ & = \omega^2 \{d\}^T [\phi^x] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \end{aligned} \quad (2.49)$$

yazılarak (2.35) nolu hareket denklemi sadece temel yerdeğiştirme bileşenlerine göre düzenlenmiş biçimi elde edilir. Bu denkleme (2.49) bağlı olarak katsayılar matrisinin

üçüncü satırına ait elemanlar ve sabitler matrisinin üçüncü elemanı sırasıyla ifade edildiğinde,

$$a_{31}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] H(\omega) \{\alpha_5\} \quad (2.50a)$$

$$a_{32}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] H(\omega) \{\alpha_1\} - \omega^2 b \quad (2.50b)$$

$$a_{33}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] H(\omega) \{\alpha_3\} \quad (2.50c)$$

$$a_{34}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] H(\omega) \{\alpha_2\} + K_{mmx}(\omega) - \omega^2 I_T \quad (2.50d)$$

$$a_{35}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^x] H(\omega) \{\alpha_4\} \quad (2.50e)$$

$$b_3(\omega) = \omega^2 \{d\}^T [\phi^x] H(\omega) \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.50f)$$

bulunur.

Frekans bölgesinde x eksenine etrafındaki dönme hareket denkleminde (2.37) kat öteleme yerdeğiştirme bileşeni yerine (2.23) bağıntısından

$$\{\tilde{u}_y(\omega)\} = [\phi^y]_{(N \times 3N)} \{\tilde{q}(\omega)\}_{(3N \times 1)} \text{ yararlanarak,}$$

$$-\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] \{\tilde{q}(\omega)\} + (K_{mmy}(\omega) - \omega^2 I_T) \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) - \omega^2 b \tilde{u}_{oy}(\omega) = \omega^2 b \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.51)$$

yazılabilir. Buradan da,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) - \omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 b \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ & - \omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_3\} \tilde{u}_{oy}(\omega) - \omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) \\ & - \omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) + (K_{mmy}(\omega) - \omega^2 I_T) \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \\ & = \omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) + \omega^2 b \tilde{u}_{gy}(\omega) \end{aligned} \quad (2.52)$$

yazılarak (2.37) nolu hareket denklemi sadece temel yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilmiş olur. Bu denkleme (2.52) bağlı olarak katsayılar matrisinin dördüncü satırına ait elemanlar ve sabitler matrisinin dördüncü elemanı sırasıyla ifade edildiğinde,

$$a_{41}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \quad (2.53a)$$

$$a_{42}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \quad (2.53b)$$

$$a_{43}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_3\} - \omega^2 b \quad (2.53c)$$

$$a_{44}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_2\} \quad (2.53d)$$

$$a_{45}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_4\} + K_{mmy}(\omega) - \omega^2 I_T \quad (2.53e)$$

$$b_4(\omega) = \omega^2 \{d\}^T [\phi^y] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) + \omega^2 b \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.53f)$$

bulunur.

Frekans bölgesinde kütle merkezinden geçen düşey eksen civarında yazılmış dönme hareket denkleminde (2.38) kat dönme yerdeğiştirme bileşeni yerine (2.23) bağıntısından $\{\tilde{u}_\theta(\omega)\} = [\phi^\theta]_{(N \times 3N)} \{\tilde{q}(\omega)\}_{(3N \times 1)}$ yararlanarak,

$$-\{c\}^T \omega^2 [\phi^\theta] \{\tilde{q}(\omega)\} + (K_{tt}(\omega) - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_o(\omega) = 0 \quad (2.54)$$

yazılabilir. Buradan da,

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] [H(\omega)] \{\alpha_5\} \tilde{\theta}_o(\omega) + (K_{tt}(\omega) - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_o(\omega) \\ & -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] [H(\omega)] \{\alpha_1\} \tilde{u}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ & -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] [H(\omega)] \{\alpha_2\} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) - \omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] [H(\omega)] \{\alpha_4\} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \\ & = \omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] [H(\omega)] \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \end{aligned} \quad (2.55)$$

yazılarak (2.38) nolu hareket denklemi sadece temel yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden ifade edilmiş olur. Bu denkleme (2.55) bağlı olarak katsayılar matrisinin beşinci satırına ait elemanlar ve sabitler matrisinin beşinci elemanı sırasıyla ifade edildiğinde,

$$a_{51}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_5\} + K_{tt}(\omega) - \omega^2 I_t \quad (2.56a)$$

$$a_{52}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_1\} \quad (2.56b)$$

$$a_{53}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_3\} \quad (2.56c)$$

$$a_{54}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_2\} \quad (2.56d)$$

$$a_{55}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_4\} \quad (2.56e)$$

$$b_5(\omega) = \omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.56f)$$

bulunur. Böylece bütün sistemin dinamik dengesi düşünülerek yazılmış olan hareket denklem takımı (2.16a-e) sadece temel yerdeğiştirme bileşenlerine bağlı olarak frekans alanında ifade edilmiş olur (2.57).

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & a_{12}(\omega) & a_{13}(\omega) & a_{14}(\omega) & a_{15}(\omega) \\ a_{21}(\omega) & a_{22}(\omega) & a_{23}(\omega) & a_{24}(\omega) & a_{25}(\omega) \\ a_{31}(\omega) & a_{32}(\omega) & a_{33}(\omega) & a_{34}(\omega) & a_{35}(\omega) \\ a_{41}(\omega) & a_{42}(\omega) & a_{43}(\omega) & a_{44}(\omega) & a_{45}(\omega) \\ a_{51}(\omega) & a_{52}(\omega) & a_{53}(\omega) & a_{54}(\omega) & a_{55}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\theta}_0(\omega) \\ \tilde{u}_{ox}(\omega) \\ \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1(\omega) \\ b_2(\omega) \\ b_3(\omega) \\ b_4(\omega) \\ b_5(\omega) \end{Bmatrix} \quad (2.57)$$

İlk aşamada katsayılar ve sabitler matrisine ait elemanların sayısal değerleri dış yükün frekansına bağlı olarak hesaplanır. Daha sonra yukarıdaki denklem sistemi sayısal olarak çözülerek temel yerdeğiştirme bileşenlerinin frekans alanındaki değerleri bulunur. Temel yerdeğiştirme bileşenlerinin zaman bölgesindeki çözümü ters Fourier dönüşümü yapılarak elde edilir. Benzer şekilde yapı- temel ortak sistemi, tek yönde (y yönünde simetrik değil) burulmalı bağlaşıklık yapılar için ele alındığında, bütün sistemin dengesi frekans tanım alanında (2.57) eşitliğinden bağımsız olarak düzenlendiğinde, temel yerdeğiştirmeleri cinsinden,

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & a_{12}(\omega) & a_{13}(\omega) \\ a_{21}(\omega) & a_{22}(\omega) & a_{23}(\omega) \\ a_{31}(\omega) & a_{32}(\omega) & a_{33}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\theta}_0(\omega) \\ \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1(\omega) \\ b_2(\omega) \\ b_3(\omega) \end{Bmatrix} \quad (2.58)$$

ifade edilebilir. Burada indirgenmiş ve küçültülmüş katsayılar matrisi ve sabitler vektörlerine ait elemanlar aşağıdaki bağıntılarla özetlenebilir:

$$a_{11}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_5\} \quad (2.59a)$$

$$a_{12}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_3\} + K_{ppy} - \omega^2 m_T \quad (2.59b)$$

$$a_{13}(\omega) = -\omega^2 \{a\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_4\} - \omega^2 b \quad (2.59c)$$

$$a_{21}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_5\} \quad (2.59d)$$

$$a_{22}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_3\} - \omega^2 b \quad (2.59e)$$

$$a_{23}(\omega) = -\omega^2 \{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_4\} + K_{mmy}(\omega) - \omega^2 I_T \quad (2.59f)$$

$$a_{31}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_5\} + K_{tt}(\omega) - \omega^2 I_t \quad (2.59g)$$

$$a_{32}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_3\} \quad (2.59h)$$

$$a_{33}(\omega) = -\omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_4\} \quad (2.59i)$$

$$b_1(\omega) = (\{a\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_3\} + m_T) \omega^2 \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.59j)$$

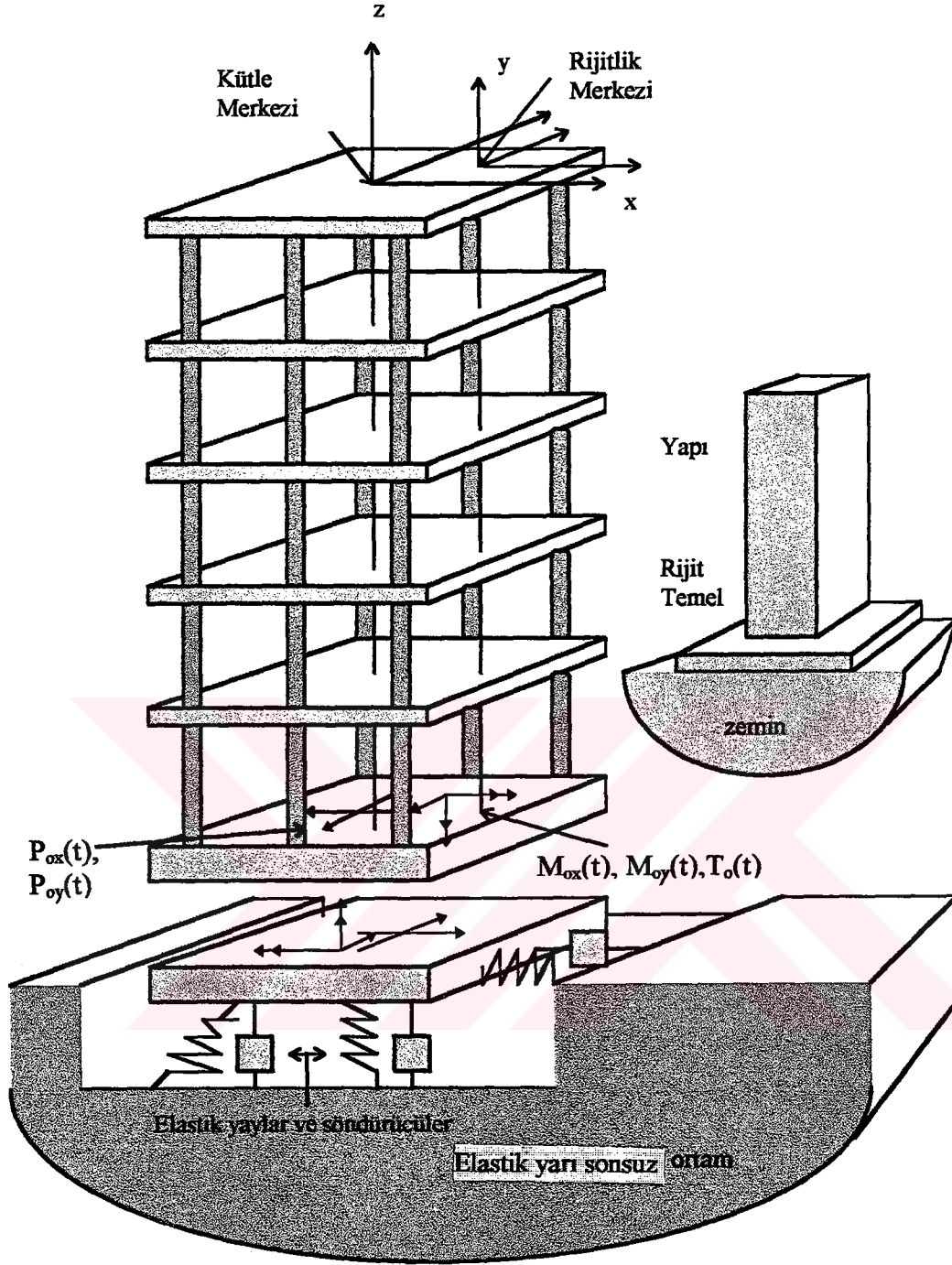
$$b_2(\omega) = (\{d\}^T [\phi^y] H(\omega) \{\alpha_3\} + b) \omega^2 \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.59k)$$

$$b_3(\omega) = \omega^2 \{c\}^T [\phi^\theta] H(\omega) \{\alpha_3\} \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.59l)$$

Üst yapı sisteminin hareket denklemindeki kuvvet ifadesinde yer alan α_{3k} , α_{4k} ve α_{5k} , k. moda ait katsayıları göstermektedir ve aşağıda verilmiştir:

$$\alpha_{3k} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ik}^y}{M_k} \quad \alpha_{4k} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i h_i \phi_{ik}^y}{M_k}, \quad \alpha_{5k} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ik}^\theta}{M_k} \quad (2.60)$$

$$M_k = \{\phi_k^y\}^T [m_y] \{\phi_k^y\} + \{\phi_k^\theta\}^T [m_\theta] \{\phi_k^\theta\}$$



Şekil 2.6 Planda simetrik olmayan çok katlı yapı-temel-zemin ortak sisteminin üç boyutlu matematik modeli

Yukarıdaki şekilde (Şekil 2.6), planda simetrik olmayan çok katlı yapıların elastik zeminle dinamik etkileşim problemi için, geliştirilen çözüm yönteminde kullanılan üç boyutlu matematik model verilmiştir.

2.5 TEMEL TRANSFER FONKSİYONLARININ ELDE EDİLİŞİ

Planda simetrik olmayan çok katlı yapıların zeminle dinamik etkileşimini inceleyen problemin çözümü matris formunda temel yerdeğiştirme bileşenlerine göre (2.57-2.58) bağıntılarında ifade edilmişti. Daha basit bir çözüm elde etmek için sadece tek yönde simetriklik özelliği göstermeyen çok katlı yapıya ait denklem takımının (2.58) çözümü açık olarak gösterilmeye çalışılacaktır.

$$\tilde{u}_{oy}(\omega) = \frac{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{23}b_1 - a_{13}b_2) - (a_{23}a_{12} - a_{13}a_{22})(a_{33}b_2 - a_{23}b_3)}{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{23}a_{11} - a_{13}a_{21}) - (a_{23}a_{12} - a_{13}a_{22})(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})} \quad (2.61)$$

Bu eşitlikte frekansa bağlı b_1, b_2, b_3 katsayıları yerine (2.59j-l) nolu ifadeler,

$$b_1 = \bar{b}_1 \tilde{u}_{gy}, b_2 = \bar{b}_2 \tilde{u}_{gy}, b_3 = \bar{b}_3 \tilde{u}_{gy} \quad (2.62)$$

şeklinde düzenlenerek yazılırsa,

$$\tilde{u}_{oy}(\omega) = \frac{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{23}\bar{b}_1 - a_{13}\bar{b}_2) - (a_{23}a_{12} - a_{13}a_{22})(a_{33}\bar{b}_2 - a_{23}\bar{b}_3)}{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{23}a_{11} - a_{13}a_{21}) - (a_{23}a_{12} - a_{13}a_{22})(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})} \tilde{u}_{gy} \quad (2.63)$$

elde edilir. Buradan da temel öteleme transfer fonksiyonu,

$$R_{oy}(\omega) = \frac{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{23}\bar{b}_1 - a_{13}\bar{b}_2) - (a_{23}a_{12} - a_{13}a_{22})(a_{33}\bar{b}_2 - a_{23}\bar{b}_3)}{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})(a_{23}a_{11} - a_{13}a_{21}) - (a_{23}a_{12} - a_{13}a_{22})(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})} \quad (2.64)$$

şeklinde yazılabilir. Aynı denklem takımından,

$$\tilde{\gamma}_{oy}(\omega) = \frac{(a_{33}b_2 - a_{23}b_3) - (a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})\tilde{u}_{oy}(\omega)}{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})} \quad (2.65)$$

elde edilir. Bu eşitlikte frekansa bağlı b_1, b_2, b_3 katsayıları yerine (2.59j-l) nolu ifadeler (2.62) gibi düzenlenerek yazılırsa,

$$\tilde{\gamma}_{oy}(\omega) = \frac{(a_{33}\bar{b}_2 - a_{23}\bar{b}_3) - (a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})R_{oy}(\omega)}{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})} \hat{u}_{gy}(\omega) \quad (2.66)$$

elde edilir. Buradan da temel eğilme transfer fonksiyonu,

$$R_{\gamma oy}(\omega) = \frac{(a_{33}\bar{b}_2 - a_{23}\bar{b}_3) - (a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31})R_{oy}(\omega)}{(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})} \quad (2.67)$$

şeklinde yazılabilir. Aynı denklem takımından,

$$\tilde{\theta}_o(\omega) = \frac{b_3 - a_{31}\tilde{u}_{oy}(\omega) - a_{32}\tilde{\gamma}_{oy}(\omega)}{a_{33}} \quad (2.68)$$

elde edilir. Bu eşitlikte frekansa bağlı b_1 , b_2 , b_3 katsayıları yerine (2.59j-1) nolu ifadeler (2.62) gibi düzenlenerek yazılırsa,

$$\tilde{\theta}_o(\omega) = \frac{\bar{b}_3 - a_{31}R_{oy}(\omega) - a_{32}R_{\gamma oy}(\omega)}{a_{33}} \tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.69)$$

elde edilir. Buradan da temel burulma transfer fonksiyonu,

$$R_{\theta o}(\omega) = \frac{\bar{b}_3 - a_{31}R_{oy}(\omega) - a_{32}R_{\gamma oy}(\omega)}{a_{33}} \quad (2.70)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece temel yerdeğiştirme bileşenleri, yer hareketine bağlı olarak transfer fonksiyonları cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$\tilde{u}_{oy}(\omega) = R_{oy}(\omega)\tilde{u}_{gy}(\omega)$$

$$\tilde{\gamma}_{oy}(\omega) = R_{\gamma oy}(\omega)\tilde{u}_{gy}(\omega) \quad (2.71)$$

$$\tilde{\theta}_o(\omega) = R_{\theta o}(\omega)\tilde{u}_{gy}(\omega)$$

2.6 ETKİLEŞİM PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN ANALİTİK YÖNTEMİN ÖZETİ

Zemin-yapı etkileşiminin gözönüne alınmadığı durumlarda, çok serbestlik dereceli bir sistemin zorlanmış titreşimine ait hareket denklemi, rijit zemine mesnetlenmiş sistemin modlarının dikliği kullanılarak ayrık duruma getirilebilir:

$$\ddot{q}_k(t) + 2\xi_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\frac{\{\phi_k\}^T [M] \{1\} \ddot{u}_g(t)}{M_k} = -F_k(t) \quad (2.5)$$

Zeminin yapı üzerindeki etkilerini de dikkate alarak yukarıdaki diferansiyel denklemin sağ tarafı tekrar düzenlendiğinde, sönümsüz sistemler için

$$\ddot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\left(\{\phi_k^x\}^T [m_x] \{1\} \ddot{u}_{ox}(t) + \{\phi_k^x\}^T [m_x] \{h\} \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \{\phi_k^y\}^T [m_y] \{1\} (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t)) + \{\phi_k^y\}^T [m_y] \{h\} \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \{\phi_k^\theta\}^T [m_\theta] \{1\} \ddot{\theta}_o(t)\right) \frac{1}{M_k} = F_k(t) \quad (2.12a)$$

ifadesi elde edilir. Burada dış yük ,

$$F_k(t) = \alpha_{1k} \ddot{u}_{ox}(t) + \alpha_{2k} \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \alpha_{3k} (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t)) + \alpha_{4k} \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \alpha_{5k} \ddot{\theta}_o(t) \quad (2.12b)$$

şeklinde yazılabilir. Kuvvet ifadesinde yer alan α_{1k} , α_{2k} , α_{3k} , α_{4k} ve α_{5k} , k. moda ait katsayıları göstermektedir ve (2.13-2.14) nolu bağıntılarda verilmiştir. Temelin şekil değiştirebilir durumunun da hesaba katıldığı hareket denkleminde, eşitliğin her iki tarafının Fourier dönüşümü alındığında, $\tilde{q}_k(\omega) = H_k(\omega) \tilde{F}_k(\omega)$ ve

$$\tilde{F}_k(\omega) = \alpha_{1k} \tilde{u}_{ox}(\omega) + \alpha_{2k} \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) + \alpha_{3k} (\tilde{u}_{gy}(\omega) + \tilde{u}_{oy}(\omega)) + \alpha_{4k} \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) + \alpha_{5k} \tilde{\theta}_o(\omega)$$

yazılabilir. Problemin çözümünün tamamlanabilmesi için beş denge denkleminde daha ihtiyaç vardır. Bu denklemler bütün sistemin dengesini düşünerek elde edilebilir.

$$m_o \ddot{u}_{ox}(t) + \sum_{i=1}^N m_i (\ddot{u}_{ox}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \ddot{u}_{xi}(t)) + P_{ox}(t) = 0 \quad (2.16a)$$

$$m_o(\ddot{u}_{oy}(t) + \ddot{u}_{gy}(t)) + \sum_{i=1}^N m_i (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \ddot{u}_{yi}(t)) + P_{oy}(t) = 0 \quad (2.16b)$$

$$I_{tx} \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \sum_{i=1}^N m_i h_i (\ddot{u}_{ox}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \ddot{u}_{xi}(t)) + M_{ox}(t) = 0 \quad (2.16c)$$

$$I_{ty} \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \sum_{i=1}^N m_i h_i (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h_i \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \ddot{u}_{yi}(t)) + M_{oy}(t) = 0 \quad (2.16d)$$

$$m_o r_o^2 \ddot{\theta}_o(t) + \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 (\ddot{\theta}_o(t) + \ddot{u}_{\theta i}(t)) + T_o(t) = 0 \quad (2.16e)$$

Bu denklem takımında (2.16a-e), kat ve temel yerdeğiştirme bileşenlerinin,

$$\{u_x(t)\} = \{\tilde{u}_x\} e^{i\omega t}, \{u_y(t)\} = \{\tilde{u}_y\} e^{i\omega t}, \{u_\theta(t)\} = \{\tilde{u}_\theta\} e^{i\omega t}, u_{ox}(t) = \tilde{u}_{ox} e^{i\omega t},$$

$$u_{oy}(t) = \tilde{u}_{oy} e^{i\omega t}, \gamma_{ox}(t) = \tilde{\gamma}_{ox} e^{i\omega t}, \gamma_{oy}(t) = \tilde{\gamma}_{oy} e^{i\omega t}, \theta_o(t) = \tilde{\theta}_o e^{i\omega t} \quad (2.31a-h)$$

frekansa bağlı ifadeleri yazılır. Etkileşim kuvvetleri yerine frekansa bağlı (2.29) nolu bağıntı yerleştirildikten sonra da

$$\begin{Bmatrix} \tilde{P}_{ox} \\ \tilde{P}_{oy} \\ \tilde{M}_{ox} \\ \tilde{M}_{oy} \\ \tilde{T}_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ppx}(\omega) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{ppy}(\omega) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{mmx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{mmy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{tt}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ox} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\theta}_o \end{Bmatrix} \quad (2.29)$$

kat öteleme yerdeğiştirme bileşenleri yerine ,

$$\{\tilde{U}(\omega)\} = \begin{Bmatrix} \{\tilde{u}_x(\omega)\} \\ \{\tilde{u}_y(\omega)\} \\ \{\tilde{u}_\theta(\omega)\} \end{Bmatrix} = [\phi] \{\tilde{q}(\omega)\} \quad (2.23)$$

ifadeleri yazılır. Böylece bütün sistemin dengesi düşünülerek yazılmış olan hareket denklem takımı(2.16a-e) sadece temel yerdeğiştirme bileşenlerine bağlı olarak frekans alanında ifade edilmiş olur (2.57).

