

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPISAL OLMAYAN (İKİNCİL) SİSTEMLERİN**  
**DİNAMİK ANALİZİ**

**Sadık Can GİRĞİN**

**OCAK/2008**

**İZMİR**

# **YAPISAL OLMAYAN (İKİNCİL) SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı**

**Sadık Can GİRGIN**

**OCAK/2008  
İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**SADIK CAN GİRGİN**, tarafından **Prof. Dr. SERAP KAHRAMAN** yönetiminde hazırlanan “**YAPISAL OLMAYAN (İKİNCİL) SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
**PROF. DR. SERAP KAHRAMAN**  
.....

Danışman

.....  
.....  
Jüri Üyesi

.....  
.....  
Jüri Üyesi

.....  
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek Lisans tez çalışmamın her aşamasında yol göstererek çalışmalarımı yönlendiren ve beni destekleyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serap KAHRAMAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen, İnşaat Mühendisi Nihal Benli'ye; yaşamımın her döneminde her zaman yanımda bulunan ve destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Sadık Can GİRGIN

## YAPISAL OLMAYAN (İKİNCİL) SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ

### ÖZ

Yapısal olmayan elemanlar ya da ikincil sistemler, yapı taşıyıcı sistemine bağlı eleman ve ekipmanların oluşturduğu bileşenlerdir. Çalışma kapsamında, ikincil sistemlerin deprem etkisi sırasında meydana gelen hasarlardan dolayı sismik tasarımının önemi açıklanarak, ikincil sistemlerin dinamik analizine yönelik çalışmalar ve çalışmalarda etkili olan ikincil sistem dinamik ve fiziksel karakteristikleri incelenmiştir. İkincil sistemlerin dinamik analizinde uygulanan yöntemlerden *kat tepki spektrumu* ve *tasarım bazlı yöntemler* incelenmiştir.

Kat tepki spektrumu yönteminde, ikincil sistem ve yapı arasındaki dinamik etkileşime bağlı olarak bulunduğu kattaki birleşik sistemin maksimum deplasman, hız ve ivme tepki spektrumlarının belirli deprem kaydına ait zemin tepki spektrumuna bağlı elde edilmiştir. Tasarım bazlı yöntemde ise taşıyıcı ve ikincil sistemden oluşan birleşik sistemin modal analizi ile ikincil sistemin maksimum deplasmanlarına bağlı olarak ikincil sisteme etki eden eşdeğer deprem yükü elde edilmiştir. Ayrıca, yapı şartname ve yönetmeliklerinde tanımlanan ekipmana etkileyen eşdeğer deprem yükleri incelenmiştir.

Uygulamalar bölümünde ise, ekipman hasarlarının kritik olduğu bir hastane yapısındaki ekipman için kat ivme tepki spektrumları stokastik yaklaşımla elde edilmiş, tasarım bazlı yöntemle ekipmana etkileyen eşdeğer deprem yükü bulunmuştur. Ayrıca, tek serbestlik dereceli taşıyıcı sisteme bağlı ikincil sistemden oluşan birleşik sistem tepkileri kütle oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir.

Son olarak da, kat ivme tepki spektrumunun, eşdeğer deprem yükü esasına dayalı yöntemlerle uygulama alanı yönünden karşılaştırması yapılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** İkincil sistemler, yapısal olmayan elemanlar, kat tepki spektrumu, birleşik sistem, dinamik etkileşim.

## DYNAMIC ANALYSIS OF NONSTRUCTURAL (SECONDARY) SYSTEMS

### ABSTRACT

Nonstructural elements or secondary systems are connected to the primary structural system and are composed of equipments and components. In this study, the importance of seismic design of secondary systems due to the damage during several earthquakes and studies for dynamic analysis of secondary systems with the effect of dynamic and physical characteristics are explained. *Floor response spectrum method* and *design oriented method* are the methods applicable for the dynamic analysis of secondary systems.