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & a_{12}(\omega) & a_{13}(\omega) & a_{14}(\omega) & a_{15}(\omega) \\ a_{21}(\omega) & a_{22}(\omega) & a_{23}(\omega) & a_{24}(\omega) & a_{25}(\omega) \\ a_{31}(\omega) & a_{32}(\omega) & a_{33}(\omega) & a_{34}(\omega) & a_{35}(\omega) \\ a_{41}(\omega) & a_{42}(\omega) & a_{43}(\omega) & a_{44}(\omega) & a_{45}(\omega) \\ a_{51}(\omega) & a_{52}(\omega) & a_{53}(\omega) & a_{54}(\omega) & a_{55}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\theta}_o(\omega) \\ \tilde{u}_{ox}(\omega) \\ \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1(\omega) \\ b_2(\omega) \\ b_3(\omega) \\ b_4(\omega) \\ b_5(\omega) \end{Bmatrix} \quad (2.57)$$

2.7 GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR PROGRAMININ AMACI, YAPISI VE KAPSAMI

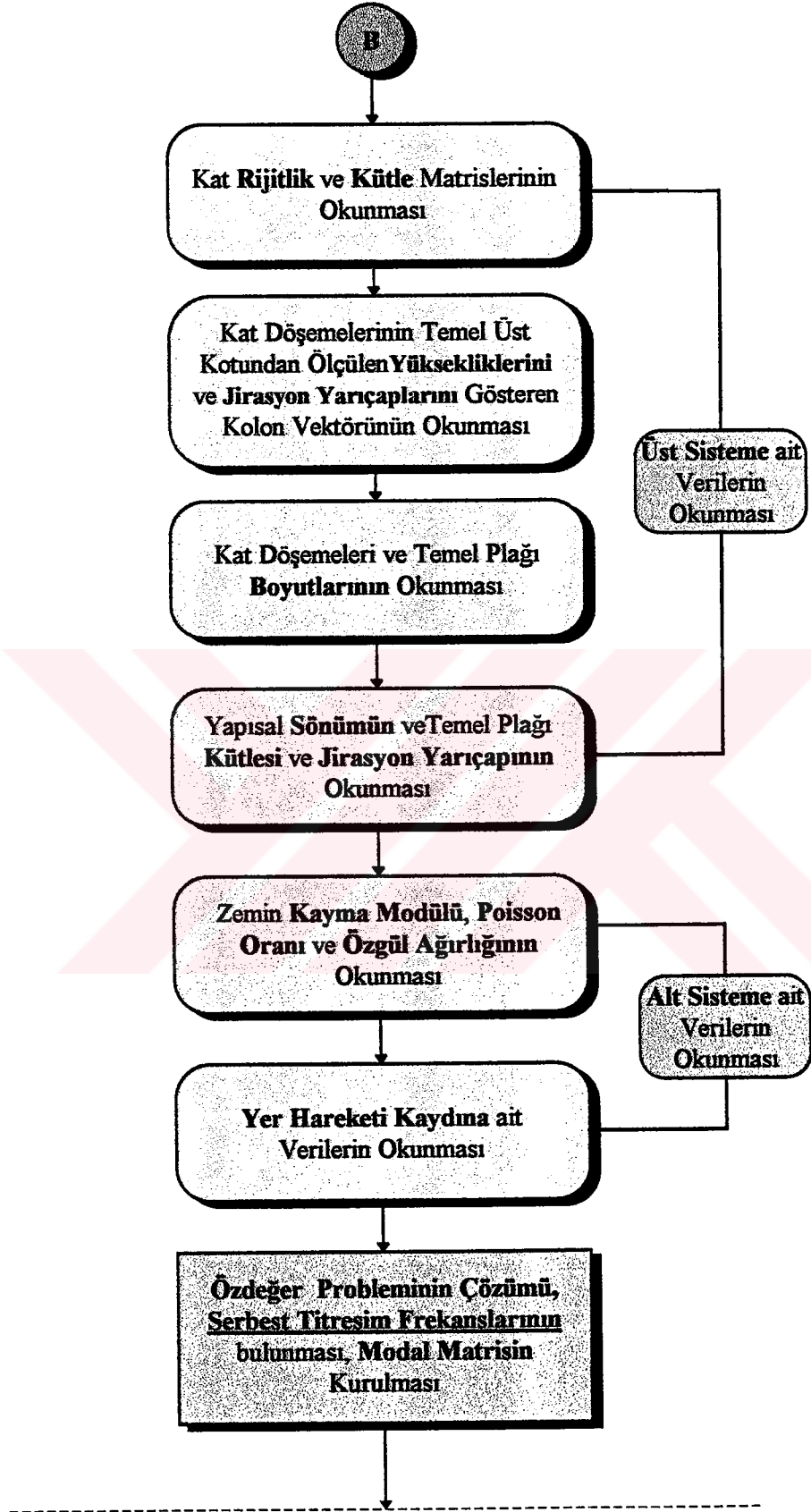
Çok katlı planda simetrik olmayan yapıların, verilen bir dış yük altında zeminle dinamik etkileşimi probleminin analitik çözümü bundan önceki bölümde elde edilmişti. MATLAB programlama dilinde geliştirilen bilgisayar programının amacı, çok katlı planda simetrik olmayan yapı-zemin sistemlerinin , frekansa bağlı empedans katsayılarını ve normal mod yaklaşımını uygun biçimde kullanarak programlama tekniği açısından geçerli, işlem hacmi fazla olmayan, belleği ekonomik olarak kullanan basitleştirilmiş bir çözüm metodu ortaya koymaktır [54]. Geliştirilen bilgisayar programına ait akış diyagramı ana hatları ile Şekil 2.7 de verilmiştir.

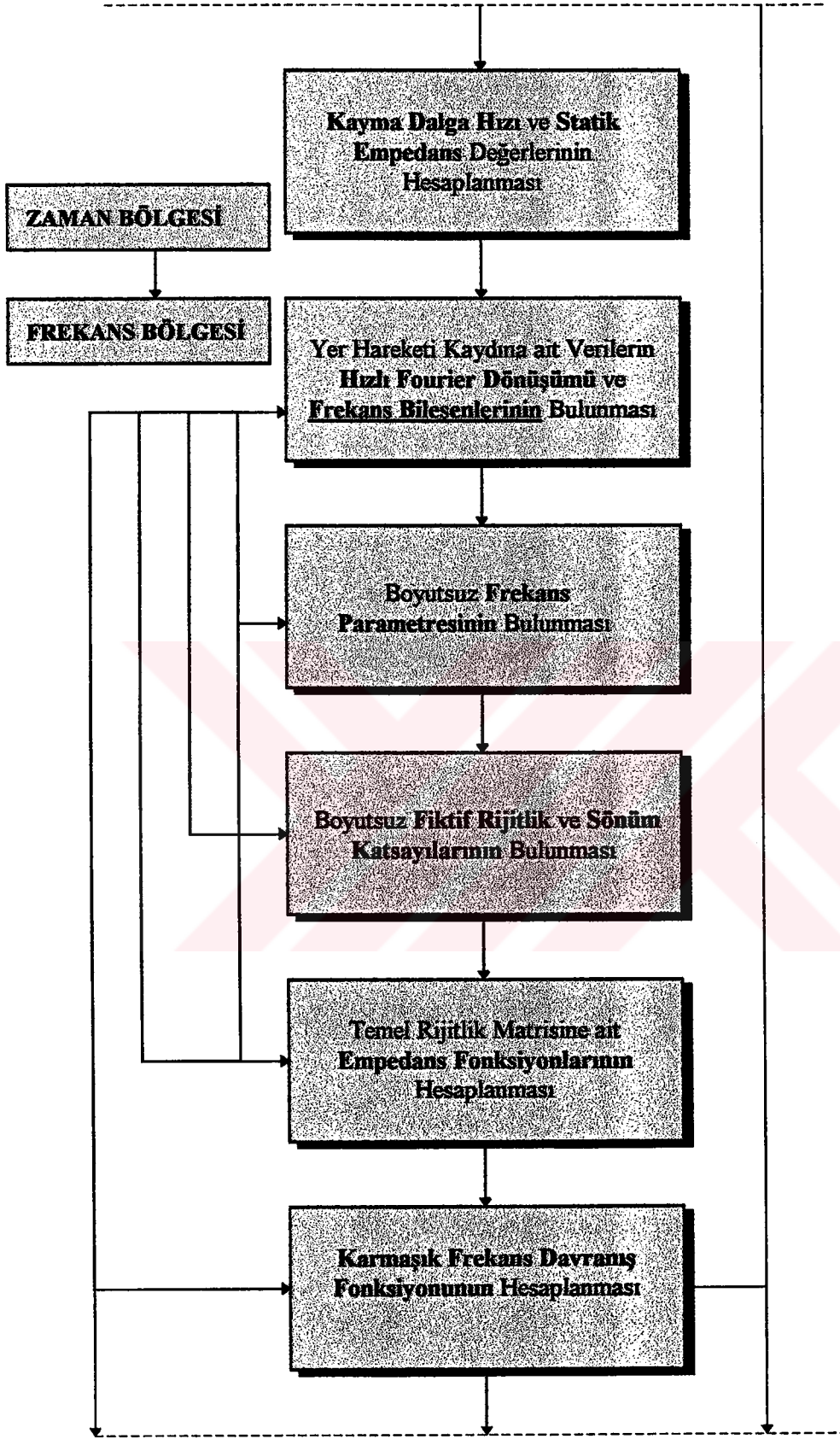
2.7.1 Giriş Bilgileri

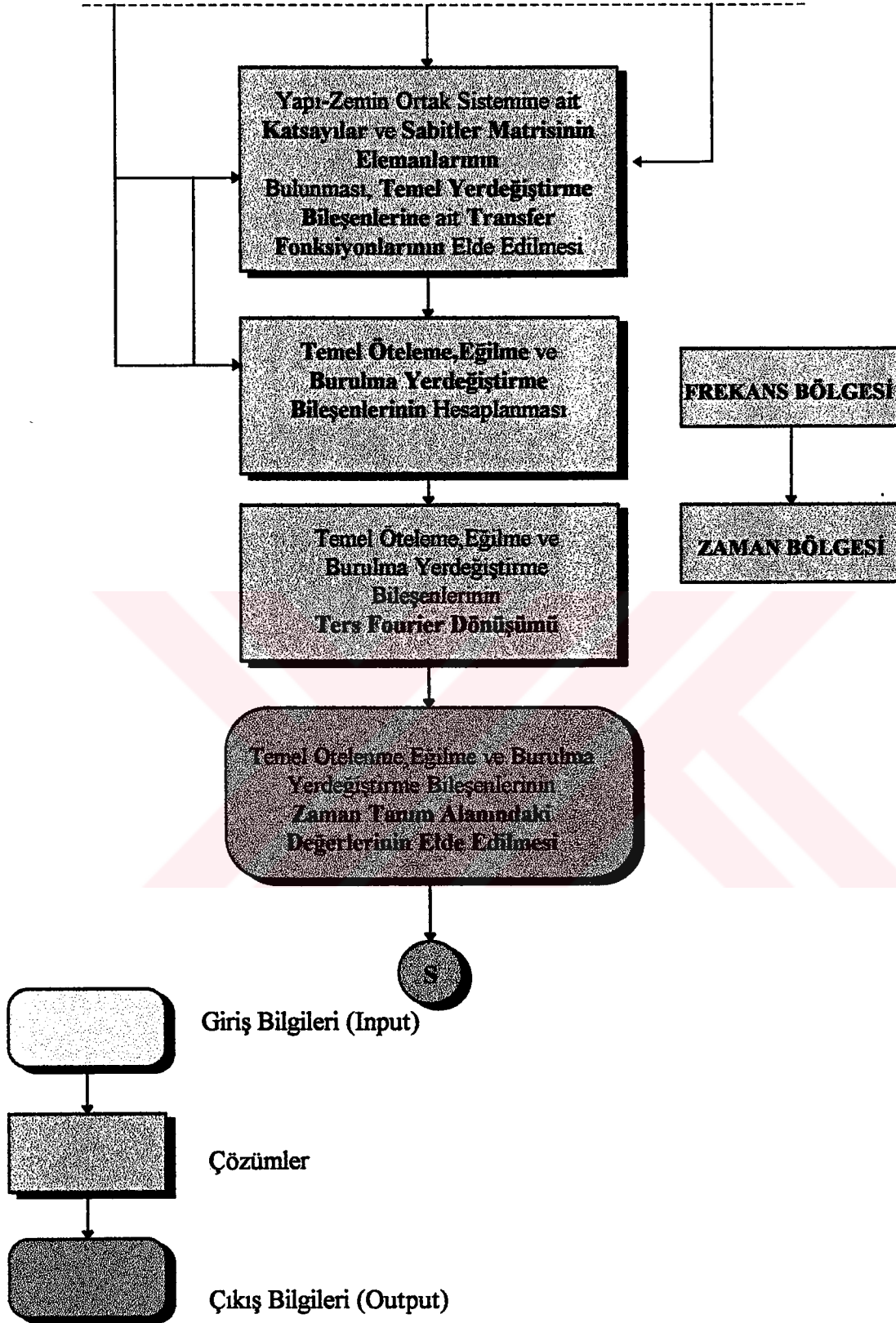
Giriş bilgileri, üst sisteme yani yapı ve temele ait verilerden ve alt sisteme yani zemine ait verilerden meydana gelmektedir. Üst sisteme ait bilgiler, çerçevelere ait rijitlikleri , kat döşemelerinin ve temel plağının boyutlarını, eylemsizlik yarıçapları ve kütlelerini, kat yükseklikleri ile yapısal sönüme ait değerleri kapsar. Alt sisteme ait bilgiler ise elastik zeminin kayma modülünü, Poisson oranını ve kütleli yoğunluğunu içerir. Ayrıca yer hareketine ait verilerin okunması da giriş bilgilerinin bir parçasını oluşturmaktadır. Fourier dönüşümünün hızlı gerçekleştirilebilmesi için, yer hareketine ait veri dosyalarındaki veri sayısı, 2 nin kuvveti olacak şekilde düzenlenmiştir.

2.7.2 Çıkış Bilgileri

Çıkış bilgileri, temel ortamının şekil değiştirebilir özelliğinden dolayı temel plağına ait yerdeğiştirme bileşenlerinin (yanal ötelenme miktarı, eğilme ve burulma dönme açıları) zaman tanım alanındaki değerleridir. Ayrıca sayısal uygulamalardan elde edilen sonuçlar mutlak değer cinsinden ifade edilmiştir.







Şekil 2.7 Bilgisayar programının akış diyagramının ana hatlarıyla gösterimi

Şekil 3.1 Planda simetrik olmayan tek katlı yapı-temel modeli

Düşük bellek kapasiteli bilgisayarlarla bile büyük ve karmaşık bu tip problemlerin çözümüne ve ilgili programlama tekniklerinin etkin olarak kullanımına olanak sağlayacak şekilde bir bilgisayar algoritması geliştirilmiştir.

Önerilen yöntemin etkinliğini ve yeterliliğini gösterebilmek için planda simetrik olmayan tek katlı bir yapı için, elastik zeminin yapısal davranış üzerindeki etkilerini de hesaba katan doğrudan çözüm yaklaşımını elde etmek gerekir. Bu yaklaşımla, ileride çok katlı bir yapının özel hali olan tek katlı yapının mod yaklaşımı ile sayısal çözümleri karşılaştırılacaktır ve sonuçların doğrulukları literatürdeki örneklerle irdelenecektir.

3.2 YAPILAN VARSAYIMLAR

a) Bu çalışmada kullanılan üstyapı-zemin ortak sistemi, şekil değiştirebilir zemin ile bunun üzerine oturan rijit plağa mesnetli, planda simetrik olmayan tek katlı bir yapıdan meydana gelmektedir(Şekil 3.1).

b) Bu çözümde zemin homogen, izotrop, lineer elastik olarak ele alınmıştır.

c) Çerçeve tipi elemanlar, sistem iki doğrultuda simetriklik özelliği göstermeyecek şekilde döşeme asal eksenlerine paralel olarak düzenlenmiştir.

d) Çerçevelerin rijitlik dağılımları simetri özelliği göstermediğinden dolayı kütle ile rijitlik merkezleri arasındaki dış merkezlik e olarak tanımlanmıştır.

e) Planda dikdörtgen olarak ele alınan ve boyutları b ve d (yer hareketinin etkili olduğu doğrultu) ile gösterilen döşeme plağının, kendi düzlemi içerisinde sonsuz rijit olduğu ve kütlesi olmayan, eksenleri doğrultusunda uzayıp kısalmayan kolonlar üzerinde oturduğu varsayılmaktadır.

f) Çözümde, çerçeve tipi elemanlar, kayma çerçevesi olarak ele alınmıştır.

g)Yapı kütlelerinin planda düzgün dağıldığı, kat seviyelerinde toplandığı varsayılmıştır. Bundan dolayı kütle merkezi (CM), kat döşemesinin geometrik merkezi üzerine düşmektedir.

3.3 HAREKET DENKLEMLERİ

Yukarıda belirtilen kabuller altında üstyapı, üç serbestlik dereceli, planda iki doğrultuda burulmalı bağlaşıklık sistem haline getirilmiştir. Burada kat döşemesinin kütle merkezinin x ve y eksenleri yönündeki öteleme yer değiştirmeleri sırasıyla u_x , u_y ve düşey eksen etrafındaki dönme yer değiştirmesi u_θ olarak tanımlanmıştır.

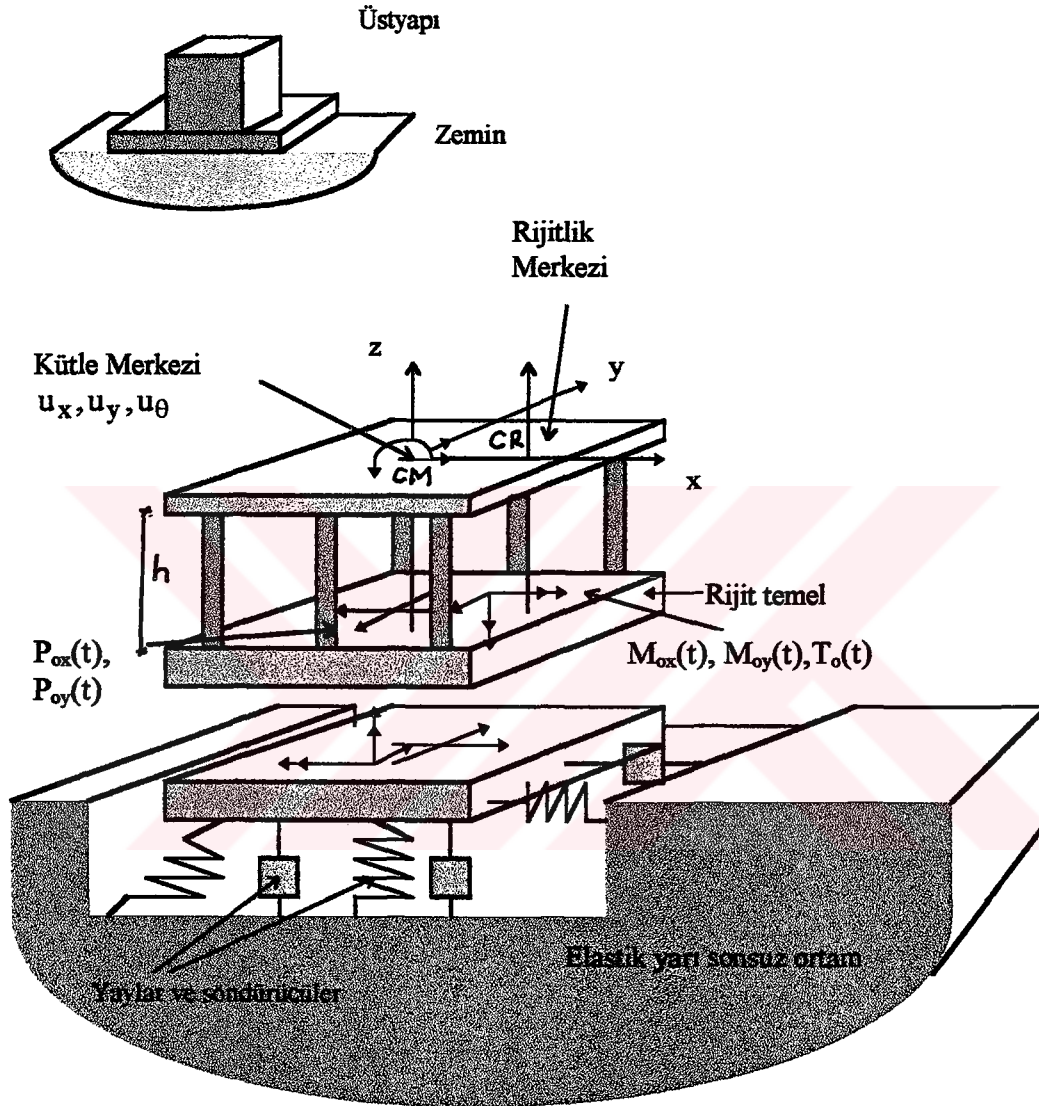
Bununla birlikte temel ortamının şekil değiştirebilir özelliğinden dolayı, yapı sistemi ek olarak beş serbestlik derecesine daha sahip olur. Bunlar da sırasıyla temelin x ve y eksenleri doğrultularındaki öteleme yer değiştirmeleri (u_{ox} ve u_{oy}), temelin eğilme dönmeleri (γ_{ox} ve γ_{oy}) ve burulma dönmesidir (θ_o). Böylece bütün sistem, 8 yerdeğiştirme bileşeni ile tanımlanabilir. Eğilme dönmeleri, dönme eksenine dik eksenin adıyla adlandırılmıştır.

Bu yaklaşımda üstyapı ve zemin, iki ayrı sistem olarak ele alınır ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan denge denklemleri, daha sonra üstyapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Bu durumda zemin ortamı sadece üstyapı-zemin arakesitinde bir alt sistem olarak idealleştirilir.

Üstyapı ve zeminin dinamik denge denklemleri, her iki sistemi birbirine bağlayan etkileşim kuvvetleri de gözönünde tutularak ifade edilebilir (Şekil 3.2).

Bu gösterimde, yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini; sönümleyiciler ise enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen eşdeğer (fiktif) zemin sönümünü (radyasyon sönümü, geometrik sönüm) açıklamaktadır. Zeminin katkısını ifade eden bu eşdeğer elemanların özellikleri, temel ve elastik yarı sonsuz ortamın karakteristiklerine ve titreşim hareketinin frekanslarına bağlıdır.

Temel tabanı ile elastik zemin yüzeyi arasındaki etkileşim kuvvetleri, elastik ortam üzerindeki kütleli rijit dairesel plağın harmonik yükler altında titreştirilmesi sonucu elastodinamiğin bir karışık sınır değeri probleminin çözümünden elde edilmiştir.



Şekil 3.2 Planda simetrik olmayan tek katlı yapı-temel-zemin ortak sisteminin üç boyutlu matematik modeli

Kütle merkezi (CM) etrafında kat döşemesinin dinamik dengesi düşünülerek asimetrik üstyapının hareket denklemleri, temelin şekil değiştirebilir özelliğini de hesaba katarak

çok katlı yapılarınkine benzer bir şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x(t) \\ \ddot{u}_y(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} C_{xB} + C_{xC} & 0 & (d/2)(C_{xB} - C_{xC}) \\ 0 & C_{yA} & eC_{yA} \\ (d/2)(C_{xB} - C_{xC}) & eC_{yA} & e^2C_{yA} + (d^2/4)(C_{xB} + C_{xC}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_x(t) \\ \dot{u}_y(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} K_{xB} + K_{xC} & 0 & (d/2)(K_{xB} - K_{xC}) \\ 0 & K_{yA} & eK_{yA} \\ (d/2)(K_{xB} - K_{xC}) & eK_{yA} & e^2K_{yA} + (d^2/4)(K_{xB} + K_{xC}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x(t) \\ u_y(t) \\ u_\theta(t) \end{Bmatrix} \\
 & = - \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{ox}(t) + h\ddot{\gamma}_{ox}(t) \\ \ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h\ddot{\gamma}_{oy}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Sistemin hareket denkleminde yapısal sönüm tek katlı yapı örneklendiğinden doğrudan doğruya dikkate alınmıştır.

Kat döşemesinin kütlesi m , dönme atalet momenti I olarak gösterilmiştir. Sisteme ait rijitlik matrisi daha önceki bölümde çok katlı yapılarda elde edilmiş olan rijitlik matrisi gibidir. Benzer şekilde sönüm matrisi elde edilmiştir.

Problemin çözümünün tamamlanabilmesi için daha beş denge denklemine ihtiyaç vardır. Bu denklemler bütün sistemin dengesini üstyapı temel tabanı ile elastik yarı sonsuz ortam yüzeyinde geliştirilen etkileşim kuvvetleri ve momentlerine bağlı olarak yazılabilir. Bunlar,

$$m_o \ddot{u}_{ox}(t) + m (\ddot{u}_{ox}(t) + h \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \ddot{u}_x(t)) + P_{ox}(t) = 0 \quad (3.2a)$$

$$m_o (\ddot{u}_{oy}(t) + \ddot{u}_{gy}(t)) + m (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \ddot{u}_y(t)) + P_{oy}(t) = 0 \quad (3.2b)$$

$$I_{tx} \ddot{\gamma}_{ox}(t) + m h (\ddot{u}_{ox}(t) + h \ddot{\gamma}_{ox}(t) + \ddot{u}_x(t)) + M_{ox}(t) = 0 \quad (3.2c)$$

$$I_{ty} \ddot{\gamma}_{oy}(t) + m h (\ddot{u}_{gy}(t) + \ddot{u}_{oy}(t) + h \ddot{\gamma}_{oy}(t) + \ddot{u}_y(t)) + M_{oy}(t) = 0 \quad (3.2d)$$

$$m_o r_o^2 \ddot{\theta}_o(t) + m r^2 (\ddot{\theta}_o(t) + \ddot{u}_\theta(t)) + T_o(t) = 0 \quad (3.2e)$$

olup burada m_o ve r_o sırasıyla temel plağının kütlesi ve eylemsizlik yarıçapıdır. I_{tx} ve I_{ty} ise döşemenin ve temel plağının ilgili eksenlerine göre kütlelesel atalet momentlerin toplamalarını gösterir. $P_{ox}(t)$, $P_{oy}(t)$, $M_{ox}(t)$, $M_{oy}(t)$ ise sırasıyla yatay zemin-yapı etkileşim kuvvetleri ve ilgili eksenler etrafındaki etkileşim momentlerini ifade eder. $T_o(t)$ z eksen etrafındaki etkileşim momentidir. Bütün bu etkileşim kuvvetleri ve momentleri, daha sonra temel yerdeğiştirmelerine bağlı olarak ifade edilecektir.

3.4 HAREKET DENKLEMLERİNİN FREKANS BÖLGESİNDE ÇÖZÜMÜ

Dinamik çözüm için frekans tanım alanının tercih edilmesinin temel nedeni, radyasyon nedeni ile zemin ortamında kaybolan enerjiyi tanımlamak için eşdeğer anlamda kullanılan radyasyon sönümü ya da geometrik sönümün, çözümün zaman tanım alanında yapılması durumunda, zamana bağlı olarak ifade edilebilmesindeki işlemsel güçlüklerdir. Bu durumun oluşturduğu matematiksel güçlükler nedeni ile, yapı-zemin etkileşimi analizinin frekans tanım alanında yapılması uygun olmaktadır.

Şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğunda dinamik zemin-yapı etkileşim kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri titreşim hareketinin frekansına bağlı olarak ifade edilmiştir [14-18]. Bu nedenle bu problem için yazılan bütün hareket denklemlerini frekans bölgesinde incelemek gerekir. Frekans bölgesinde araştırma, yapı-temel sistemine ait hareket denklemlerinin Fourier dönüşümünün alınmasını gerektirir.

Zemin bölgesi yerine zeminin şekil değiştirebilme özelliğini ve enerji kaybını temsil eden yaylar ve sönümleyicilerin yerleştirilmesi zemin-yapı sistemlerinin dinamik

analizinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Elastik yarı sonsuz ortam için empedans fonksiyonlarına ait değerler farklı Poisson oranları için boyutsuz titreşim frekansına (a_0) bağlı olarak Veletsos ve Wei tarafından elde edilmiştir [37]. Burada da çok katlı yapıların dinamik analizinde olduğu gibi bu katsayılardan yararlanılmıştır. Dinamik rijitlik matrisinde köşegen terimlerinin dışındaki terimlerin ihmal edilmesinde oluşacak hatanın küçük olduğu varsayılarak kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi,

$$\begin{Bmatrix} \tilde{P}_{ox} \\ \tilde{P}_{oy} \\ \tilde{M}_{ox} \\ \tilde{M}_{oy} \\ \tilde{T}_o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ppx}(\omega) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{ppy}(\omega) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{mmx}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{mmy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{tt}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_{ox} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\theta}_o \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

yazılabilir. $\tilde{P}_{ox}, \tilde{P}_{oy}, \tilde{M}_{ox}, \tilde{M}_{oy}, \tilde{T}_o, \tilde{u}_{ox}, \tilde{u}_{oy}, \tilde{u}_{gy}, \tilde{\gamma}_{ox}, \tilde{\gamma}_{oy}$ ve $\tilde{\theta}_o$ sırasıyla $P_x, P_y, M_x, M_y, T, u_{ox}, u_{oy}, u_{gy}, \gamma_{ox}, \gamma_{oy}, \theta_o$ 'ın Fourier genlikleridir.

Katlara ve bütün sisteme ait hareket denge denklemlerinin (3.1-3.2a-e) Fourier dönüşümü, $K_{xc}=aK_{xB}$, $K_{xB}=K_x$; $C_{xc}=bC_{xB}$, $C_{xB}=C_x$ (a ve b pozitif sayı) ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri de gözönüne alınarak yazıldığında,

$$[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]\tilde{u}_x + [i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}]\tilde{u}_\theta$$

$$-\omega^2 m\tilde{u}_{ox} - \omega^2 m h\tilde{\gamma}_{ox} = 0 \quad (3.4a)$$

$$[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]\tilde{u}_y + [i\omega e C_y + e K_y]\tilde{u}_\theta - \omega^2 m\tilde{u}_{oy} - \omega^2 m h\tilde{\gamma}_{oy} = 0 \quad (3.4b)$$

$$[i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}]\tilde{u}_x + [i\omega e C_y + K_y e]\tilde{u}_y + [-\omega^2 I + i\omega e^2 C_y + i\omega C_x(1+b)\frac{d^2}{4} + e^2 K_y + \frac{d^2}{4} K_x(1+a)]\tilde{u}_\theta - \omega^2 I\tilde{\theta}_o = 0 \quad (3.4c)$$

$$-\omega^2 m\tilde{u}_x + (K_{ppx} - \omega^2 m_T)\tilde{u}_{ox} - \omega^2 m h\tilde{\gamma}_{ox} = 0 \quad (3.4d)$$

$$-\omega^2 m \tilde{u}_y + (K_{ppy} - \omega^2 m_T) \tilde{u}_{oy} - \omega^2 m h \tilde{\gamma}_{oy} = K_{ppy} \tilde{u}_{gy} \quad (3.4e)$$

$$-\omega^2 m h \tilde{u}_x - \omega^2 m h \tilde{u}_{ox} + (K_{mmx} - \omega^2 I_{Tx}) \tilde{\gamma}_{ox} = 0 \quad (3.4f)$$

$$-\omega^2 m h \tilde{u}_y - \omega^2 m h \tilde{u}_{oy} + (K_{mmy} - \omega^2 I_{Ty}) \tilde{\gamma}_{oy} = 0 \quad (3.4g)$$

$$-\omega^2 r^2 m \tilde{u}_\theta + (K_{tt} - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_0 = 0 \quad (3.4h)$$

ifadeleri elde edilir. Bu denklemlerde yer alan $m_T = m_o + m$, $I_{Tx} = I_{Ty} = m_o r_o^2 + m r^2 + m h^2$, $I_t = m_o r_o^2 + m r^2$ değerlerini gösterir.

Yukarıdaki ifadeler matris formunda ,

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & a_{12}(\omega) & a_{13}(\omega) & a_{14}(\omega) & a_{15}(\omega) & a_{16}(\omega) & a_{17}(\omega) & a_{18}(\omega) \\ a_{21}(\omega) & a_{22}(\omega) & a_{23}(\omega) & a_{24}(\omega) & a_{25}(\omega) & a_{26}(\omega) & a_{27}(\omega) & a_{28}(\omega) \\ a_{31}(\omega) & a_{32}(\omega) & a_{33}(\omega) & a_{34}(\omega) & a_{35}(\omega) & a_{36}(\omega) & a_{37}(\omega) & a_{38}(\omega) \\ a_{41}(\omega) & a_{42}(\omega) & a_{43}(\omega) & a_{44}(\omega) & a_{45}(\omega) & a_{46}(\omega) & a_{47}(\omega) & a_{48}(\omega) \\ a_{51}(\omega) & a_{52}(\omega) & a_{53}(\omega) & a_{54}(\omega) & a_{55}(\omega) & a_{56}(\omega) & a_{57}(\omega) & a_{58}(\omega) \\ a_{61}(\omega) & a_{62}(\omega) & a_{63}(\omega) & a_{64}(\omega) & a_{65}(\omega) & a_{66}(\omega) & a_{67}(\omega) & a_{68}(\omega) \\ a_{71}(\omega) & a_{72}(\omega) & a_{73}(\omega) & a_{74}(\omega) & a_{75}(\omega) & a_{76}(\omega) & a_{77}(\omega) & a_{78}(\omega) \\ a_{81}(\omega) & a_{82}(\omega) & a_{83}(\omega) & a_{84}(\omega) & a_{85}(\omega) & a_{86}(\omega) & a_{87}(\omega) & a_{88}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_x \\ \tilde{u}_y \\ \tilde{u}_\theta \\ \tilde{u}_{ox} \\ \tilde{u}_{oy} \\ \tilde{\gamma}_{ox} \\ \tilde{\gamma}_{oy} \\ \tilde{\theta}_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1(\omega) \\ b_2(\omega) \\ b_3(\omega) \\ b_4(\omega) \\ b_5(\omega) \\ b_6(\omega) \\ b_7(\omega) \\ b_8(\omega) \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. Elde edilmiş olan dinamik denge denklemleri sadece temel yerdeğiştirmeleri cinsinden ifade edilmek istendiğinde, (3.4h) eşitliğinden kat dönmesi,

$$\tilde{u}_\theta = \frac{(K_{tt} - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_0}{\omega^2 r^2 m} \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir.

Benzer şekillerde, (3.4a-b) denklemlerinden kat ötelemeleri, sırasıyla,

$$\begin{aligned}\tilde{u}_x = & \frac{[i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}]}{[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]} \tilde{u}_\theta \\ & + \frac{\omega^2 m \tilde{u}_{ox}}{[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]} + \frac{\omega^2 m h \tilde{\gamma}_{ox}}{[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]}\end{aligned}\quad (3.7a)$$

$$\tilde{u}_y = -\frac{[i\omega e C_y + e K_y] \tilde{u}_\theta}{[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]} + \frac{\omega^2 m \tilde{u}_{oy}}{[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]} + \frac{\omega^2 m h \tilde{\gamma}_{oy}}{[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]} \quad (3.7b)$$

bulunur. Yukarıdaki ifadelerde kat dönme yerdeğiştirme bileşenleri yerine (3.6) eşitliğindeki değeri yerine konulduğunda, kat öteleme yer değıştirme bileşenleri sadece temel yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden yazılmış olur:

$$\begin{aligned}\tilde{u}_x = & \frac{\omega^2 m \tilde{u}_{ox}}{[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]} + \frac{\omega^2 m h \tilde{\gamma}_{ox}}{[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]} \\ & - \frac{[i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}]}{[-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)]} \frac{(K_{tt} - \omega^2 I_t)}{\omega^2 r^2 m} \tilde{\theta}_o\end{aligned}\quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}\tilde{u}_y = & \frac{\omega^2 m \tilde{u}_{oy}}{[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]} + \frac{\omega^2 m h \tilde{\gamma}_{oy}}{[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]} \\ & - \frac{[i\omega e C_y + e K_y]}{[-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y]} \frac{(K_{tt} - \omega^2 I_t)}{\omega^2 r^2 m} \tilde{\theta}_o\end{aligned}\quad (3.9)$$

Temel yerdeğiştirme bileşenlerine bağlı kat dönme ve ötelemelerine ait ifadeler (3.6,3.8-3.9) sırasıyla (3.4c-g) dinamik denge denklemlerine yerleştirilecektir. İlk aşamada (3.4c) hareket denkleminde bu ifadeler yerine konulduğunda,

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \right] [\omega^2 m \tilde{u}_{ox} + \omega^2 m h \tilde{\gamma}_{ox} \\
& - \frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})}{\omega^2 r^2 m} (K_{tt} - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_o] \\
& + \left[\frac{i\omega e C_y + K_y e}{-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y} \right] [\omega^2 m \tilde{u}_{oy} + \omega^2 m h \tilde{\gamma}_{oy} - \frac{(i\omega e C_y + e K_y)}{(\omega^2 r^2 m)} (K_{tt} - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_o] \\
& + \left[\frac{(-\omega^2 I + i\omega C_\theta + K_\theta)(K_{tt} - \omega^2 I_t) \tilde{\theta}_o}{(\omega^2 r^2 m)} \right] - \omega^2 I \tilde{\theta}_o = 0
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

ve bu denklem düzenlendiğinde,

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})^2}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \frac{(K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(\omega^2 r^2 m)} - \frac{(i\omega e C_y + K_y e)^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)(\omega^2 r^2 m)} \right. \\
& + \left. \frac{(-\omega^2 I + i\omega C_\theta + K_\theta)(K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(\omega^2 r^2 m)} - \omega^2 I \right] \tilde{\theta}_o \\
& + \left[\frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \omega^2 m \right] \tilde{u}_{ox} \\
& + \left[\frac{i\omega e C_y + K_y e}{-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y} \omega^2 m \right] \tilde{u}_{oy} + \left[\frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \omega^2 m h \right] \tilde{\gamma}_{ox} \\
& + \left[\frac{i\omega e C_y + K_y e}{-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y} \omega^2 m h \right] \tilde{\gamma}_{oy} = 0
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

elde edilir.

Aynı şekilde (3.4d) denge denkleminde (3.6,3.8-3.9) ifadeleri yerine konulduğunda,

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\omega^2 m (i\omega C_x (-1+b) \frac{d}{2} + K_x (-1+a) \frac{d}{2}) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a)} \frac{(\omega^2 r^2 m)}{(\omega^2 r^2 m)} \right] \tilde{\theta}_o \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a))} + (K_{ppx} - \omega^2 m_T) \right] \tilde{u}_{ox} \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a)} - \omega^2 m h \right] \tilde{\gamma}_{ox} = 0
\end{aligned} \tag{3.12}$$

elde edilir.

(3.4e) denge denkleminde (3.6,3.8-3.9) ifadeleri yerine konulduğunda,

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\omega^2 m (i\omega e C_y + e K_y) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} \frac{(\omega^2 r^2 m)}{(\omega^2 r^2 m)} \right] \tilde{\theta}_o \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} + (K_{ppy} - \omega^2 m_T) \right] \tilde{u}_{oy} \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} - \omega^2 m h \right] \tilde{\gamma}_{oy} = K_{ppy} \tilde{u}_{gy}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

bulunur. Aynı şekilde (3.4f) denge denkleminde (3.6,3.8-3.9) ifadeleri yer aldığı,

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\omega^2 m h (i\omega C_x (-1+b) \frac{d}{2} + K_x (-1+a) \frac{d}{2}) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a)} \frac{(\omega^2 r^2 m)}{(\omega^2 r^2 m)} \right] \tilde{\theta}_o \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{(-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a))} - \omega^2 m h \right] \tilde{u}_{ox} \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2 h^2}{-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a)} + (K_{mmx} - \omega^2 I_T) \right] \tilde{\gamma}_{ox} = 0
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Son olarak ta (3.4g) denge denkleminde (3.6,3.8-9) ifadeleri yerine konulduğunda,

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{\omega^2 m h (i\omega e C_y + e K_y) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y) (\omega^2 r^2 m)} \right] \tilde{\theta}_o \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} - \omega^2 m h \right] \tilde{u}_{oy} \\
& + \left[\frac{-\omega^4 m^2 h^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} + (K_{mmy} - \omega^2 I_T) \right] \tilde{\gamma}_{oy} = 0
\end{aligned} \tag{3.15}$$

elde edilir.

Son olarak elde edilen hareket denklemlerine bağlı olarak katsayılar matrisi ve sabitler matrisi sadece temel yerdeğiştirmelerine göre ifade edildiğinde,

$$\begin{bmatrix} a_{11}(\omega) & a_{12}(\omega) & a_{13}(\omega) & a_{14}(\omega) & a_{15}(\omega) \\ a_{21}(\omega) & a_{22}(\omega) & a_{23}(\omega) & a_{24}(\omega) & a_{25}(\omega) \\ a_{31}(\omega) & a_{32}(\omega) & a_{33}(\omega) & a_{34}(\omega) & a_{35}(\omega) \\ a_{41}(\omega) & a_{42}(\omega) & a_{43}(\omega) & a_{44}(\omega) & a_{45}(\omega) \\ a_{51}(\omega) & a_{52}(\omega) & a_{53}(\omega) & a_{54}(\omega) & a_{55}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\theta}_o(\omega) \\ \tilde{u}_{ox}(\omega) \\ \tilde{u}_{oy}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{ox}(\omega) \\ \tilde{\gamma}_{oy}(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1(\omega) \\ b_2(\omega) \\ b_3(\omega) \\ b_4(\omega) \\ b_5(\omega) \end{Bmatrix} \tag{3.16}$$

şeklinde yazılabilir. Bu matrislere ait elemanlar sırasıyla verildiğinde,

$$\begin{aligned}
a_{11}(\omega) = & \left[\frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})^2}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \frac{(K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(\omega^2 r^2 m)} \right. \\
& \left. - \frac{(i\omega e C_y + K_y e)^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)(\omega^2 r^2 m)} + \frac{(-\omega^2 I + i\omega C_\theta + K_\theta)(K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(\omega^2 r^2 m)} - \omega^2 I \right]
\end{aligned} \tag{3.17a}$$

$$a_{12}(\omega) = \left[\frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \omega^2 m \right] \quad (3.17b)$$

$$a_{13}(\omega) = \left[\frac{i\omega e C_y + K_y e}{-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y} \omega^2 m \right] \quad (3.17c)$$

$$a_{14}(\omega) = \left[\frac{(i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2})}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} \omega^2 m h \right] \quad (3.17d)$$

$$a_{15}(\omega) = \left[\frac{i\omega e C_y + K_y e}{-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y} \omega^2 m h \right] \quad (3.17e)$$

$$a_{21}(\omega) = \left[\frac{\omega^2 m (i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a) (\omega^2 r^2 m)} \right] \quad (3.18a)$$

$$a_{22}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a))} + (K_{ppx} - \omega^2 m_T) \right] \quad (3.18b)$$

$$a_{23}(\omega) = 0 \quad (3.18c)$$

$$a_{24}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{-\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)} - \omega^2 m h \right] \quad (3.18d)$$

$$a_{25}(\omega) = 0 \quad (3.18e)$$

$$a_{31}(\omega) = \left[\frac{\omega^2 m (i\omega e C_y + e K_y) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y) (\omega^2 r^2 m)} \right] \quad (3.19a)$$

$$a_{32}(\omega) = 0 \quad (3.19b)$$

$$a_{33}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} + (K_{ppy} - \omega^2 m_T) \right] \quad (3.19c)$$

$$a_{34}(\omega) = 0 \quad (3.19a)$$

$$a_{35}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} - \omega^2 m h \right] \quad (3.19b)$$

$$a_{41}(\omega) = \left[\frac{\omega^2 m h (i\omega C_x (-1+b) \frac{d}{2} + K_x (-1+a) \frac{d}{2}) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a)} \frac{1}{(\omega^2 r^2 m)} \right] \quad (3.20a)$$

$$a_{42}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{(-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a))} - \omega^2 m h \right] \quad (3.20b)$$

$$a_{43}(\omega) = 0 \quad (3.20c)$$

$$a_{44}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2 h^2}{-\omega^2 m + i\omega C_x (1+b) + K_x (1+a)} + (K_{mmx} - \omega^2 I_T) \right] \quad (3.20d)$$

$$a_{45}(\omega) = 0 \quad (3.20e)$$

$$a_{51}(\omega) = \left[\frac{\omega^2 m h (i\omega C_y + eK_y) (K_{tt} - \omega^2 I_t)}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} \frac{1}{(\omega^2 r^2 m)} \right] \quad (3.21a)$$

$$a_{52}(\omega) = 0 \quad (3.21b)$$

$$a_{53}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2 h}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} - \omega^2 m h \right] \quad (3.21c)$$

$$a_{54}(\omega) = 0 \quad (3.21d)$$

$$a_{55}(\omega) = \left[\frac{-\omega^4 m^2 h^2}{(-\omega^2 m + i\omega C_y + K_y)} + (K_{mmy} - \omega^2 I_T) \right] \quad (3.21e)$$

$$b_1(\omega) = b_2(\omega) = b_4(\omega) = b_5(\omega) = 0, \quad b_3(\omega) = K_{ppy} \tilde{u}_{gy} \quad (3.22)$$

dir.

Şimdiye kadar yazılmış olan eşitlikler, bilgisayar programlama tekniği açısından aşağıdaki kısaltmalar yapılarak tekrar düzenlendiğinde,

$$A(\omega) = -\omega^2 m + i\omega C_y + K_y, \quad B(\omega) = i\omega C_y e + K_y e$$

$$C(\omega) = \omega^2 I_t, \quad D(\omega) = \omega^2 r^2 m$$

$$E(\omega) = i\omega C_\theta + K_\theta, \quad F(\omega) = \omega^2 I, \quad G(\omega) = \omega^2 m$$

$$N(\omega) = -\omega^2 m + i\omega C_x(1+b) + K_x(1+a)$$

$$M(\omega) = i\omega C_x(-1+b)\frac{d}{2} + K_x(-1+a)\frac{d}{2}$$

$$C_\theta = C_y e^2 + C_x(1+b)\frac{d^2}{4}, \quad K_\theta = K_y e^2 + K_x(1+a)\frac{d^2}{4}$$

$$I_T = mr^2 + m_0 r^2 + mh^2, \quad I = mr^2, \quad I_t = mr^2 + m_0 r^2$$

(3.23)

$$a_{11}(\omega) = (K_{tt} - C)\left(-\frac{M^2}{ND} - \frac{B^2}{AD} + \frac{-F+E}{D} - F\right)$$

$$a_{12}(\omega) = \frac{M}{N}G$$

$$a_{13}(\omega) = \frac{B}{A}G$$

(3.24)

$$a_{14}(\omega) = \frac{M}{N}Gh$$

$$a_{15}(\omega) = \frac{B}{A}Gh$$

$$a_{21}(\omega) = \frac{M(K_{tt} - C)G}{ND}$$

$$a_{22}(\omega) = \frac{-G^2}{N} + (K_{ppx} - \omega^2 m_T)$$

$$a_{23}(\omega) = 0$$

(3.25)

$$a_{24}(\omega) = -Gh\left(\frac{G}{N} + 1\right)$$

$$a_{25}(\omega) = 0$$

$$\begin{aligned}
a_{31}(\omega) &= \frac{B(K_{tt} - C)G}{AD} \\
a_{32}(\omega) &= 0 \\
a_{33}(\omega) &= \frac{-G^2}{A} + (K_{ppy} - \omega^2 m_T) \\
a_{34}(\omega) &= 0
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
a_{35}(\omega) &= -Gh\left(\frac{G}{A} + 1\right) \\
a_{41}(\omega) &= \frac{M(K_{tt} - C)Gh}{ND} \\
a_{42}(\omega) &= -Gh\left(\frac{G}{N} + 1\right) \\
a_{43}(\omega) &= 0 \\
a_{44}(\omega) &= \frac{-G^2 h^2}{N} + (K_{mmx} - \omega^2 I_T) \\
a_{45}(\omega) &= 0
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
a_{51}(\omega) &= \frac{B(K_{tt} - C)Gh}{AD} \\
a_{52}(\omega) &= 0 \\
a_{53}(\omega) &= -Gh\left(\frac{G}{A} + 1\right) \\
a_{54}(\omega) &= 0 \\
a_{55}(\omega) &= \frac{-G^2 h^2}{A} + (K_{mmy} - \omega^2 I_T)
\end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}
b_1(\omega) &= 0 \\
b_2(\omega) &= 0 \\
b_3(\omega) &= K_{ppy} \tilde{u}_{gy} \\
b_4(\omega) &= 0 \\
b_5(\omega) &= 0
\end{aligned} \tag{3.29}$$

elde edilir. İlk aşamada katsayılar ve sabitler matrisine ait elemanların sayısal değerleri dış yükün frekans bileşenlerine bağlı olarak hesaplanır. Daha sonra (3.16) eşitliğinin sayısal çözümü yapılarak temel yerdeğiştirme bileşenlerinin frekans alanındaki değerleri bulunur. Temel yerdeğiştirme bileşenlerinin zaman bölgesindeki çözümü ters Fourier dönüşümü yapılarak elde edilir.

3.5 GELİŞTİRİLEN BİLGİSAYAR PROGRAMININ AMACI, YAPISI VE KAPSAMI

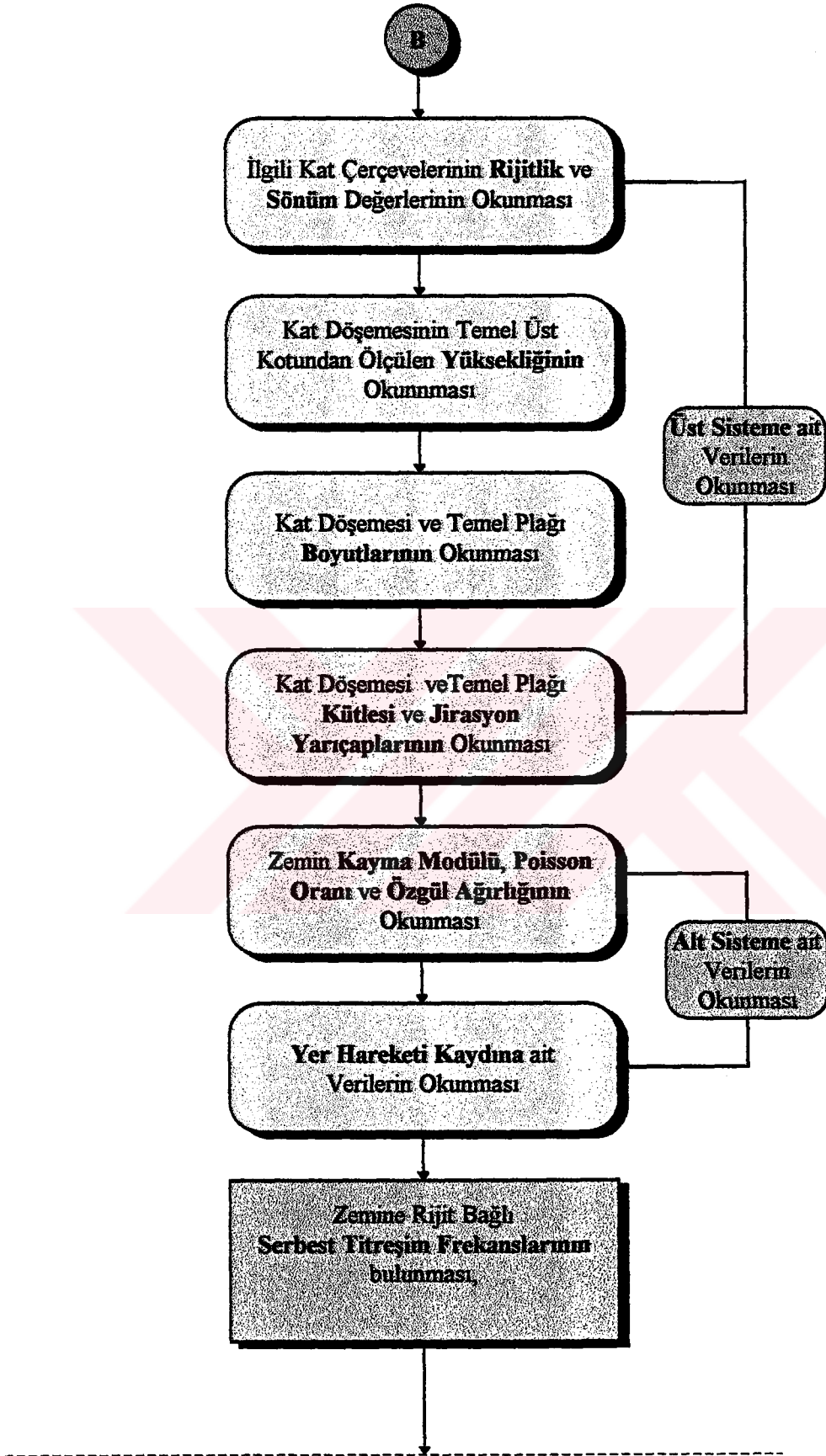
Tek katlı planda simetrik olmayan yapıların, verilen bir dış yük altında zeminle dinamik etkileşimi probleminin doğrudan analitik çözümü, bundan önceki bölümde çok katlı burulmalı bağlaşıklık yapılar için geliştirilen mod yaklaşımı çözümü ile karşılaştırmak amacıyla elde edilmiştir. MATLAB programlama dilinde geliştirilen bilgisayar programının amacı, tek katlı asimetric yapı-zemin ortak sisteminin, bu çalışmada geliştirilen matematik modellerden yararlanılarak, frekansa bağlı empedans katsayılarını uygun biçimde kullanarak, programlama tekniği açısından geçerli, işlem hacmi fazla olmayan, belleği ekonomik kullanarak, basitleştirilmiş fakat doğrudan bir çözüm yaklaşımı ortaya koymak ve söz konusu yapıların serbest titreşim ve deprem yer hareketi etkisi altında zorlanmış titreşim çözümünün yapılabilmesini sağlamaktır. Geliştirilen bilgisayar programının akış diyagramı, ana hatları Şekil 3.3 de verilmiştir.

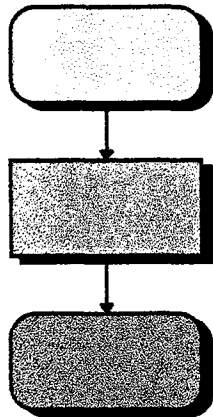
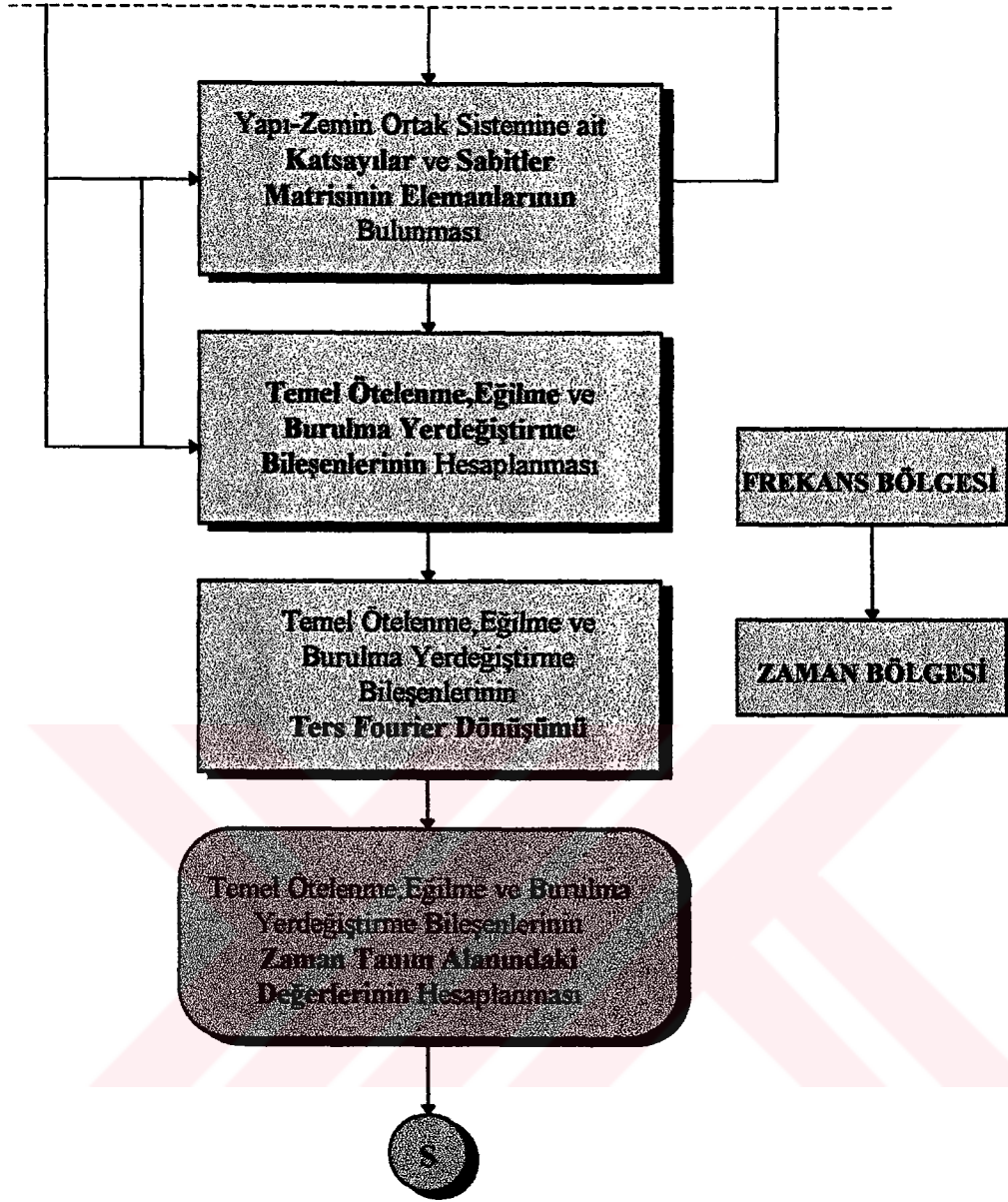
3.5.1 Giriş Bilgileri

Giriş bilgileri, yapı, temel ve zemine ait verilerden meydana gelmektedir. Üst sisteme ait bilgiler, çerçevelere ait rijitlikleri, kat döşemesinin ve temel plağının boyutlarını, eylemsizlik yarıçapları ve kütlelerini, kat yükseklikleri ile yapısal sönüme ait değerleri kapsar. Alt sisteme ait bilgiler ise elastik zeminin kayma modülünü, Poisson oranını ve kütleli yoğunluğu içerir. Fourier dönüşümünün hızlı gerçekleştirilebilmesi için, yer hareketine ait veri dosyalarındaki veri sayısı, 2 nin kuvveti olacak şekilde düzenlenmiştir.

3.5.2 Çıkış Bilgileri

Bu programda gerçekleşen bütün işlemler frekans bölgesinde yapıldıktan sonra elde edilen büyüklüklerin ters Fourier dönüşümü alınarak zaman tanım alanındaki çözümleri elde edilir. Çıkış bilgileri, temel ortamının şekil değiştirebilir özelliğinden dolayı temel plağına ait yerdeğiştirme bileşenlerinin (yanal ötelenme miktarları, eğilme ve burulma dönme açıları) etki eden dinamik dış yüke göre zaman tanım alanındaki değerleridir. Ayrıca sayısal uygulamalardan elde edilen sonuçlar mutlak değer cinsinden ifade edilmiştir.





Giriş Bilgileri (Input)

Çözümler

Çıkış Bilgileri (Output)

Şekil 3.3 Bilgisayar programının akış diyagramının ana hatlarıyla gösterimi

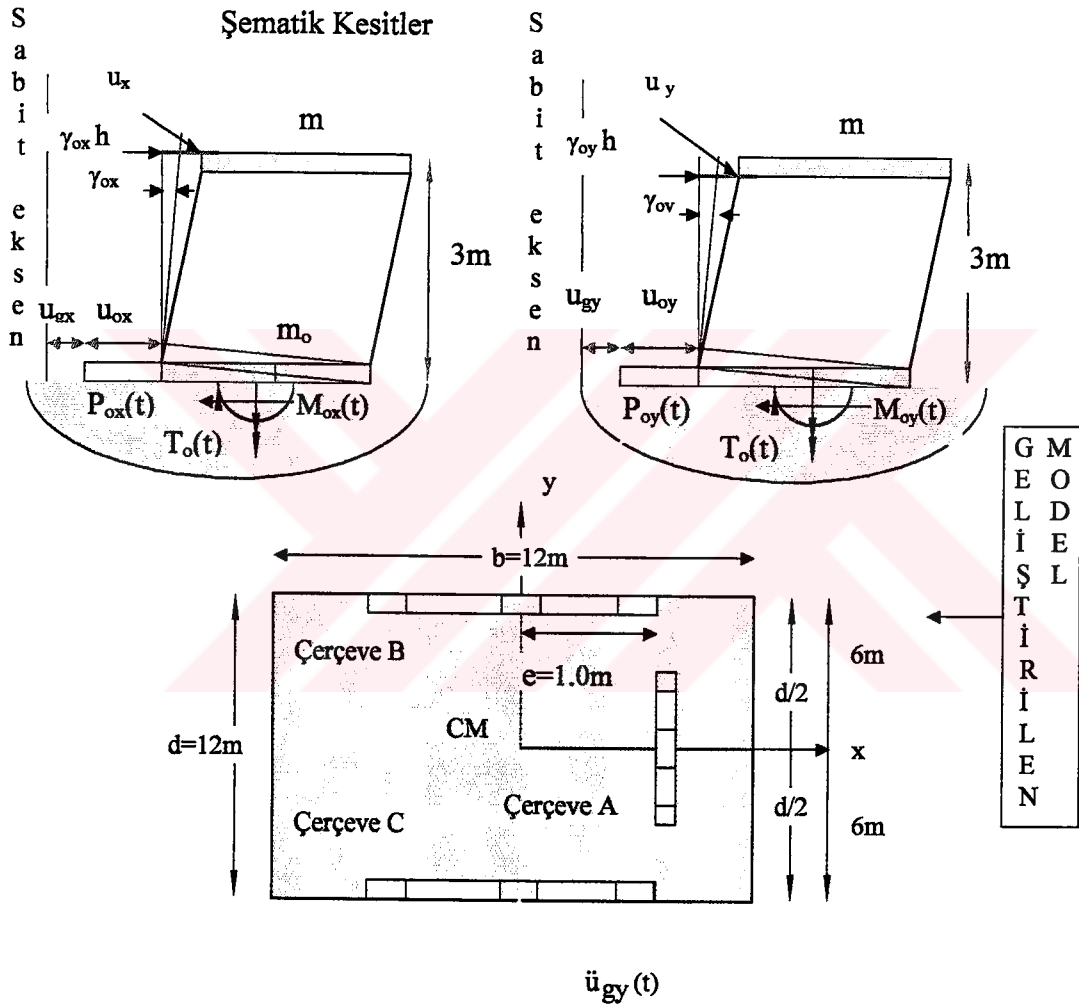
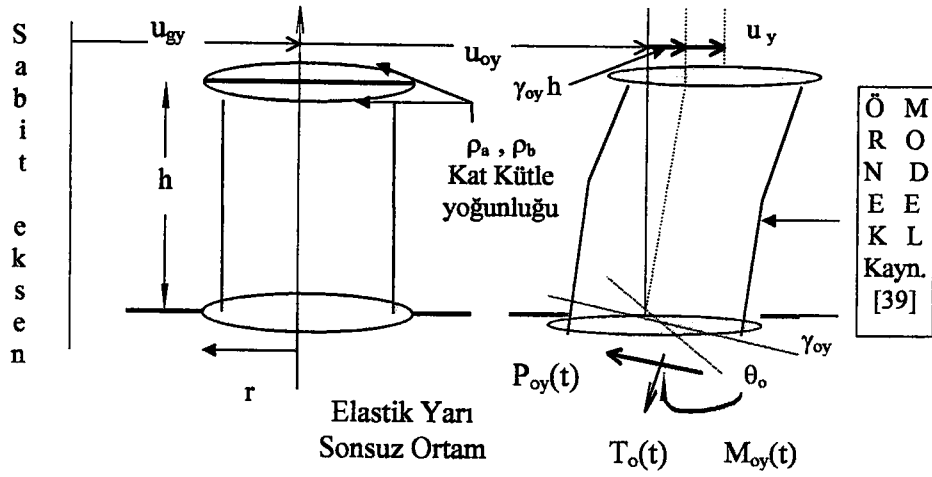
4. SAYISAL UYGULAMALAR

4.1 BİLGİSAYAR ALGORİTMASININ DOĞRULANMASINA YÖNELİK UYGULAMALAR

Önerilen yöntemin etkinliğini ve yeterliliğini gösterebilmek amacıyla, planda simetrik olmayan tek katlı yapıların elastik zeminle dinamik etkileşimini incelemek için geliştirilen doğrudan çözüm yaklaşımına ait bilgisayar algoritması (akış diyagramı Şekil 3.3'de verilen) kullanılarak elde edilen sonuçlar, Tsicnias ve Hutchinson'un bu tip yapılar için geliştirmiş olduğu çözüm yöntemine göre elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmış [39]; ve bu çalışmada geliştirilen çözüm yönteminin tek katlı yapılar için yaklaşıklığı hakkında fikir verilmeğe çalışılmıştır.

Bu yaklaşımla, çok katlı bir yapının özel hali olan tek katlı bir yapının mod yaklaşımı ile elde edilen sayısal çözümleri, doğrudan çözüm yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece dinamik zemin-yapı etkileşim problemlerinde, çok katlı burulmalı bağlaşıp yapılar için, normal mod yaklaşımı uygun biçimde kullanılarak elde edilen analitik çözüm yönteminin ve geliştirilen bilgisayar programının doğruluğu gösterilmeğe çalışılmıştır.

Sayısal uygulamaya ait özellikler ve kullanılan matematik modeller Şekil 4.1'de verilmiştir. Birim genlikli sinüsoidal yer hareketi ile titreştirilen tek katlı yapı modellerinin frekans davranış eğrileri, farklı zemin durumları için elde edilmiştir(Şekil 4.2-4.4).

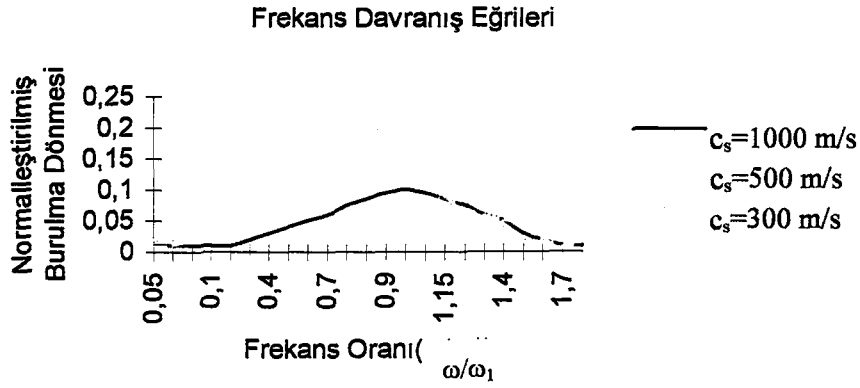


Birim Genlikli Harmonik Yer Hareketi

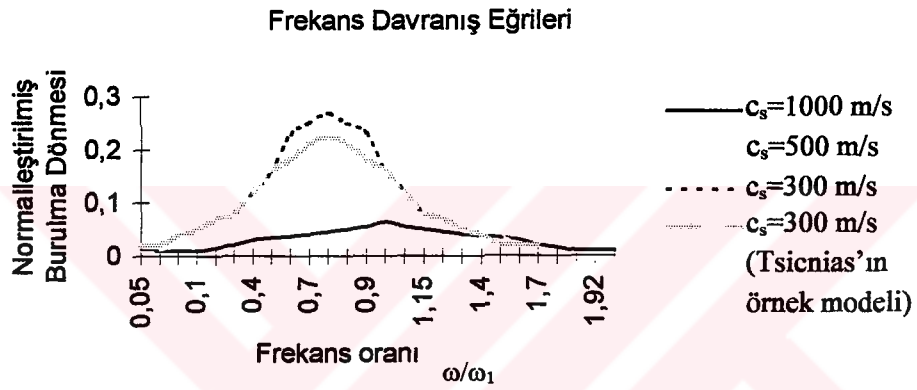
Yapı, Temel ve Zemine ait özellikler:

$K_{yA}=K_{xB}=K_{xC}=26500 \text{ kN/m}$, $m=50 \text{ t}$, $m_o=0$ $r=r_o=5m$,
 $E_c=28500000 \text{ kN/m}^2$, $c_s=1000,700,500,300 \text{ m/s}$, $\nu=0.33$, $\rho=20 \text{ kN/m}^3$, $\xi=0.05$

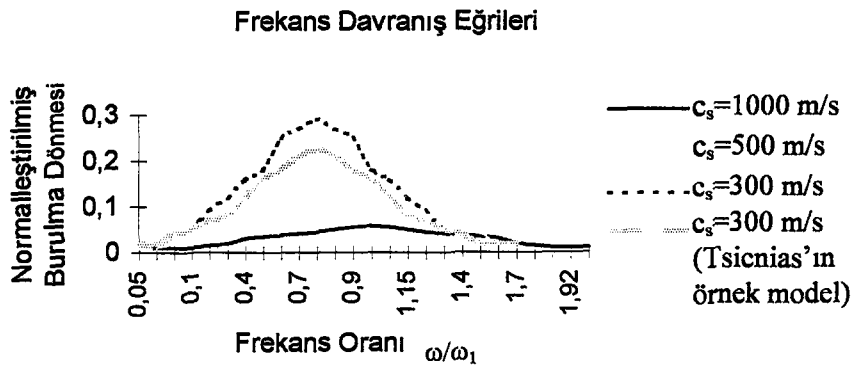
Şekil 4.1 Tek yönde simetrik, tek katlı yapı-temel örnek sistemlerine ait sayısal özellikler



Şekil 4.2 Tsicnias ve Hutchinson çözüm yöntemine göre temel plağının burulma dönmesine ait frekans davranış eğrileri



Şekil 4.3 Doğrudan çözüm yaklaşımına göre temel plağının burulma dönmesine ait frekans davranış eğrileri



Şekil 4.4 Modal çözüm yöntemine göre temel plağının burulma dönmesine ait frekans davranış eğrileri

Bu eğrilerdeki normalleştirilmiş dinamik büyüklüklerin (temel burulma açılarının-yer hareketi yerdeğiştirmesine-ve eylemsizlik yarıçapına göre normalleştirilmesi), birinci titreşim frekansı civarındaki benzeşimi geliştirilen çözüm yöntemlerinin yaklaşıklığını göstermektedir. Yapının mesnetlendiği zeminin rijitliği azaldıkça, yapının periyodunun arttığı görülmektedir. Yapı-zemin sisteminde etkili sönüm, malzeme sönümü yanında enerjinin zemin içinde yayılarak kaybolmasını da içerir. Yapılan ayrıntılı çalışmalar, $\bar{\xi}$ etkili sönüm oranının, ξ rijit mesnetli sistemin sönüm oranına bağlı olarak,

$$\bar{\xi} = \xi_0 + \frac{\xi}{\left(\frac{T}{T}\right)^3} \quad (4.1)$$

şeklinde verilebileceğini ortaya koymuştur. Burada ξ_0 , temel sönüm oranı olup, yapının etkili $\bar{h}$ yüksekliğine ve

$$r = \left(\frac{A_0}{\pi}\right)^{0.5} \quad \frac{\bar{h}}{b_0} \leq 0.5, \quad r = \left(\frac{4I_0}{\pi}\right)^{0.25} \quad \frac{\bar{h}}{b_0} \geq 1.0 \quad (4.2)$$

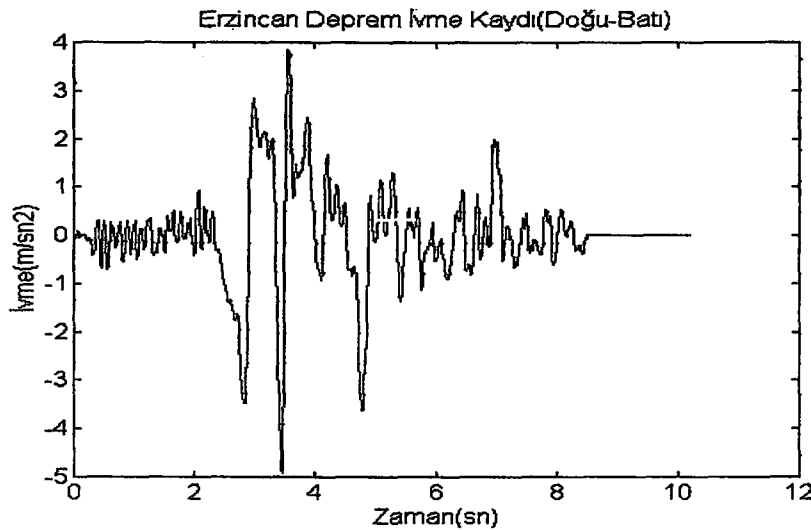
şeklinde tarifli eşdeğer temel yarıçapına bağlıdır [53]. Yapının etkili yüksekliği olarak da, eğer yapı kütlesi belirli bir seviyeye toplanmışsa bu yüksekliğin veya tek katlı ise kat yüksekliğinin alınması uygundur. Gözönüne alınan doğrultuda temelin boyu b_0 , A_0 temelin alanı ve I_0 gözönüne alınan doğrultuya dik yatay eksene göre temelin alansal atalet momentidir. Frekans davranış eğrilerinden bulunan temel frekans oranları kullanılarak ortak sistemin sönümü, farklı zemin durumları için verilmiştir (Tablo 4.1). Tablo 4.1’de temel sönüm oranları ξ_0 , $\bar{T}$ sistemin temel titreşim periyodunun, T yapının rijit zemine mesnetli periyodu oranına bağlı olarak ilgili eğrilerden alınmıştır [53].

Tablo 4.1 Şekil değiştirebilen zemin durumları için tek katlı yapı-zemin örnek sisteminde sönüm oranları

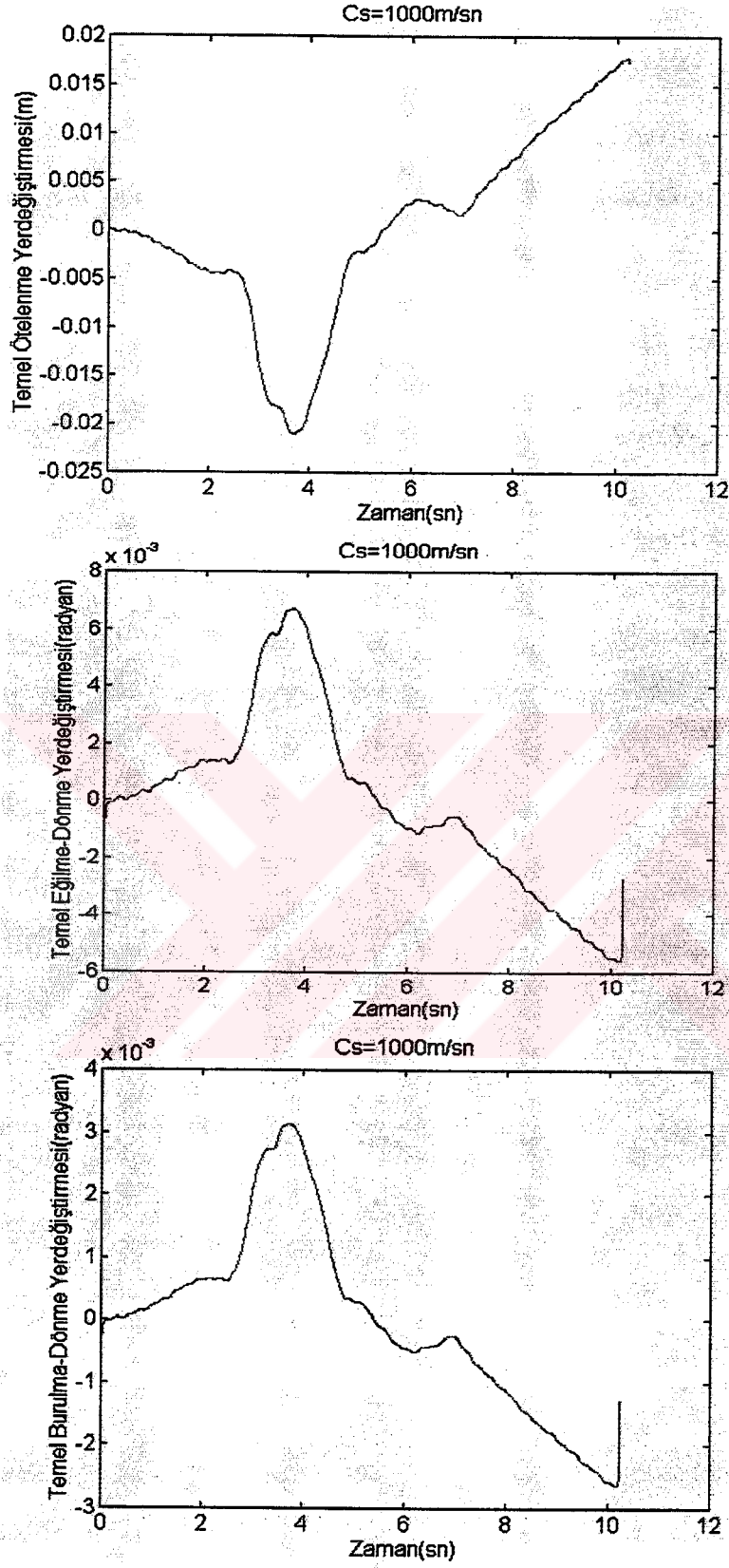
Kayma Dalga Hızı(m/s)	Üstyapının Modal Sönümü Oranı (ξ)	Temel Sönüm Oranı (ξ_0)	Üstyapı-Zemin Sisteminin Sönüm Oranı ($\bar{\xi}$)
1000	0.05	0.020	0.063
500	0.05	0.095	0.125
300	0.05	0.130	0.155

İncelenen iki katlı betonarme yapının çerçeve tipi elemanları, sistem tek doğrultuda simetriklik özelliği göstermeyecek şekilde döşeme kenarlarına paralel olarak düzenlenmiştir. Kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki dış merkezlik $e=1.0\text{m}$ olarak hesaba katılmıştır. Her kat için çerçeve rijitlikleri, $K_{yAi} = K_{xBi} = K_{xCi} = 26500$ kN/m olarak verilmiştir. Planda dikdörtgen alınan döşeme plağının boyutları 12×12 m ve kütleleri $m_2 = m_1 = 50$ t dir. Rijit temel plağının üzerine oturduğu elastik zeminin birim hacminin kütlesi, $\rho = 20$ kN/m³ ve Poisson oranı $\nu = 0.33$ olarak alınmıştır. Zeminin katkısı nedeni ile üst yapının davranışında ortaya çıkan değişimleri saptamak amacı ile, örnek sistem birinci serbest titreşim frekansı civarında birim genlikli sinüsoidal yer hareketi etkisi altında çözülmüştür. Bu örnekte ayrıca idealleştirilen zemin karakterine uygun olarak, zemin yüzeyinde alınmış bulunan Erzincan 92 Doğu-Batı bileşenine ait ivme kaydı kullanılmıştır. Üstyapıda yapısal nitelikte bir sönümün bulunduğu kabul edilmiş ve hesapların tüm modların da, modal sönüm oranı olarak $\xi = 0.05$ alınmıştır.

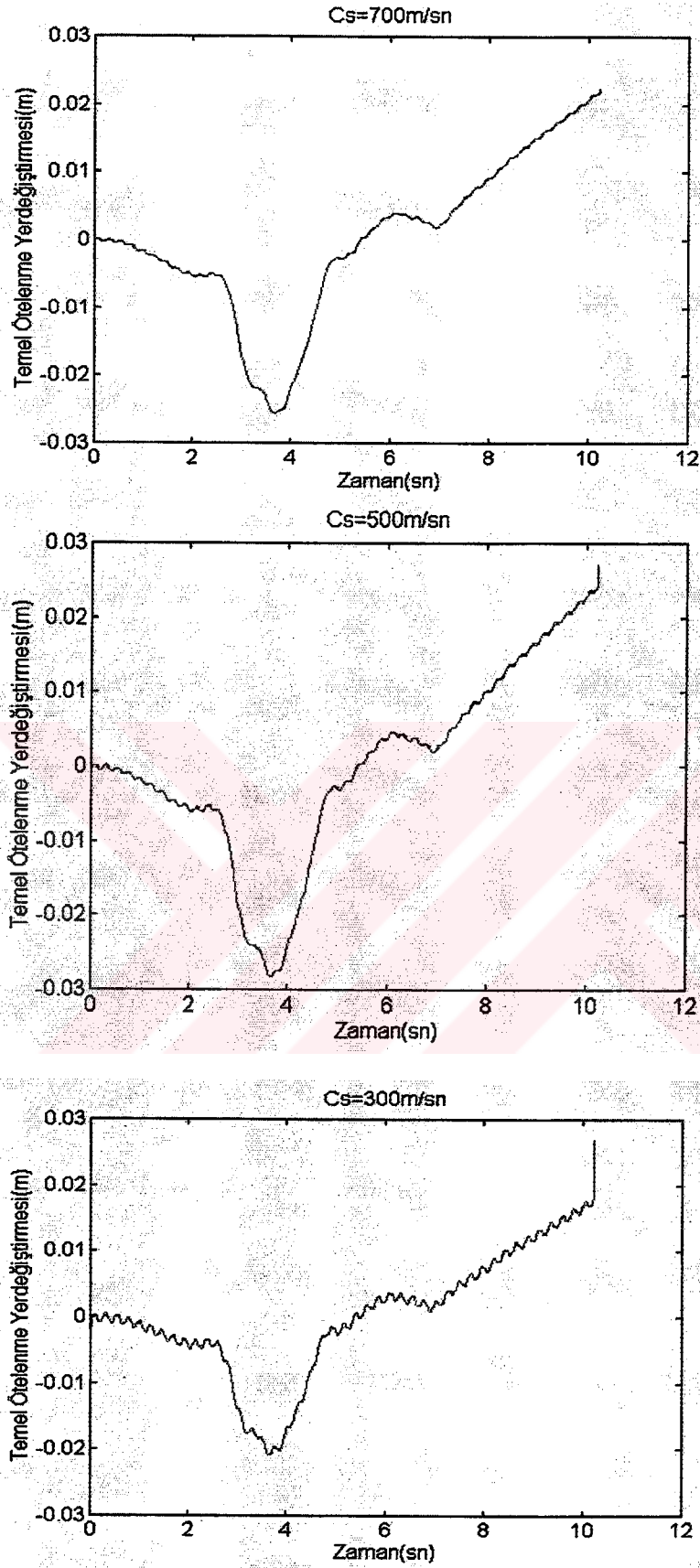
Gözönüne alınan dört zemin türü ($c_s = 1000, 700, 500, 300$ m/s) için dinamik büyüklükler incelenmiştir. İlk aşamada temel yüzeyinde dinamik dış etki olarak Erzincan deprem ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 4.6). Bu yer hareketine bağlı olarak temel öteleme yerdeğiştirmeleri, eğilme (devrilme) dönme yerdeğiştirmeleri ve burulma dönme yerdeğiştirmelerinin, rijit ve şekil değiştirebilen zemin türleri için deprem süresince değişimleri elde edilmiştir (Şekil 4.7- 4.10). Elde edilen bu büyüklüklerin sanal kısımlarının genliğine etkisi çok küçük olduğundan, dinamik büyüklüklerin sadece gerçel kısımları gösterilmiştir.



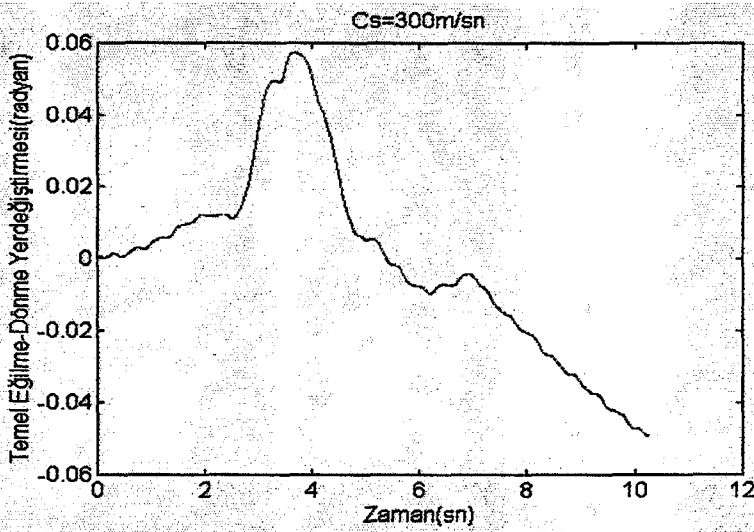
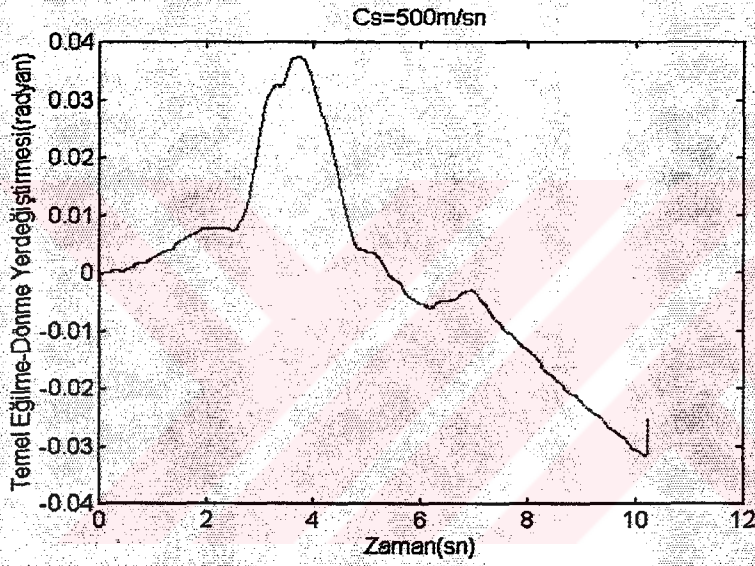
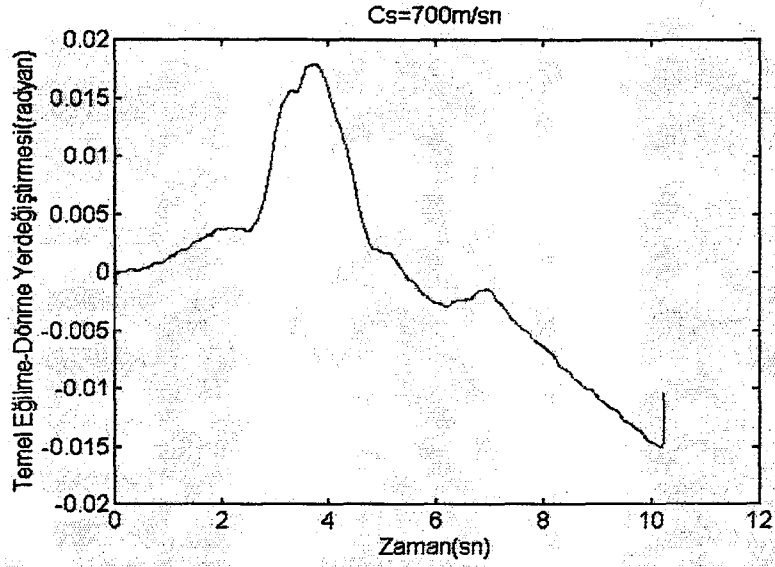
Şekil 4.6 18 Mart 1992 Erzincan deprem ivme kaydı (Doğu-Batı bileşeni)



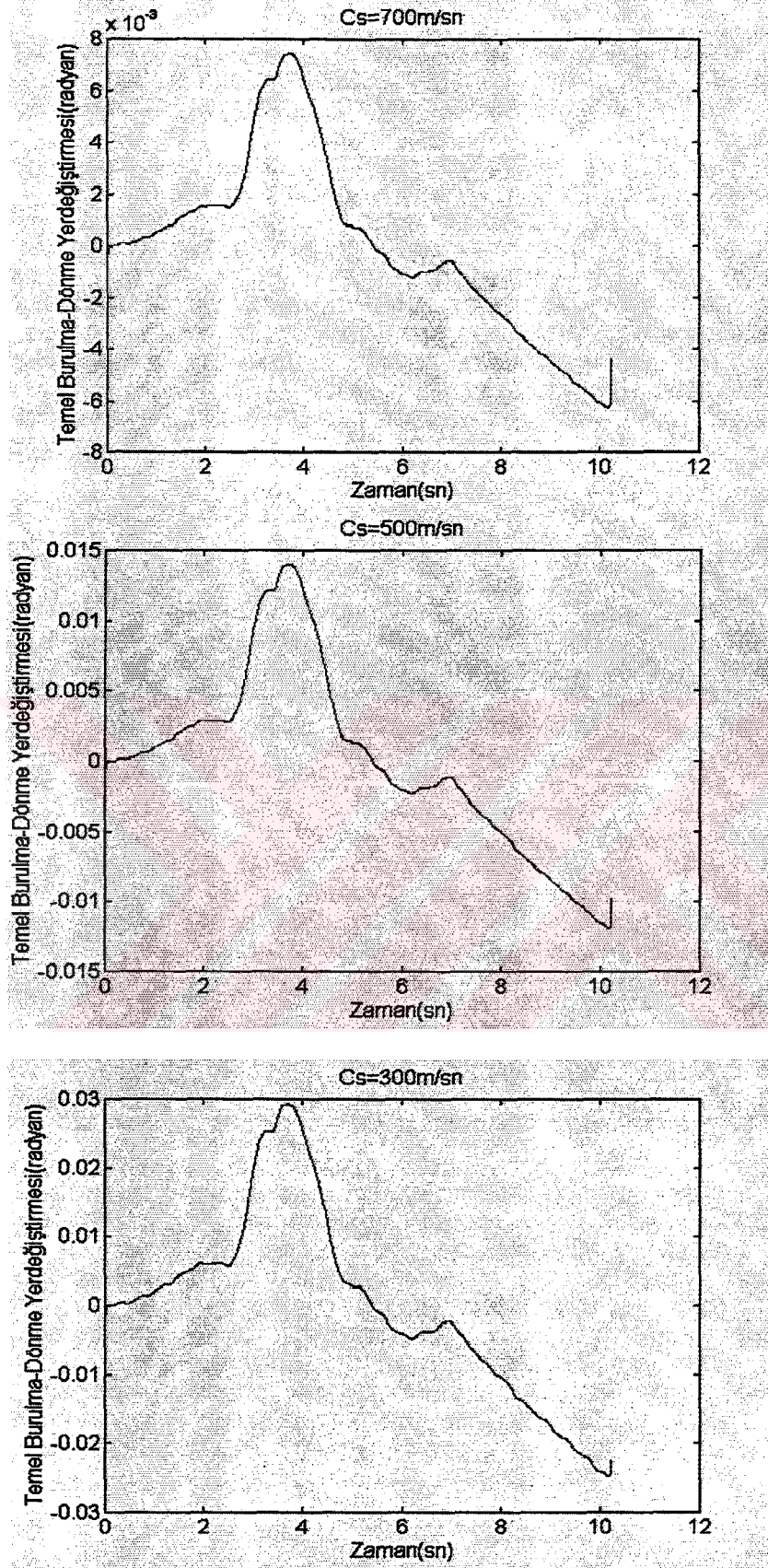
Şekil 4.7 Zemin kayma dalga hızı 1000 m/s için temel yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi



Şekil 4.8 Zemin kayma dalga hızları 700 m/s, 500m/s, 300m/s için temel öteleme yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi



Şekil 4.9 Zemin kayma dalga hızları 700 m/s, 500m/s, 300m/s için temel eğilme- dönme yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi



Şekil 4.10 Zemin kayma dalga hızları 700 m/s, 500m/s, 300m/s için temel burulma- dönme yerdeğiştirmelerinin deprem süresince değişimi

Yukarıdaki şekillerden, verilen bir dış yük altında, zemin kayma dalga hızı küçüldükçe temel öteleme ve eğilme (devrilme)-dönme yerdeğiştirmelerinin büyüdüğü gözlenmektedir. Elde edilen bu temel yerdeğiştirme bileşenlerine göre kat elastik yanal yerdeğiştirmeleri ve buna bağlı olarak temel tabanına etkiyen kesme kuvvetlerinin maksimum değerleri ve en üst katın toplam yerdeğiştirmesi, katlarda meydana gelen burulma momentleri, farklı kayma dalga hızları için hesap edilmiştir (Tablo 4.2-4).

Tablo 4.2 İki katlı yapı için hesaplanan elastik yerdeğiştirmelerin kayma dalga hızlarına göre maksimum değerleri

	Kat Elastik Yanal Yerdeğiştirme		Maksimum Değerleri(m)	
Dalga Hızı(m/s)	1000	700	500	300
2. Kat	0.0385	0.0368	0.0347	0.0256
1.Kat	0.0296	0.0279	0.0268	0.0172
Temel Seviyesi	0.0225	0.0260	0.0280	0.0210

Tablo 4.3 İki katlı yapı için hesaplanan toplam yerdeğiştirmelerin ve taban kesme kuvvetinin kayma dalga hızlarına göre maksimum değerleri

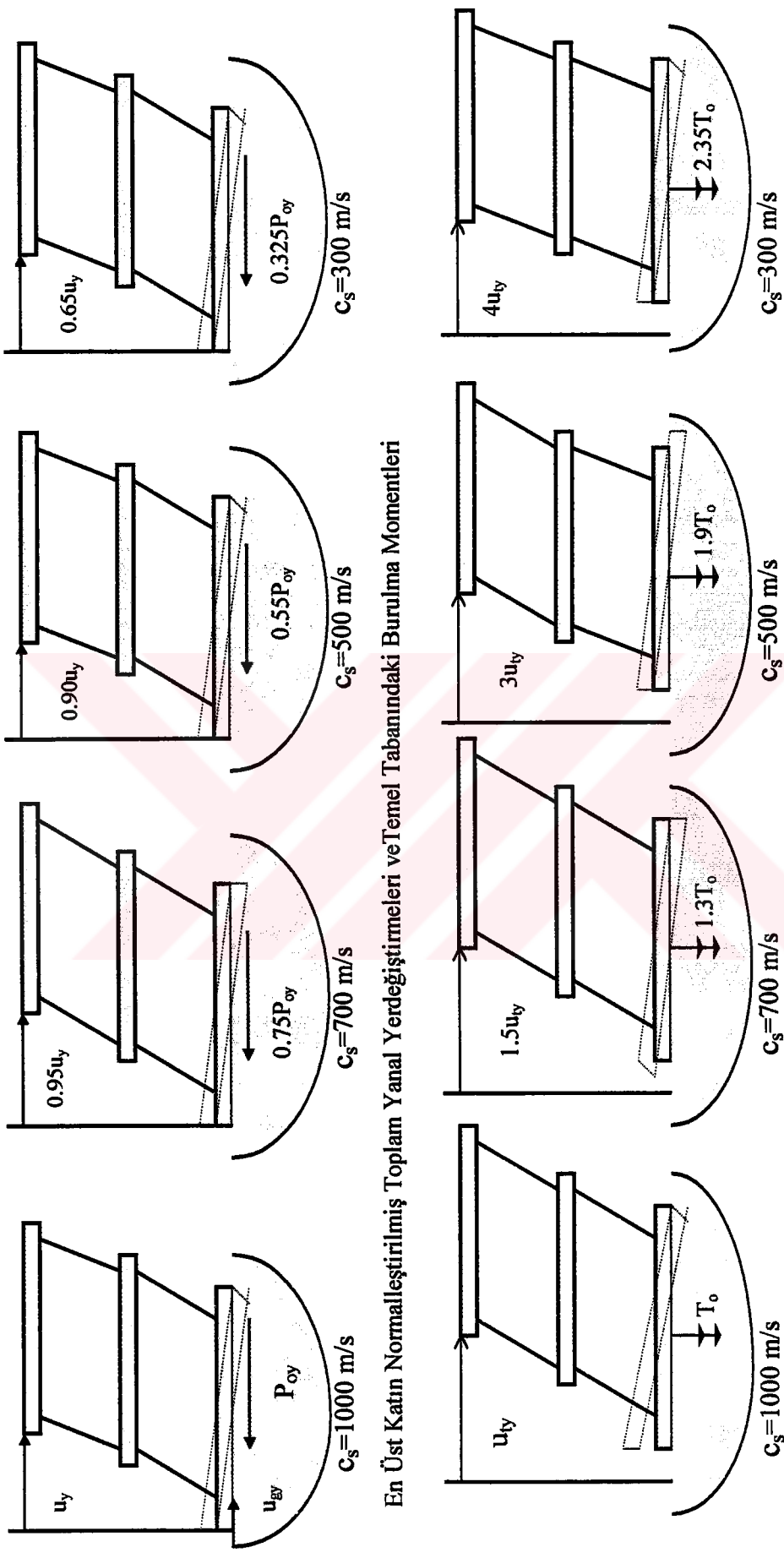
	Toplam Elastik Yerdeğiştirmelerinin Maksimum Değerleri (m)		Maksimum Temel Tabanı Kesme Kuvveti (kN)	
Dalga Hızı(m/s)	1000	700	500	300
En Üst Kat Toplam Yerdeğiştirme	0.1002	0.1632	0.2847	0.386
Kesme Kuvveti	382.46	284.41	202.96	124.54

Tablo 4.4 İki katlı yapı için hesaplanan burulma momentlerinin kayma dalga hızlarına göre maksimum değerleri

	Kat Burulma Momentinin Maksimum Değerleri (kNm)			
Dalga Hızı(m/s)	1000	700	500	300
2. Kat	196.2	262.5	375.0	437.6
1.Kat	200.5	262.5	386.0	502.2
Temel Seviyesi	396.7	525.0	761.0	939.8

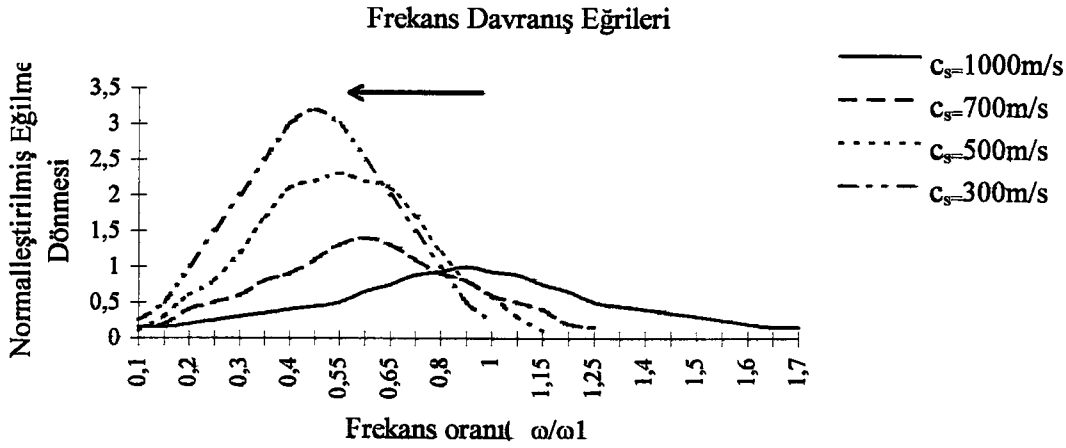
Zemin koşullarının değişmesinin yapının elastik davranışı üzerindeki etkileri, yukarıda elde edilen sonuçlar doğrultusunda söz konusu yapının zemine rijit mesnetlenmesi durumuna göre karşılaştırılarak aşağıda verilmiştir (Şekil 4.11).

En Üst Katın Normalleştirilmiş Yanal Yerdeğiştirmeleri ve Temel Tabanındaki Kesme Kuvvetleri



Şekil 4.11 Sayısal uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi

Örnek sistem, birim genlikli yer hareketi ile titreştirilerek devrilme dönmesine ait dinamik büyüklükler farklı zemin koşullarına göre, zorlayıcı frekansının değişimine bağlı olarak incelenmiştir. Dinamik büyüklükler en sert zemin koşuluna göre elde edilmiş değerle normalize edilmiştir. Zemin yumuşadıkça eğrilerin en büyük değerleri büyüyerek sola doğru kaymakta olduğu görülmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Temel plağının eğilme(devrilme) dönmesine ait frekans davranış eğrileri

Tabloda (4.5), zemin-yapı ortak sistemine ait elde edilmiş viskoz sönüm oranlarının, zemin ortamının yumuşamasıyla birlikte artma eğiliminde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5 Şekil değiştirebilen zemin durumları için iki katlı yapı-zemin sistemlerinde sönüm oranı

Kayma Dalga Hızı(m/s)	Üstyapının Modal Sönüm Oranı	Temel Sönüm Oranı (ξ_0)	Üstyapı-Zemin Sisteminin Sönüm Oranı ($\bar{\xi}$)
1000	0.05	0.030	0.067
700	0.05	0.180	0.190
500	0.05	0.195	0.205
300	0.05	0.210	0.215

Ayrıca birim genlikli sinüsoidal yer hareketi ile titreştirilen yapı-zemin ortak sistemi, rijit ve şekil değiştirebilen zemin durumları için h/r (kat yüksekliğinin eylemsizlik yarıçapına oranı), e/r (dış merkezliğin eylemsizlik yarıçapına oranı) ve m_0/m (temel kütesinin kat kütesine oranı) değerlerine göre incelenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Tablo 4.6-11).

kütlesinin, kat kütlesine oranı) değerlerine göre incelenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Tablo 4.6-11).

Tablo 4.6 Zemin kayma dalga hızlarının 1000m/s ve 700 m/s olmaları durumunda temel yerdeğiştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin e/r parametresine bağlı olarak değişimleri

Kayma Dalga Hızı(m/s)	$m_o/m=0 \quad h/r=0.6$					
	$c_s=1000$			$c_s=700$		
Temel Yerdeğiştirmeleri (metre, radyan)	Yanal Öteleme (u_o)	Eğilme Dönmesi (γ_o)	Burulma Dönmesi (θ_o)	Yanal Öteleme (u_o)	Eğilme Dönmesi (γ_o)	Burulma Dönmesi (θ_o)
$\frac{e}{r} = 0.20$	0.028	0.033	0.013	0.034	0.051	0.020
$\frac{e}{r} = 0.40$	0.012	0.030	0.085	0.009	0.042	0.090
$\frac{e}{r} = 0.60$	0.002	0.018	0.100	0.001	0.019	0.110

Tablo 4.7 Zemin kayma dalga hızlarının 500m/s ve 300 m/s olmaları durumunda temel yerdeğiştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin e/r parametresine bağlı olarak değişimleri

Kayma Dalga Hızı(m/s)	$m_o/m=0 \quad h/r=0.6$					
	$c_s=500$			$c_s=300$		
Temel Yerdeğiştirmeleri (metre, radyan)	Yanal Öteleme (u_o)	Eğilme Dönmesi (γ_o)	Burulma Dönmesi (θ_o)	Yanal Öteleme (u_o)	Eğilme Dönmesi (γ_o)	Burulma Dönmesi (θ_o)
$\frac{e}{r} = 0.20$	0.0370	0.0700	0.0280	0.0320	0.1100	0.0530
$\frac{e}{r} = 0.40$	0.0065	0.0450	0.0980	0.0040	0.0500	0.1000
$\frac{e}{r} = 0.60$	0.0031	0.0200	0.1100	0.0003	0.0275	0.0900

Tablo 4.8 Zemin kayma dalga hızlarının 1000m/s ve 700 m/s olması durumunda temel yerdeğiştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin h/r parametresine bağlı olarak değişimleri

Kayma Dalga Hızı(m/s)	$m_0/m=0$ $e/r=0.2$					
	$c_s=1000$			$c_s=700$		
Temel Yerdeğiştirmeleri (metre, radyan)	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)
$\frac{h}{r} = 1$	0.0235	0.0260	0.0190	0.0250	0.0400	0.0240
$\frac{h}{r} = 2$	0.0125	0.0140	0.0180	0.0120	0.0180	0.0225
$\frac{h}{r} = 3$	0.0075	0.0085	0.0165	0.0070	0.0110	0.0180

Tablo 4.9 Zemin kayma dalga hızlarının 500m/s ve 300 m/s olması durumunda temel yerdeğiştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin h/r parametresine bağlı olarak değişimleri

Kayma Dalga Hızı(m/s)	$m_0/m=0$ $e/r=0.2$					
	$c_s=500$			$c_s=300$		
Temel Yerdeğiştirmeleri (metre, radyan)	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)
$\frac{h}{r} = 1$	0.0265	0.0570	0.0320	0.0170	0.0600	0.0430
$\frac{h}{r} = 2$	0.0115	0.0230	0.0250	0.0062	0.0230	0.0300
$\frac{h}{r} = 3$	0.0060	0.0130	0.0190	0.0035	0.0130	0.0200

Tablo 4.10 Zemin kayma dalga hızlarının 1000m/s ve 700 m/s olması durumunda temel yerdeğiştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin m_0/m parametresine bağlı olarak değişimleri

Kayma Dalga Hızı(m/s)	e/r=0.2 h/r=0.6					
	$c_s = 1000$			$c_s = 700$		
	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)
$\frac{m_0}{m} = 0$	0.028	0.033	0.013	0.034	0.051	0.020
$\frac{m_0}{m} = 1$	0.028	0.028	0.015	0.034	0.048	0.022
$\frac{m_0}{m} = 2$	0.030	0.025	0.016	0.035	0.042	0.025

Tablo 4.11 Zemin kayma dalga hızlarının 500m/s ve 300 m/s olması durumunda temel yerdeğiştirme bileşenlerinin maksimum değerlerinin m_0/m parametresine bağlı olarak değişimleri

Kayma Dalga Hızı(m/s)	e/r=0.2 h/r=0.6					
	$c_s = 500$			$c_s = 300$		
	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)	Yanal Öteleme (u_0)	Eğilme Dönmesi (γ_0)	Burulma Dönmesi (θ_0)
$\frac{m_0}{m} = 0$	0.037	0.070	0.028	0.032	0.110	0.053
$\frac{m_0}{m} = 1$	0.037	0.069	0.030	0.032	0.090	0.055
$\frac{m_0}{m} = 2$	0.040	0.068	0.032	0.032	0.070	0.060

Yukarıdaki Tablolardan (4.8 ve 4.9) görülüyor ki yapı narinleştikçe yani h/r (kat yüksekliğini, eylemsizlik yarıçapına oranı) artıkça, temelin yanal-öteleme, eğilme(devrilme)-dönme ve burulma-dönme yerdeğiştirmeleri azalmaktadır. Buna karşın zemin koşulları yumuşadıkça orta derecede narin ve basık yapıların temel eğilme-dönme ve burulma-dönme yerdeğiştirmeleri artmaktadır.

Temel kütlesi büyüdükçe yani m_o/m (temel kütlesinin kat kütlesine oranı) artıkça, temelin yanal-öteleme ve eğilme(devrilme)-dönme yerdeğiştirmeleri değişmezken, burulma-dönme yerdeğiştirmesi artmaktadır. Bununla birlikte orta derecede narin ve basık yapılar için, zemin rijitliği azaldıkça temel yerdeğiştirme bileşenlerinin değerleri artmaktadır (Tablo 4.10 ve 4.11).

e/r (dış merkezliğin, eylemsizlik yarıçapına oranı) artarken temelin burulma-dönme yerdeğiştirmesi artmaktadır. Buna karşın temel yanal öteleme ve eğilme-dönme değerleri azalmaktadır. Zemin yumuşadıkça temel yerdeğiştirme bileşenleri orta derecede narin ve basık yapılar için artmaktadır (Tablo 4.6-7).

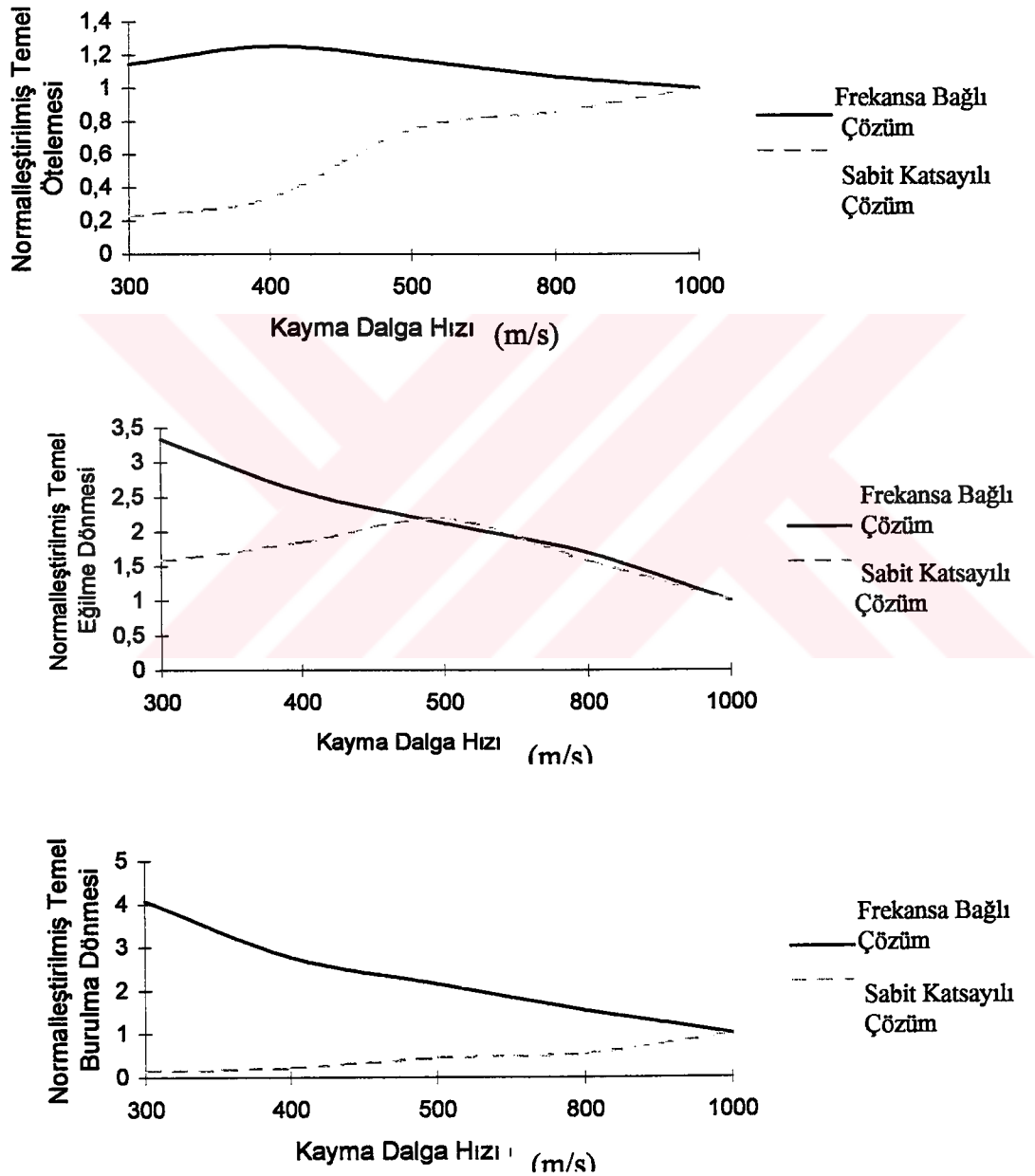
Zemin malzeme sönümünün (β), geliştirilen çözüm yönteminde hesaba katılmasıyla, temel yerdeğiştirme bileşenlerinde bir azalma meydana getirmektedir (Tablo 4.12).

Tablo 4.12 Örnek sistemde, elastik ve visko elastik zemin durumları için temel yerdeğiştirme büyüklüklerinin karşılaştırılması

	$m_o/m=0$ $e/r=0.2$ $h/r=0.6$					
Malzeme sönüm Oranı	$\beta=0.00$			$\beta=0.05$		
Temel Yerdeğiştirmeleri (metre, radyan)	Yanal Öteleme (u_o)	Devrilme Dönmesi (γ_o)	Burulma Dönmesi (θ_o)	Yanal Öteleme (u_o)	Devrilme Dönmesi (γ_o)	Burulma Dönmesi (θ_o)
$c_s=1000$ m/sn	0.028	0.033	0.013	0.025	0.023	0.011
$c_s=700$ m/sn	0.034	0.051	0.020	0.030	0.040	0.015
$c_s=500$ m/sn	0.037	0.070	0.028	0.035	0.063	0.025
$c_s=300$ m/sn	0.032	0.110	0.053	0.030	0.100	0.043

4.3 GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİNİN ETKİNLİĞİNİ GÖSTEREN UYGULAMALAR

Frekanstan bağımsız (sabit katsayılı) temel empedans fonksiyonları, normal mod yaklaşımı ile birlikte kullanılarak, harmonik yer hareketi ile titreştirilen iki katlı yapı-zemin örnek sisteminin temel yerdeğiştirme bileşenlerine ait büyüklükler, farklı zemin koşulları için elde edilmiştir. Frekansa bağlı çözüm yaklaşımına göre elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Şekil 4.13).



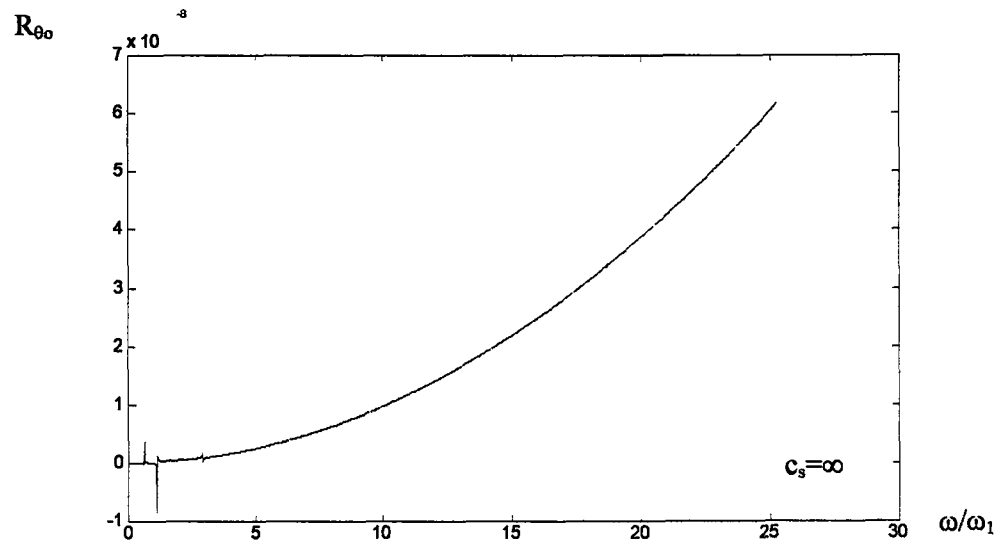
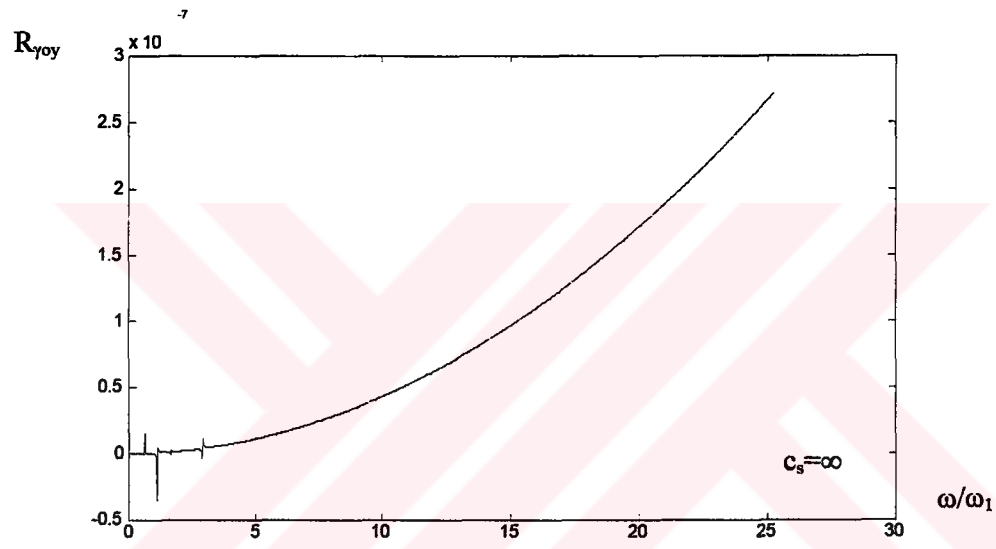
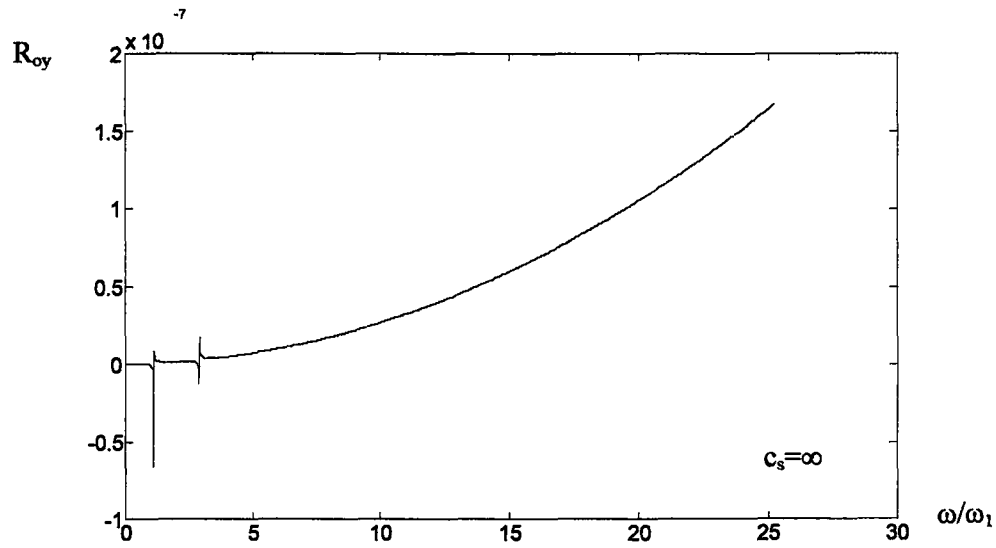
Şekil 4.13 Frekansa bağlı ve frekanstan bağımsız çözüm yaklaşımlarından elde edilen boyutsuz temel büyüklüklerine ait sonuçların karşılaştırılması

Frekanstan bağımsız empedanslar kullanılarak elde edilen temel öteleme, eğilme dönme ve burulma dönme büyüklükleri, rijit zemin koşullarında elde edilen büyüklüklere göre boyutsuzlaştırılmıştır. Hesap edilen bu büyüklüklerin frekansa bağlı çözüm yaklaşımından elde edilen dinamik büyüklüklerden saptığı görülmektedir. Zemin kayma dalga hızı azaldıkça, sonuçlardaki farklılık artmaktadır (Şekil 4.13).

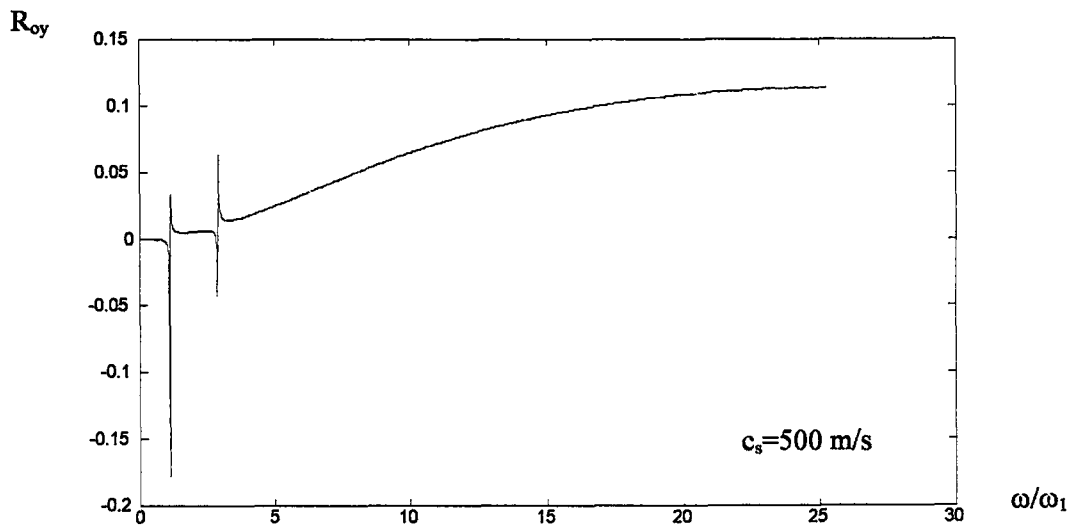
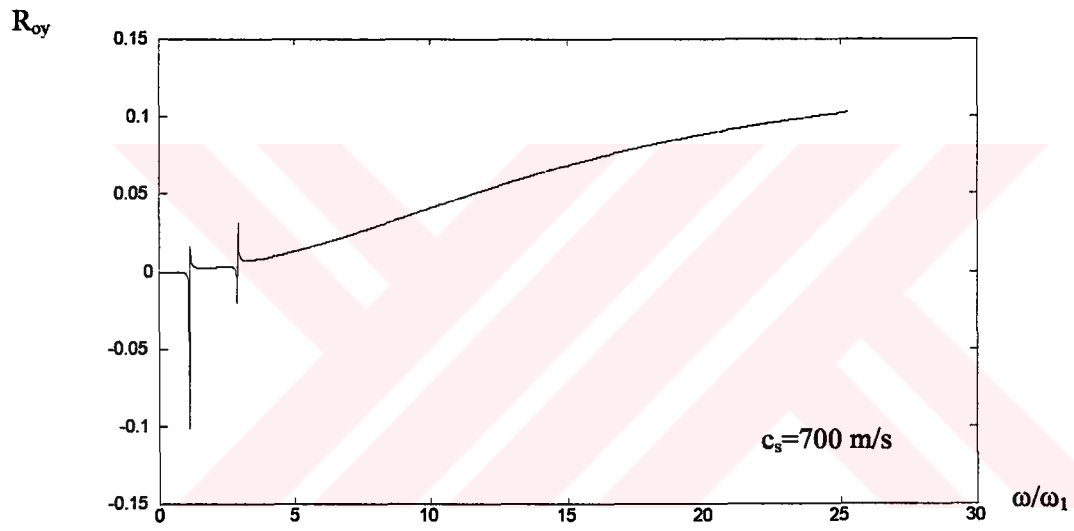
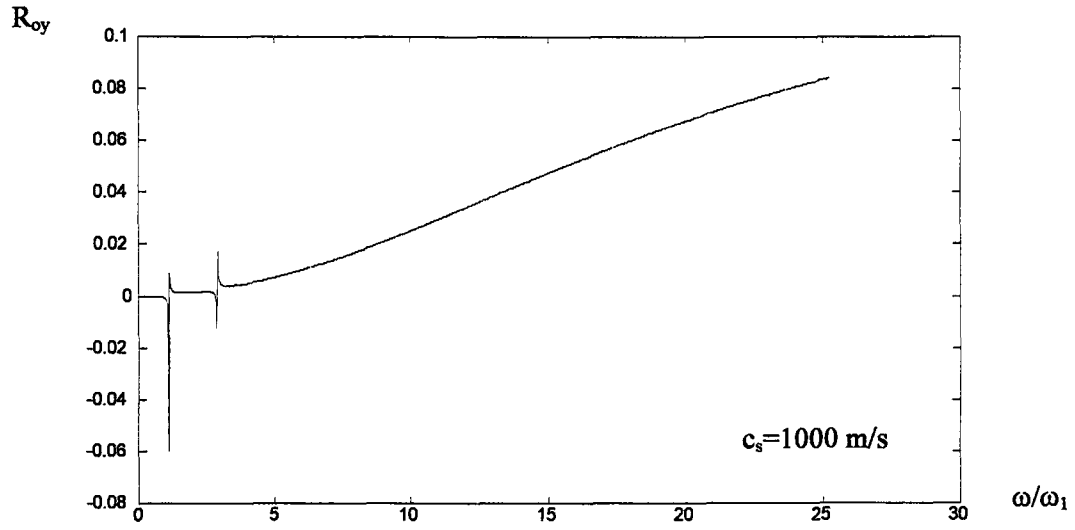
Özellikle bu örnekte, kayma dalga hızı 500 m/s den daha küçük değerler aldığında, sabit katsayılı empedanslarla hesap edilen boyutsuz değerlerin frekansa bağlı değerlerden uzaklaştığı görülmektedir. Sonuçlardaki bu farklılık temelin burulma dönmesi ve yanal ötelemesinde daha da belirginleşmektedir.

İleri sürülen çözüm yöntemlerinde, temel tabanı ile elastik yarı sonsuz düzlem arakesitinde yazılan etkileşim kuvvetlerinin dinamik rijitlik matrisini oluşturan empedans fonksiyonlarının frekansa bağlı değil de, sabit katsayılarla ifade edilmiş olması, yapı-zemin etkileşim problemini özellikle çok serbestlik dereceli sistemler için doğru bir şekilde temsil etmediğini göstermektedir.

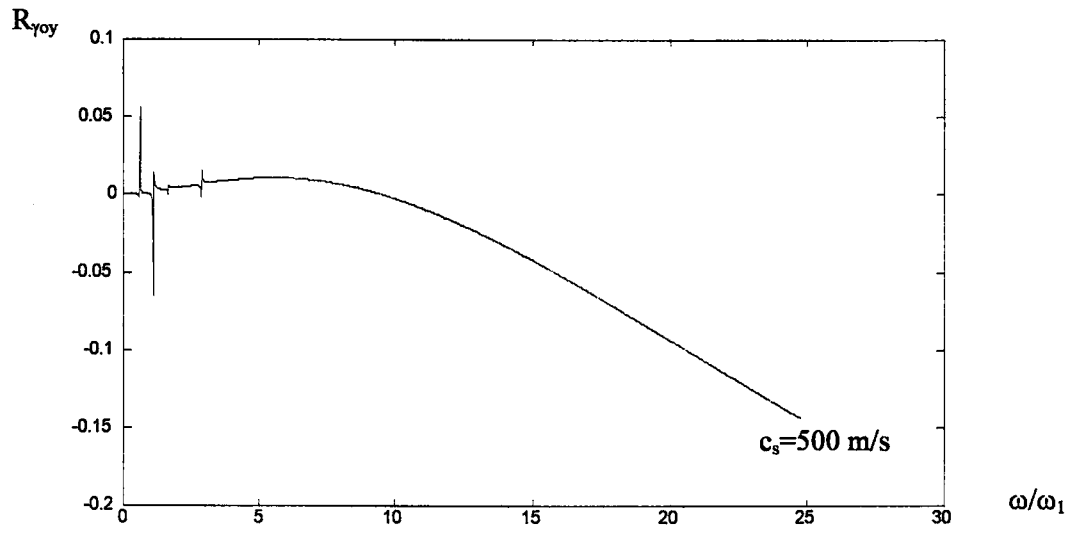
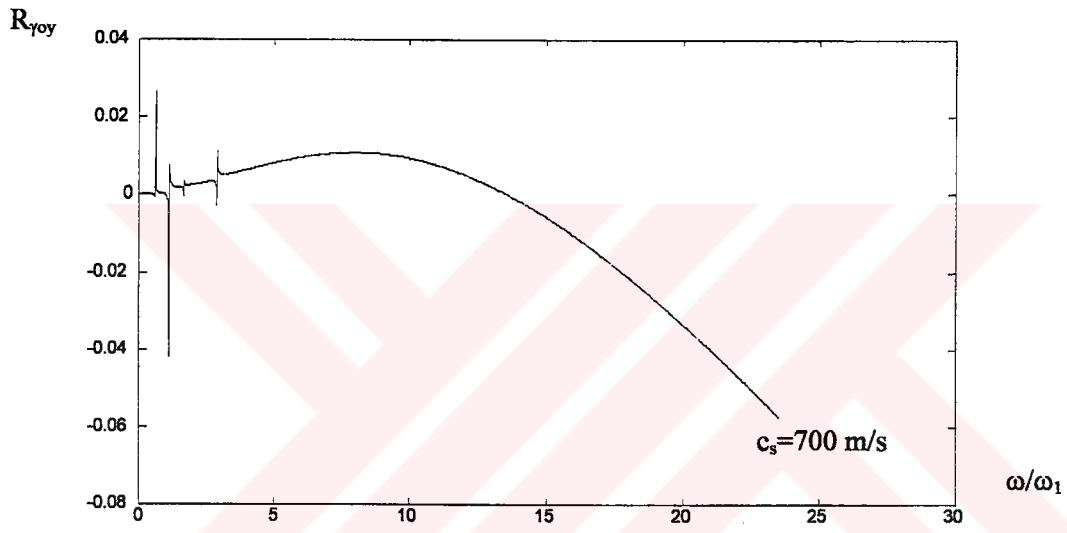
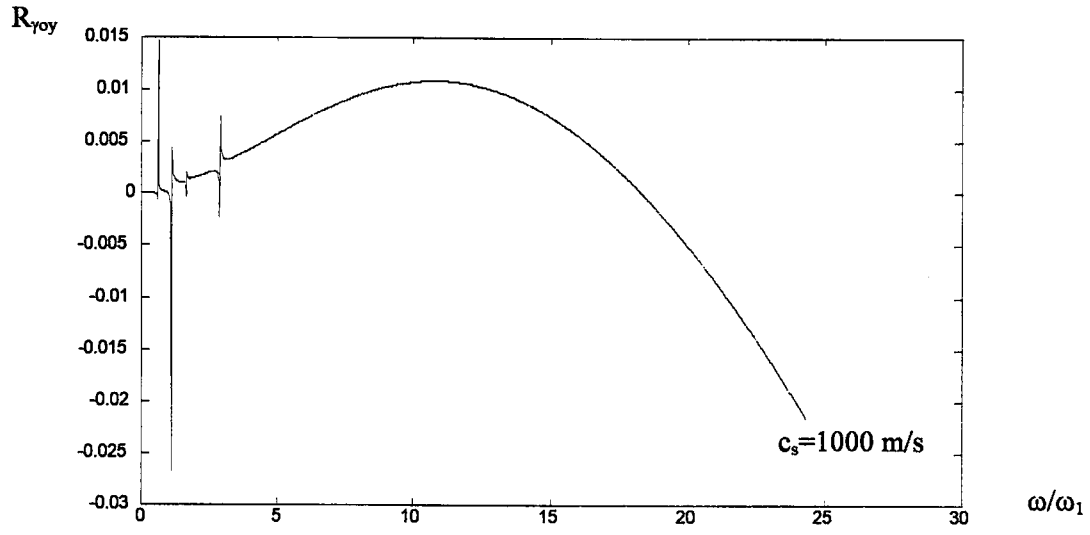
Modal analiz açısından, üstyapı-zemin ortak sisteminde, birinci titreşim modunun sistemin davranışına en büyük oranda katkıda bulunduğu düzlem çerçeve sistemler için geçerliliğini korumasına rağmen gözönüne alınan iki katlı örnek sistemin temel transfer fonksiyonları (2.71 nolu bağıntı) incelendiğinde tek moda göre çözümün bu tip burulmalı bağlaşıklık yapılarda etkili olmadığı görülmektedir. Çalışmanın bu kısmında, zeminin kayma dalgası yayılma hızları farklı alınarak ($c_s=1000$ m/s, $c_s=700$ m/s, $c_s=500$ m/s) temel öteleme, eğilme-dönme, burulma-dönme transfer fonksiyonları, üstyapının temel titreşim frekansına göre boyutsuzlaştırılmış titreşim frekansına bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 4.15-4.17). İlk aşamada örnek yapı sisteminin zemine rijit bağlı durumu için temel transfer fonksiyonları elde edilmiştir (Şekil 4.14). Temel yerdeğiştirme bileşenlerine ait transfer fonksiyonlarının aldığı değerlerin sanal kısımları sıfıra çok yakın olduklarından, eğrilerde sadece gerçel kısımlarının değişimi gösterilmiştir.



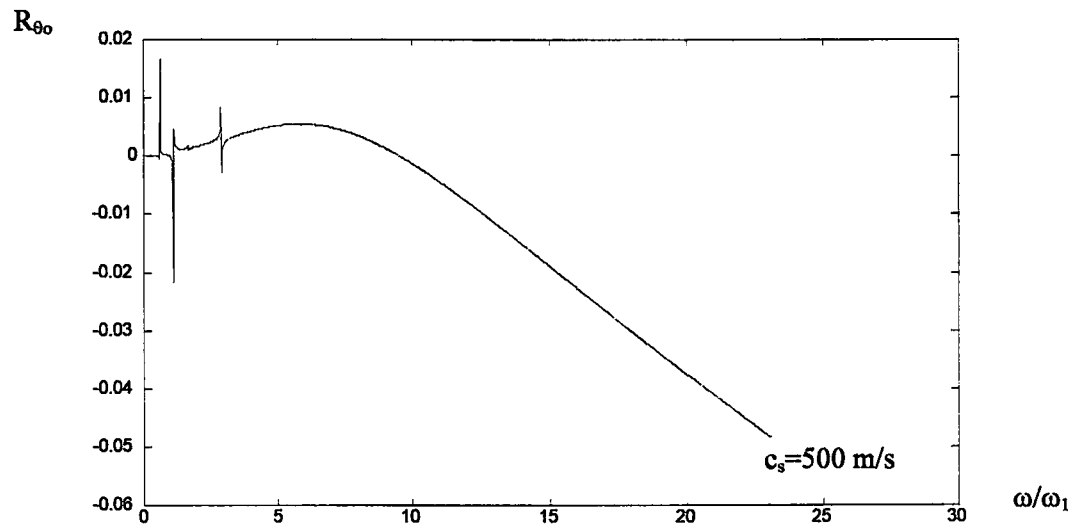
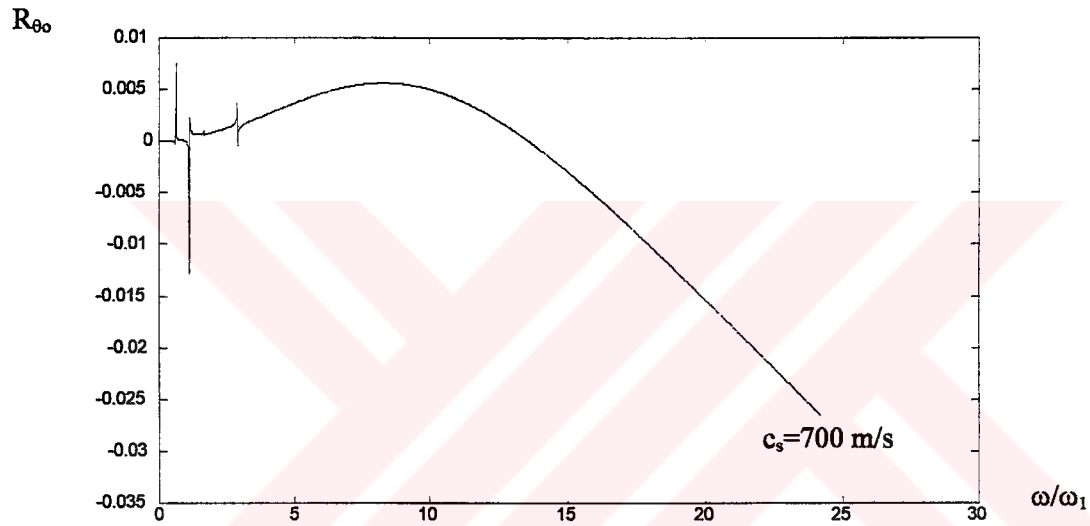
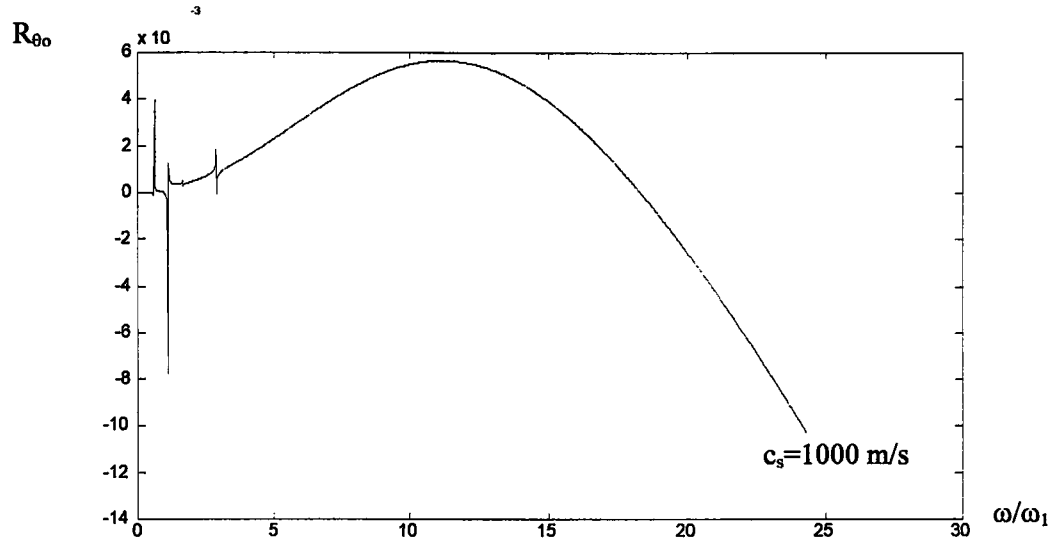
Şekil 4.14 Zemine rijit bağlı sistemin temel transfer fonksiyonları



Şekil 4.15 Farklı kayma dalga hızlarına göre temel öteleme transfer fonksiyonları



Şekil 4.16 Farklı kayma dalga hızlarına göre temel eğilme-dönme transfer fonksiyonları



Şekil 4.17 Farklı kayma dalga hızlarına göre temel burulma-dönme transfer fonksiyonları

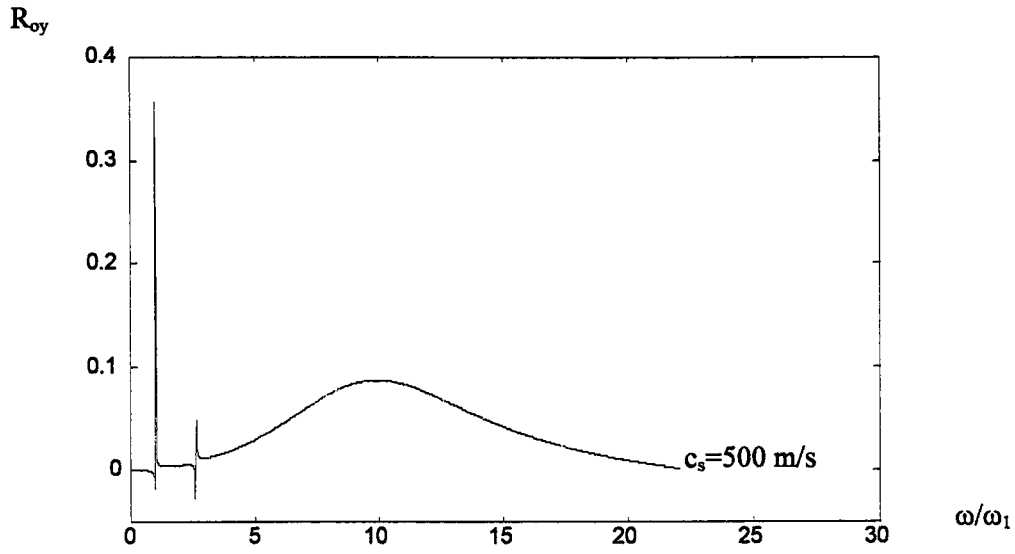
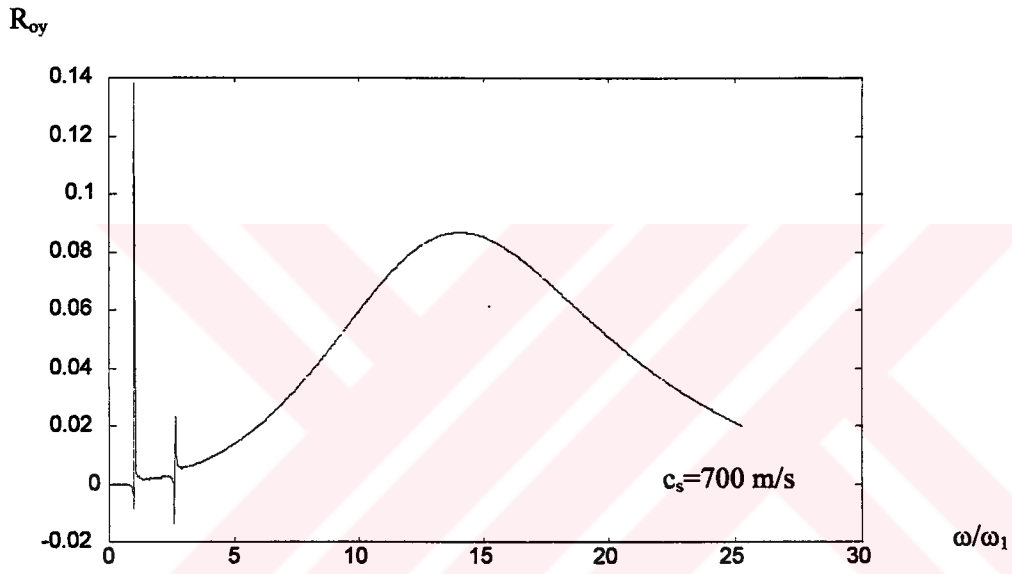
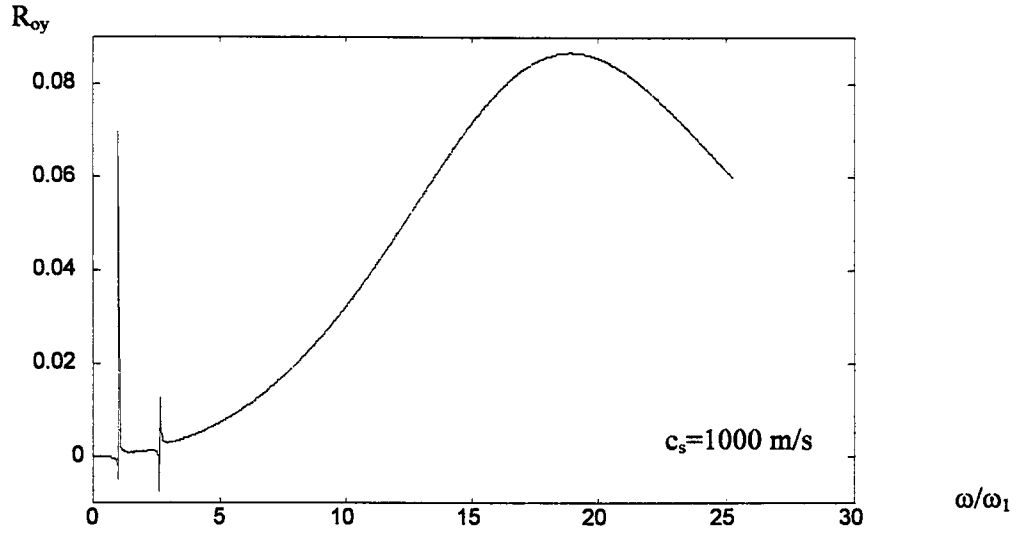
Örnek sistem zemine rijit bağlı olarak incelendiğinde, temel transfer fonksiyonları beklenildiği gibi sıfır değerine yaklaşmaktadır (Şekil 4.14). Bu sonuçlardan temelde öteleme, eğilme ve burulma hareketinin söz konusu olmadığı anlaşılmaktadır. Zemin kayma dalga hızı değerleri küçüldükçe, temel transfer fonksiyonlarının aldığı değerler büyümektedir. Buradan temel ortamı yumuşadıkça, temel transfer fonksiyonlarının yer hareketine etkisinin artmakta olduğu görülmektedir (Şekil 4.15-4.17). Temel öteleme transfer fonksiyonuna ait eğriler dışındaki eğilme-dönme ve burulma-dönme transfer fonksiyon eğrileri incelendiğinde, yer hareketine en büyük etkinin bu örnek için ikinci mod da olduğu görülmektedir (Şekil 4.14, 4.16, 4.17). İkinci mod da en büyük değerleri alan temel eğilme ve burulma transfer fonksiyonları, yer hareketinin de bu frekanslar civarında en büyük değerini alması durumunda, temel eğilme ve burulma açıları ikinci mod da en büyük değerlerine ulaşacaktır.

Geliştirilen matematik model üzerinde, zeminde meydana gelen enerji kaybını eşdeğer anlamda ifade eden söndürücüler etkisiz hale getirilerek, dinamik etkileşim problemlerinde yer hareketine etkisini gösteren temel transfer fonksiyonları aynı örnek sistem için farklı kayma dalga hızlarına göre tekrar incelenmiştir, ve daha önce elde edilen temel transfer fonksiyonlarıyla karşılaştırılarak radyasyon sönümünün etkisi değerlendirilmiştir. Radyasyon sönümünün transfer fonksiyonları üzerinde önemli derecede azaltıcı bir etkisi olduğu sonucu özellikle yumuşak zeminlerde açıkça görülmektedir (Tablo 4.13).

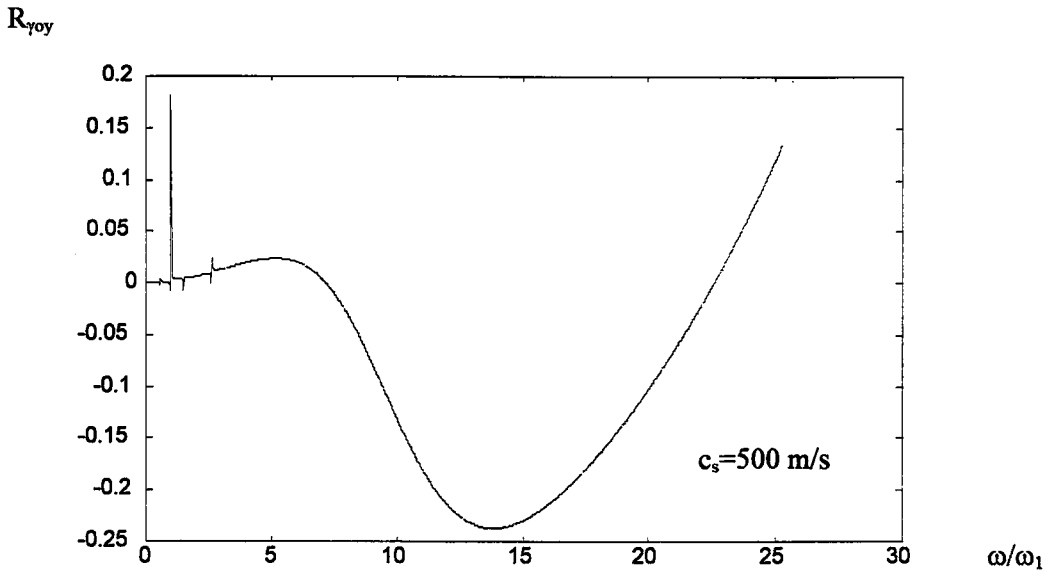
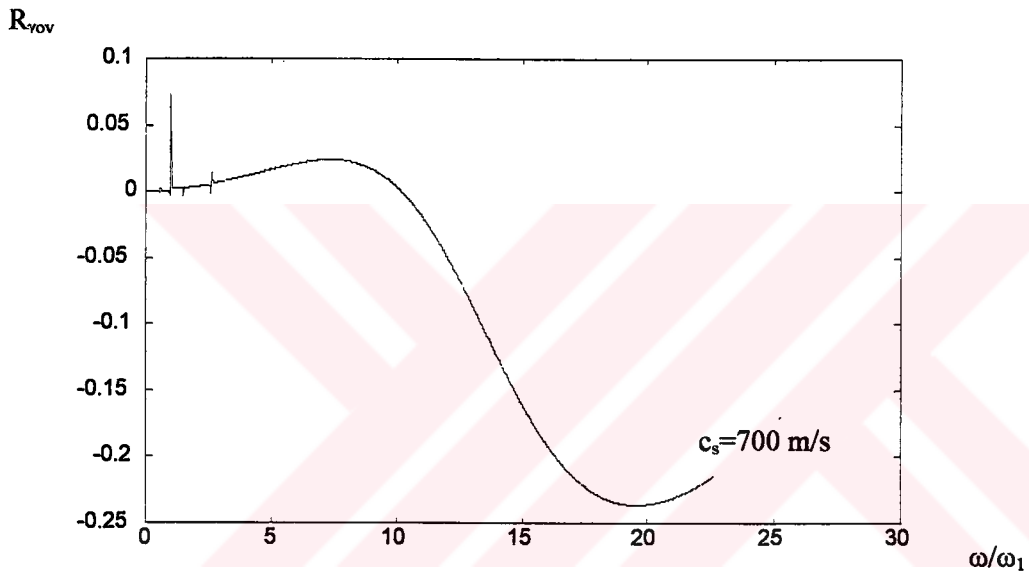
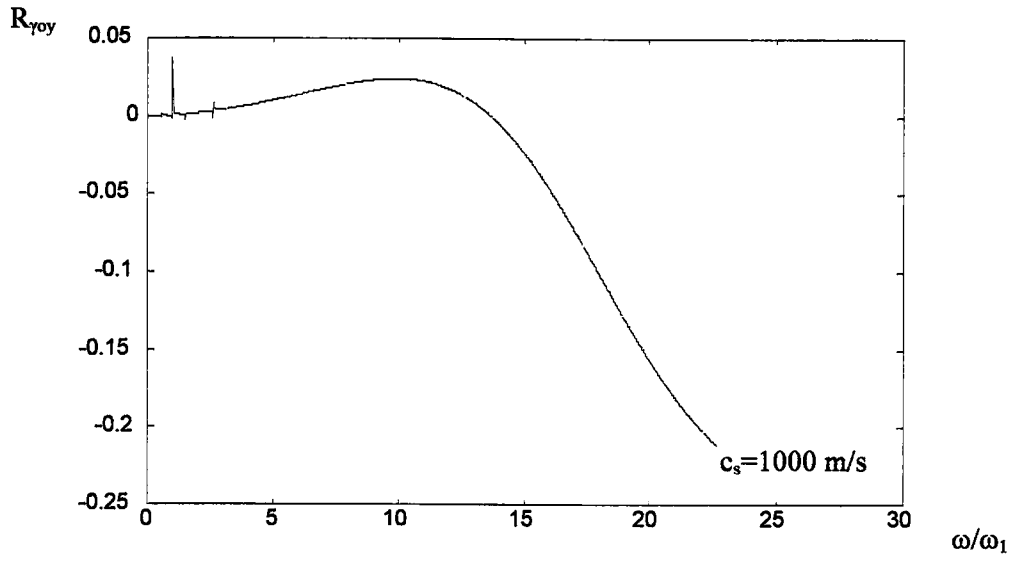
Tablo 4.13 Radyasyon sönümünün ihmal edildiği durumlarda temel öteleme ve eğilme-dönme transfer fonksiyonlarının değişimi

c_s (m/s)	R_{oy}	R_{oy} (radyasyon sönümü yok)	%	$R_{\gamma oy}$	$R_{\gamma oy}$ (radyasyon sönümü yok)	%
1000	0.059	0.070	20	0.027	0.040	45
700	0.100	0.140	40	0.040	0.075	90
500	0.180	0.360	100	0.060	0.180	300

Sisteme ait radyasyon sönümü kaldırıldığında, temel transfer fonksiyonlarının aldığı değerler, radyasyon sönümünün dikkate alındığı durumdaki transfer fonksiyonlarına ait değerlerle karşılaştırıldığında büyüdüğü gözlemlenmektedir (Şekil 4.18-4.19).



Şekil 4.18 Farklı kayma dalga hızlarına göre temel öteleme transfer fonksiyonları (Radyasyon sönümü ihmal edilmiş)



Şekil 4.19 Farklı kayma dalga hızlarına göre temel eğilme-dönme transfer fonksiyonları (Radyasyon sönümü ihmal edilmiş)

5. SONUÇLAR

Planda simetrik olmayan çok katlı yapıların zemin-yapı etkileşim probleminin incelendiği bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

a-) Dinamik zemin-yapı etkileşim problemlerinde, radyasyon dalgalarının meydana getirdiği enerji kaybını ifade eden sönüm katsayılarının ve zemin rijitliğinin frekansa bağımlı olması, ortak sisteme ait hareket denklemlerinin çözümünü karmaşık hale getirmektedir. Bu yüzden birçok araştırmacı titreşim kaynağının frekansından bağımsız sabit değerli temel empedans katsayıları kullanarak, ancak yaklaşık çözümler elde etmişlerdir. Bu çalışmada, frekansa bağlı empedans fonksiyonları ve normal mod yaklaşımı, geliştirilen matematik model üzerinde uygun biçimde kullanılarak basitleştirilmiş bir çözüm yöntemi ortaya konulmuştur.

Frekansa bağlı empedans fonksiyonlarının önerilen yöntemle hassas ve kolay hesabı mümkün olmaktadır; çözümler, birim genlikli harmonik yer hareketi ile titreştirilen örnek sistemin, doğrudan çözüm yöntemi ile bulunan çözümlerine oldukça yakın olduğu frekans davranış eğrilerinden görülmektedir.

İleri sürülen çözüm yöntemlerinde, temel tabanı ile elastik yarı sonsuz düzlem arakesitinde yazılan etkileşim kuvvetlerinin dinamik rijitlik matrisini oluşturan empedans fonksiyonlarının frekansa bağlı değil, sabit katsayılarla ifade edilmiş olması, yapı-zemin etkileşim problemini, özellikle çok serbestlik dereceli sistemler için, doğru bir şekilde temsil etmediğini göstermektedir.

b-) Zeminin etkisi ile üstyapının davranışında meydana gelen değişimi saptamak amacı ile, temelin yerdeğiştirme bileşenlerine ait transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Modal analiz açısından, üstyapı-zemin ortak sisteminde, birinci titreşim modunun sistemin davranışına en büyük oranda katkıda bulunduğu düzlem çerçeve sistemler için geçerliliğini korumasına rağmen çok serbestlik dereceli sistemlerde tek moda göre

çözümün, özellikle burulmalı bağlaşıp yapılarıda yeterli olmadığı, gözönüne alınan örnek sistemin temelinin transfer fonksiyonları incelendiğinde görülmektedir.

Geliştirilen matematik model üzerinde, zeminde meydana gelen enerji kaybını eşdeğer anlamda ifade geometrik sönüm ihmal edilerek, dinamik etkileşim problemlerinde yer hareketine etkisini gösteren temel transfer fonksiyonları, farklı kayma dalga hızlarına göre incelenmiş ve daha önce elde edilen temel transfer fonksiyonlarıyla karşılaştırılarak radyasyon sönümünün transfer fonksiyonları üzerinde önemli derecede azaltıcı bir etkisi olduğu tespit edilmiştir; bu fark özellikle yumuşak zeminlerde açıkça görülmektedir.

c-) Zeminin şekil değiştirebilir özelliğinin, planda simetrik olmayan çok katlı yapıların deprem yer etkisi altındaki çözümünde dikkate alınmasıyla elde edilen sayısal sonuçlar, söz konusu yapının zemine rijit mesnetlenmesi durumuna göre sonuçlarla karşılaştırıldığında, temel tabanı burulma momentinde ve buna bağlı olarak kat burulma momentlerinde önemli artışlar meydana geldiği görülmektedir. Bundan dolayı zemine rijit bağlı varsayımı yapının gerçek davranışını ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Taşıyıcı sistemlerde burulma momentinden meydana gelecek ek etkilerin ihmal edilmesi, yapıların depreme karşı boyutlandırılmasında önemli bir hataya sebep olacaktır.

d-) Üstyapıdan zemine doğru yayılan dalgaların sınırsız zemin ortamında geri dönemeyip sistemde bir enerji kaybına neden olmaktadır. Bu enerji kaybı, frekansa bağlı değiştiğinden, üstyapı için ek bir viskoz sönüm etkisine karşı gelmektedir. Verilen deprem yer hareketi ve çeşitli elastik zemin kayma dalgası hızları için, temel öteleme ve yerdeğiştirme bileşenlerinin zaman bölgesindeki değişimleri incelendiğinde, zemin yumuşadıkça üstyapının temele göre elastik yerdeğiştirmesinin azaldığı, buna karşın katların toplam yerdeğiştirmesinin arttığı; rijit temele nispetle zemin yumuşadıkça yapı taban kesme kuvvetinin azaldığı gözlenmiştir.

e-) Zemin rijitliğindeki azalmanın yapının titreşim periyodunu artırdığı bilinmektedir. Sayısal uygulamalar sonucu elde edilen frekans davranış eğrilerinden, zemin ortamı yumuşadıkça frekans oranının küçülmesi, bu artışın göstergesidir. Ayrıca frekans davranış eğrilerinden hareketle, şekil değiştirebilir zemin durumları için, yapı-zemin ortak sisteminin viskoz sönüm oranı hesap edilebilmektedir.

f-) Zemin-yapı etkileşim problemlerinde, incelenen üstyapıya ait dinamik büyüklükler, zeminin homogen, izotropik, elastik yarı düzlem olduğu kabullerine dayanır. Temel empedans fonksiyonları bu varsayıma göre elde edilmiştir. Zeminin malzeme sönümü ihmal edilmiştir. Yarı düzlemin elastik değil de, visko-elastik düşünülmesi, geliştirilen matematik modelde ve buna bağlı dinamik denge denklemlerinin çözümünde fazla bir değişiklik yapmayı gerektirmemektedir. Sadece temelin dinamik rijitlik matrisinde küçük bir ilave yapılarak söz konusu değişikliğin giderilmesi, bu yönteminin yaygın olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Sayısal sonuçlarda, zemin malzeme sönümünün dikkate alınması ile temelin yerdeğiştirme bileşenlerinde nisbi bir azalma meydana geldiği görülmektedir.

g-) Ayrıca temelin yerdeğiştirme bileşenleri için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Birim genlikli harmonik yer hareketi ile titreştirilen yapı-zemin ortak sistemi, farklı zemin durumları için h/r (kat yüksekliğinin eylemsizlik yarıçapına oranı), e/r (dış merkezliğin eylemsizlik yarıçapına oranı) ve m_0/m (temel kütlesinin kat kütlesine oranı) boyutsuz parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir. Bu parametrelerden her defasında bir tanesi değiştirilmiş, diğerleri sabit tutulmuştur.

Yapı narinleştikçe, yani h/r (boyutsuz kat yüksekliği) arttıkça, temelin yanal-öteleme, eğilme(devrilme)-dönme ve burulma-dönme yerdeğiştirmeleri azalmaktadır. Bu sonuç değerlendirildiğinde, kat yüksekliğinin artması, kat rijitliğinin azalmasına göre daha az etkin olduğundan, yapıya gelen kesme kuvveti azalacaktır ve buna bağlı olarak kata etkiyen yatay kuvvetlerin etkileri küçülecek, devrilme momentlerinin azalmasına neden olacaktır.

Temel kütlesi büyüdükçe, yani m_0/m (boyutsuz temel kütlesi) arttıkça, temelin yanal-öteleme ve eğilme(devrilme)-dönme yerdeğiştirmeleri değişmezken, burulma-dönme yerdeğiştirmesi artmaktadır. Bu sonuç değerlendirildiğinde, temel kütlesinin artmasıyla periyot artacaktır. Periyodun artması spektral ivme eğrisinde daha küçük bir spektral ivme katsayısı bulunmasına sebep olacaktır. Kütlenin artması, spektral ivme katsayısının küçülmesi, yapıya ait dinamik büyüklüklerde önemli bir değişiklik olmayacağını göstermektedir. Boyutsuz kat dışmerkezliği artarken temelin burulma-dönme yerdeğiştirmesi artmaktadır. Buna karşın temelin yanal-öteleme ve eğilme-dönme yerdeğiştirmeleri azalmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Bozorgnia, Y. , Tso, W. , 1986.** Inelastic earthquake response of asymmetric structures, *J. Struct. Engng.*, ASCE 112, 383-400.
- [2] **Tsienias, T. G. , Hutchinson, G. L. , 1981.** Evaluation of code requirement for the earthquake resistant design of torsionally coupled buildings, *Proc. Inst. Civil Engrg.*, Part 2, 71, 821-843.
- [3] **Hejal, R. , Chopra, A. K. , 1989.** Earthquake response of torsionally coupled frame buildings, *J. Struct. Engng.* , 115 (4) , 834-851.
- [4] **Chandler, A. M. , Hutchinson, G. L. , 1986.** Torsional coupling effects in earthquake response of asymmetric buildings, *Engng. Struct.*, 8, 222-236.
- [5] **Newmark, N. L. , Hall, W. J. , 1976.** *Vibration of structures induced by ground motion*, Chapter 29, part 1, in *Shock and Vibration Handbook*, 2nd Edn. , McGraw-Hill, New York.
- [6] **Hejal, R. , Chopra, A. K. , 1989.** Earthquake analysis of a class of torsionally-coupled buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 118, 305- 323.
- [7] **Kan, C. L. , Chopra, A. K. , 1977.** Elastic earthquake analysis of a class of torsionally-coupled multistorey buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 5, 395-412.
- [8] **Kan, C. L. , Chopra, A. K. , 1977.** Elastic earthquake analysis of a class of torsionally-coupled buildings, *Journal of the structural division*, 103, April, 1977, 821-838.
- [9] **Karasudhi, P. , Balendra, T. , Lee, S. L. , 1975.** An efficient method of seismic analysis of structure-foundation systems. *Geotechnical Engng.*, 6, 133-154.
- [10] **Lin, Y. K. , Wu, W. F. , 1984.** A closed form earthquake response analysis of multistorey building on compliant soil, *J. Struct. Mech.*, 12, 87-110.
- [11] **Sivakumaran, K. S. , Balendra, T. ,1987.** Seismic response of multistorey buildings including foundation interaction and P- Δ effects, *Engng. Structures*, 9, 277-284.

- [12] **Luco, J. E.** , 1986. Soil-structure interaction effects on the seismic response of tall chimneys, *Soil Dynamics and Earthquake Engng.*, **5**, 170-177.
- [13] **Aydinoğlu, M. N.** , 1994. Yapı analizi ve tasarım sürecinde statik ve dinamik yapı-zemin etkileşimi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, 218-229, ODTÜ, Ankara.
- [14] **Liu, S. C.** , **Fagel, L. W.** , 1971. Earthquake interaction by fast Fourier transform, *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, **97**, 1223-1237.
- [15] **Veletsos, A. S.** , **Wei, Y. T.** , 1971. Lateral and rocking vibrations of footings, *J. Soil Mech. Found. Div. , ASCE*, **97 (SM 9)**, 1127-1248.
- [16] **Schmidt, G.** , **Willms, G.** , **Huh, Y.** , **Gibhard, M.** , 1988. SSI 2D/3D, Ein programmsystem zur berechnung von bauwerk-boden-wechselwirkung-problemen mit der randelementmethode, *Sonderforschungsbereich Tragwerkdynamik*, 151, Ruhr Universität, Bochum.
- [17] **Veletsos, A. S.** , 1977. Dynamics of structure-foundation systems, in *Structural and Geotechnical Mechanics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [18] **Luco, J. E.** , 1974. Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium, *Nuclear Engng. and Design*, **31**, 204-217.
- [19] **Cooley, J. W.** , **Tukey, J. W.** , 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematical Computation*, **19**, 297-301.
- [20] **Bergland, G. D.** , 1969. A guided tour of the fast Fourier transform, *IEEE Spectrum*, **6**, 41-52.
- [21] **Chopra, A. K.** , **Gutierrez, J. A.** , 1977. Earthquake response analysis of multistorey buildings including foundation interaction, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* , **3**, 65-77.
- [22] **Vaish, A. K.** , **Chopra, A. K.** , 1973. Earthquake analysis of structure-foundation systems, Report No. EERC 73-9, *Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, California.
- [23] **Roesset, J. M.** , **Whitman, R. V.** , **Dobry, R.** , 1973, Modal analysis for structures with foundation interaction, *J. Struct. Div. ASCE*, **99**, 399-416.
- [24] **Vaidya, N. R.** , **Bazan-Zurita, E.** , **Rizzo P. C.** , 1986. On the validity of modal superposition technique in soil-structure interaction analysis, *Proc. 3rd U.S. National Conf. Earthquake Eng.* , Charleston, SC, 1, 683-692.
- [25] **Bielak, J.** , 1976. Modal analysis for building-soil interaction, *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, **102**, 771-786.

- [26] **Veletsos, A. S. , Meek, J. W. ,** 1974. Dynamic behaviour of building-foundation systems, *Int. J. Earth. Engng. Struct. Dyn.* , **3**, 121-138.
- [27] **Bycroft, G. N. ,** 1956. Forced vibrations of a rigid circular plate on a semi-infinite elastic space and on an elastic stratum, *Philosophical Transactions, Royal Society of London, Series A*, **948(248)**, 327-368.
- [28] **Jennings, P. C. , Bielak, J. ,** 1972. Dynamics of building-soil interaction, *Report, EERL 71-04, Earthquake Engineering Research Laboratory*, California Institute of Technology.
- [29] **Tsai, N. C. , Niehoff, D. , Swatta, M. , Hadjian, A. H. ,** 1974. The use of frequency-independent soil-structure interaction parameters, *Nuclear Engng. and Design*, **31**, 168-183.
- [30] **Parmelee, R. A. , Perelman, D. S. , Lee, S. L. ,** 1969. Seismic response of multiple-story structures on flexible foundations, *Bull. Seismol. Soc. Amer.* , **59 (3)**, 1061-1070 .
- [31] **Richart, F. E. , Hall, J. R. , Woods R. D. ,** 1970. Vibrations of soils and foundation, Prentice-Hall, Inc. , Englewood Cliffs, New Jersey.
- [32] **Ghaffer-Zadeh, M. , Chapel, F. ,** 1983. Frequency independent impedances of soil-structure systems in horizontal and rocking modes, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* , **11**, 523-540.
- [33] **Newmark, N. M. , Rosenblueth, E. ,** 1971. Fundamentals of earthquake engineering, 93-101, Prentice-Hall, Inc.
- [34] **Parmelee, R. A. , Wronkiewicz, J. H. ,** 1971. Seismic design of soil-structure interaction systems, *Journal of the Structural Division, ASCE*, **97(ST10)**, 2503-2517.
- [35] **Whitman, R. V. ,** 1969. Equivalent lumped system for structure founded upon stratum of soil, *Proc. IV. World Conference on Earthquake Engng.* , **A6**, 133-142, Santiago, Chile.
- [36] **Wu, W. H. , Smith, A. ,** 1995. Efficient modal analysis for structures with soil-structure interaction, *Earthquake Engng. and Struct. Dynamics*, **24**, 283-299.
- [37] **Veletsos, A. S. , Wei, Y. T. ,** 1971. Lateral and rocking vibrations of footings, Report No. 8, *Structural Research at Rice*, Department of Civil Engineering, Rice University, Houston, Texas.

- [38] **Balendra, T. , Tat, C. W. , Lee, S. L. ,** 1982. Modal damping for torsionally coupled buildings on elastic foundation, *Earthquake Engng. and Struct. Dynamics*, **10**, 735-756.
- [39] **Tsicnias, T. G. , Hutchinson, G. L. ,** 1984. Soil-structure interaction effects on the steady-state response of torsionally coupled buildings, *Earthquake Engng. and Struct. Dynamics*, **12**, 237-262.
- [40] **Sivakumaran, K. S. ,** 1990. Seismic analysis of mono-symmetric multistorey buildings including foundation interaction, *J. Comput. Struct.*, **36**, 99-107.
- [41] **Lin, M. S. ,** 1991. Seismic response of asymmetric multistorey buildings, *M. Eng. Thesis*, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- [42] **Sivakumaran, K. S. , Lin, M. S. , Karasudhi, P. ,** 1992. Seismic analysis of asymmetric building-foundation systems, *Computers & Structures*, **43**, 1091-1103.
- [43] **Veletsos, A. S. , Verbic, B. ,** 1974. Basic response functions for elastic foundations, *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, **100**, 189-202.
- [44] **Veletsos, A. S. , Nair, V. V. D. ,** 1974. Torsional vibration of viscoelastic foundations, *J. Geotech. Engng. Div. ASCE*, **100**, 225-246.
- [45] **Celep, Z. , Kumbasar, N. ,** 1991. Yapı dinamiği ve deprem mühendisliğine giriş, Sema Matbaacılık, İstanbul.
- [46] **Chopra, A. K. ,** 1995. Dynamic of structures, 342-350, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [47] **İpek, M. ,** 1991. Deprem dalgasının spektral analizine giriş, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [48] **Wolf, J. P. ,** 1985. Dynamic soil-structure interaction, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [49] **Reissner, E. ,** 1986. Stationäre, axialsymmetrische, durch eine schüttelnde masse erregte schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes, *Ingenieur-Archiv*, **7**, 381-396.
- [50] **Aydinoğlu, M. N. ,** 1977. Üstyapı-zemin ortak sisteminin deprem hesabı, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] **Kobori, T. ,** 1962. Dynamic response of rectangular foundations on an elastic space, *Proceedings of Japon National Symposium on Earthquake Engineering*, 81-86.

- [52] **Aydinoğlu, M. N. , Polat, Ş. Ş. , Beyen, K. , 1998.** Soil-structure interaction analysis via fixed-base system subjected to a modified ground motion, *US-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction*, California.
- [53] **Idriss, I. M. (Chairman) , 1980.** Analyses for soil-structure interaction effects for nuclear power plants, *Report by the Ad Hoc Group on Soil-Structure Interaction of the Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of ASCE*, New York.
- [54] **Güneş, A. , Yıldız, K. , 1997.** Matlab, Matematik ve grafik programlama dili, Türkmen Kitabevi, İstanbul.



EKLER

GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ İÇİN BİLGİSAYAR PROGRAMI

```
%PLANDA SİMETRİK OLMAYAN ÇOK KATLI YAPILARIN ZEMİNLE  
%DİNAMİK ETKİLEŞİMİ PROBLEMİNDE BİR ÇÖZÜM YÖNTEMİ  
% TEK YÖNDE SİMETRİK OLMAYAN İKİ KATLI BETONARME YAPI  
%Kütle matrisi(M),Rijitlik matrisi(K),Yapı elastisite modülü(Em),Birim matris(bii)  
% Kat kütle matrisi(m),Yapı boyutları(b,d), Zemin kayma modülü(g),  
% Zeminin birim hacim ağırlığı(roh), Poisson oranı(nu), Temel kütlesi(mo),  
%Kat yüksekliği vektörü(h), Temel döşemesi jirasyon yarıçapı(ro),  
%Kat döşemeleri jirasyon yarıçapları karesi vektörü(rr)  
% n(Deprem veri sayısı), kisi(Kritik sönüm oranı)  
% Birimler ton ve metre  
% e=1.0 ( Eksantrisite )  
  
M=[5 0 0 0;0.5 0 0 0;0 0 120 0;0 0 0 120];  
K=[5130 -2565 5130 -2565;-2565 2565 -2565 2565;5130 -2565 374490 -187245;-  
2565 2565 -187245 187245];  
mm=[5 0;0 5];  
bii=[1;1;1;1];  
h=[3;6];  
hh=[9;36];  
rr=[24;24];  
d=12;  
b=12;  
mo=0;  
ro=4.9;  
nu=0.33;  
g=100000;  
roh=2;  
kisi=0.05;  
n=1024;  
  
% Özdeğer Denklemi  
% Statik temel rijitlik katsayıları ve kayma dalgası yayılma hızı,  
[fi,wkare]=eig(K,M);  
wj=sqrt(wkare);  
[l,m1]=size(fi);  
k=0.5*1;  
for i=1:k  
bi(i,1)=bii(i,1);
```

```

end
aa=bi'*mm;
b=bi'*mm*h;
c=rr'*mm;
d=h'*mm;
cs=sqrt(g*10/roh);
kst=16*cs^2*roh*ro^3/3;
ksv=8*cs^2*roh*ro/(2-nu);
ksm=8*cs^2*roh*ro^3/(3*(1-nu));
itt=bi'*mm*rr+(mo*ro^2);
mt=bi'*mm*bi+mo;
it=bi'*mm*hh+itt;

%Modal matrisin ayrıklaştırılması
[l,m1]=size(fi);
k=0.5*l;
for i=1:k
for j=1:l
gamay(i,j)=fi(i,j);
gamat(i,j)=fi(k+i,j);
end
end
%Yer hareketi ivme kaydı,
%Mart 1992 Erzincan Depremi(Doğu-Batı bileşeni)
%Yapısız yer hareketi ivme kaydının hızlı Fourier dönüşümü

load a:\erzcew3.dat;
[n,m1]=size(erzcew3);
a1=erzcew3;
a=a1/100;
for kl=1:175
a(849+kl)=0;
end
[n1,m12]=size(a);
tt11(1)=0;
for k=2:1024;
tt11(k)=tt11(k-1)+0.01;
end
for k=2:1024
dt=0.01;
v(1)=0;
di(1)=0;
v(k)=v(k-1)+0.5*dt*(a(k-1)+a(k));
di(k)=di(k-1)+0.5*dt*(v(k-1)+v(k));
end

% Harmonik bileşenler
ck=fft(di);
f1(1)=0.00001;

```

```

f11(1)=0.0001;
for k=2:1024
f1(k)=(f1(k-1)+1);
f11(k)=f1(k)/10.24;
end
wk=2*pi*f11';

% Temel empedans fonksiyonları
[rs,s]=size(wk);
for p=1:rs
    ao(p)=wk(p)*ro/cs;
    k1(p)=(0.00254*ao(p)^2)-(0.03901*ao(p))+1;
    k2(p)=(0.018*ao(p)^2)-(0.208*ao(p))+1;
    k3(p)=1-((0.2*ao(p)^2)/(1+0.687*ao(p))^2);
    if ao(p)==0
        c1(p)=0;
    else
        c1(p)=0.6159;
    end
    c2(p)=(-0.009*ao(p)^2)+(0.1238*ao(p));
    c3(p)=(0.2*ao(p)^2)/((1+0.687*ao(p))^2);
    ktt(p)=(k3(p)+(i*ao(p)*c3(p)))*kst;
    kvvx(p)=(k1(p)+(i*ao(p)*c1(p)))*ksv;
    kvvy(p)=kvvx(p);
    kmmx(p)=(k2(p)+(i*ao(p)*c2(p)))*ksm;
    kmmy(p)=kmmx(p);
end

% Karmaşık frekans davranış fonksiyonu
[rs,s]=size(wk);
[l,m1]=size(wj);
for p=1:l
    for j=1:rs
        hj(j,p)=-wk(j)^2/(wj(p,p)^2-wk(j)^2+i*2*wk(j)*kisi*wj(p,p));
    end
end

% Katılım faktörü
m=diag(mm);
[l,m1]=size(fi);
for i=1:k
    alfa11(i,1)=0;
    beta11(i,1)=0;
    alfa22(i,1)=0;
    beta22(i,1)=0;
    alfa33(i,1)=0;
    beta33(i,1)=0;
end
[l,m1]=size(fi);

```

```

m1=0.5*1;
for k=1:l
for i=1:m1
alfa11(k)=alfa11(k)+m(i)*gamat(i,k);
beta11(k)=beta11(k)+(m(i)*gamat(i,k)^2)+(m(i)*gamay(i,k)^2);
alfa22(k)=alfa22(k)+m(i)*gamay(i,k);
beta22(k)=beta22(k)+(m(i)*gamay(i,k)^2)+(m(i)*gamat(i,k)^2);
alfa33(k)=alfa33(k)+m(i)*h(i)*gamay(i,k);
beta33(k)=beta33(k)+(m(i)*gamay(i,k)^2)+(m(i)*gamat(i,k)^2);
alfa1(k,1)=alfa11(k)/beta11(k);
alfa2(k,1)=alfa22(k)/beta22(k);
alfa3(k,1)=alfa33(k)/beta33(k);
end
end
agy=aa*gamay;
dgy=d*gamay;
cgt=c*gamat;

%Katsayılar
[rs,s]=size(wk)
for i=1:rs
topl1(i)=0;
topl2(i)=0;
topl3(i)=0;
topl4(i)=0;
topl5(i)=0;
topl6(i)=0;
topl7(i)=0;
topl8(i)=0;
topl9(i)=0;
end
[rs,s]=size(wk);
[l,m1]=size(fi);
for i=1:rs
for j=1:l
topl1(i)=topl1(i)+agy(j)*alfa1(j)*hj(i,j);
topl2(i)=topl2(i)+agy(j)*alfa2(j)*hj(i,j);
topl3(i)=topl3(i)+agy(j)*alfa3(j)*hj(i,j);

topl4(i)=topl4(i)+dgy(j)*alfa1(j)*hj(i,j);
topl5(i)=topl5(i)+dgy(j)*alfa2(j)*hj(i,j);
topl6(i)=topl6(i)+dgy(j)*alfa3(j)*hj(i,j);

topl7(i)=topl7(i)+cgt(j)*alfa1(j)*hj(i,j);
topl8(i)=topl8(i)+cgt(j)*alfa2(j)*hj(i,j);
topl9(i)=topl9(i)+cgt(j)*alfa3(j)*hj(i,j);
end
end
[rs,s]=size(wk);

```

```

for k=1:rs
    a11(k)=-wk(k)^2*topl1(k);
    a12(k)=(-wk(k)^2*topl2(k))+(kvvx(k)-(wk(k)^2*mt));
    a13(k)=(-wk(k)^2*topl3(k))-(b*wk(k)^2);

    a21(k)=-wk(k)^2*topl4(k);
    a22(k)=(-wk(k)^2*topl5(k))-(b*wk(k)^2);
    a23(k)=(-wk(k)^2*topl6(k))+(kmmx(k)-(wk(k)^2*it));

    a31(k)=(-wk(k)^2*topl7(k))+(ktt(k)-(wk(k)^2*itt));
    a32(k)=-wk(k)^2*topl8(k);
    a33(k)=-wk(k)^2*topl9(k);

    b1(k)=(wk(k)^2*topl2(k)*ck(k))+(wk(k)^2*mt*ck(k));
    b2(k)=(wk(k)^2*topl5(k)*ck(k))+(wk(k)^2*b*ck(k));
    b3(k)=wk(k)^2*topl8(k)*ck(k);

%Temel yerdeşistirmelerine ait transfer fonksiyonları
    rx1(k)=((((a22(k)*a33(k)-a23(k)*a32(k))*(a23(k)*b1(k)-a13(k)*b2(k)))-
    ((a23(k)*a12(k)-a13(k)*a22(k))*(a33(k)*b2(k)-a23(k)*b3(k))))/(((a22(k)*a33(k)-
    a23(k)*a32(k))*(a23(k)*a11(k)-a13(k)*a21(k)))-((a23(k)*a12(k)-
    a13(k)*a22(k))*(a21(k)*a33(k)-a23(k)*a31(k))))*(1/ck(k));
    rx2(k)=(((a33(k)*b2(k)-a23(k)*b3(k))/ck(k))-((a21(k)*a33(k)-
    a23(k)*a31(k))*rx1(k)))/(a22(k)*a33(k)-a23(k)*a32(k));
    rx3(k)=((b3(k)/ck(k))-(a31(k)*rx1(k))-(a32(k)*rx2(k)))/a33(k);
end
[rs,s]=size(wk);
for p=1:rs
    K=[a11(p) a12(p) a13(p) ;a21(p) a22(p) a23(p) ;a31(p) a32(p) a33(p) ];
    K1=inv(K);
    Y=[b1(p);b2(p);b3(p)];
    X(:,p)=K1*Y;
end
x1=X(1,:);
x2=X(2,:);
x3=X(3,:);
xt1=ifft(x1);
xt2=ifft(x2);
xt3=ifft(x3);
%plot(tt11,a);
%xlabel('Zaman(sn)')
%ylabel('İvme(m/sn2)')
%plot(tt11,xt1)
%plot(tt11,xt3)
%xlabel('Zaman(sn)')
%ylabel('Temel Ötelenme Yerdeşistirmesi(m)')
%ylabel('Temel Burulma-Dönme Yerdeşistirmesi(radyan)')
%title('Cs=300m/sn')
%plot(tt11,xt3)

```

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Almanya'nın Köln şehrinde doğdu. İlk öğrenimini Köln'de, orta öğrenimini Adapazarı'nın Geyve ilköğretim okulunda, lise öğrenimini ise İstanbul Pertevniyal lisesi'nde 1987 yılında tamamladı. 1988 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı. 1992 yılında mezun oldu.

Ekim 1992'de İ.T.Ü Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programına kaydoldu. Temmuz 1995'de yüksek mühendis ünvanı aldı. 1995 yılından beri doktora çalışmalarını İ.T.Ü Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programında devam ettirmektedir. 1993 yılından beri Sakarya Üniversitesinde öğretim elemanı olarak görevini sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

Bilimsel Faaliyetleri :

* CELEBİ E., GÜNDÜZ N., "Dynamic Interaction of Multistorey Buildings with Elastic Soil Layer", Earthquake Prognostic World Forum, Seismic Safety of Big Cities, 21-25 September 1998, Istanbul, Turkey (Baskıda).

** CELEBİ E., GÜNDÜZ N., "Dynamic Response of Multistorey Buildings Including Soil-Structure Interaction in Elastic Layered Media", European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, August 31-September 3, 1999, Munich, Germany.

*** CELEBİ E., GÜNDÜZ N., "Elastic Earthquake Analysis of Mono-Symmetric Single-Story Buildings Including Soil-Structure Interaction", Second European Workshop on The Seismic Behavior of Asymmetric and Irregular Structures, 8-11 October 1999, Istanbul, Turkey.

**** CELEBİ E., GÜNDÜZ N., "Planda Simetriklik Özelliği Göstermeyen Çok Katlı Yapıların Zeminle Dinamik Etkileşimi", Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu, 24-27 Mayıs 2000, İzmir.

***** ERKAN ÇELEBİ "Planda Simetrik Olmayan Çok Katlı Yapıların Elastik Zeminle Dinamik Etkileşimi", Mustafa İnan Tatbiki Mekanik Seminerleri, 27 Nisan 1999, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

***** CELEBİ E., GÜNDÜZ N., "Planda Simetrik Olmayan Çok Katlı Yapıların Spektral Analizinde Modal Maksimum Değerlerini Birleştirme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", Türkiye İnşaat Mühendisliği XIII. Teknik Kongresi, 20-22 Aralık 1995, Ankara.

***** CELEBİ E., GÜNDÜZ N., "Efficient Modal Analysis of Asymmetric Multi-Storey Buildings Including Soil-Structure Interaction", Fourth International Colloquium on Computation of Shell and Spatial Structures, 5-7 June 2000, Crete, Greece.

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLANDA SİMETRİK OLMAYAN ÇOK KATLI YAPILARIN ZEMİNLE
DİNAMİK ETKİLEŞİMİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSTON MERKEZİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Y. Müh. Erkan ÇELEBİ

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2001