In *floor response spectrum method*, taking the effect of dynamic interaction between primary and secondary systems maximum displacement, velocity and acceleration response spectra in terms of ground response spectrum values for a specified earthquake are obtained. On the other hand, modal analysis of a combined system composed of primary and secondary systems has been realised and the horizontal loads effecting the secondary system has been obtained. Also, horizontal loads in structure codes and provisions are investigated.

In the case studies chapter, for critical equipment in an hospital *floor acceleration response spectrum* has been generated with stochastic approach and horizontal load effecting on the equipment has been obtained by *design oriented method*. Also, combined system response parameters due to different mass ratios has been obtained.

Finally, the field of the methods used in the dynamic analysis of secondary systems have been compared.

**Key Words:** Secondary systems, nonstructural elements, floor response spectrum, combined system, dynamic interaction.

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZ SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Amaç.....	1
1.2 Kapsam.....	5
<b>BÖLÜM İKİ – İKİNCİL SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>7</b>
2.1 İkincil Sistemlerin Genel Karakteristikleri.....	7
2.1.1 Genel Fiziksel Karakteristikleri.....	7
2.1.2 Genel Dinamik Karakteristikleri.....	8
2.2 Yapılan Çalışmaların Tarihi Gelişimi.....	9
2.2.1 Kat Tepki Spektrumu İle İlgili Yaklaşımlar.....	9
2.2.2 Yaklaşımlarda Dinamik Karakteristiklerin Etkisi.....	10
2.2.3 Birleşik Sistem Yöntemi ile İlgili Yaklaşımlar.....	11
2.2.3.1 Klasik Sönümlü Olmayan Birleşik Sistemler.....	12
2.2.3.2 Özdeğerlerin Elde Edilmesinde Çözüm Teknikleri.....	12
2.2.4 Tasarım Bazlı Yaklaşımlar.....	13
<b>BÖLÜM ÜÇ – KAT TEPKİ SPEKTRUMU.....</b>	<b>15</b>
3.1 Genel.....	15
3.2 Birleşik Sistemin Modal Parametreleri.....	16

3.3 Kat Tepki Spektrumu Oluşturulması.....	24
<b>BÖLÜM DÖRT – TASARIM BAZLI YÖNTEM.....</b>	<b>30</b>
4.1 Genel.....	30
4.2 Sönümsüz Birleşik Sistemin Modal Analizi.....	31
4.3 Eşdeğer Deprem Yükünün Elde Edilmesi.....	39
<b>BÖLÜM BEŞ – YAPISAL OLMAYAN ELEMANLARLA İLGİLİ YÖNETMELİK KOŞULLARI.....</b>	<b>43</b>
5.1 Genel.....	43
5.2 Uniform Building Code (UBC).....	44
5.3 NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) Koşulları.....	45
5.4 IBC (International Building Code).....	47
5.5 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007).....	48
5.6 FEMA ( Federal Emergency Management Agency) Standartları .....	49
5.6.1 İşlevsellik Performans Seviyesi.....	49
5.6.2 Hemen Kullanım Performans Seviyesi.....	50
5.6.3 Can Güvenliği Performans Seviyesi.....	50
5.6.4 Riski Azaltılmış Performans Seviyesi.....	50
<b>BÖLÜM ALTI-UYGULAMALAR.....</b>	<b>51</b>
6.1 Giriş.....	51
6.2 Kat İvme Tepki Spektrumunun Elde Edilmesi .....	51



6.3 Ekipmana Etkiyen Eşdeğer Deprem Yüğü Hesabı .....	56
6.4 Dinamik Karakteristiklerin Sistem Tepkisine Etkileri.....	58
<b>BÖLÜM YEDİ-SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>60</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>61</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>66</b>
<b>EK-1</b> Kat İvme Tepki Spektrumunun Matlab 7.0 Programı Kullanılarak Oluşturulması.....	66
<b>EK-2</b> Dinamik Karakteristiklerin Sistem Tepkisine Etkilerinin Matlab 7.0 Programı Kullanılarak İncelenmesi.....	77
<b>EK-3</b> Semboller Listesi.....	81

## BÖLÜM BİR GİRİŞ

### 1.1 Amaç

Yapı hesabı uygulamalarında göz önüne alınan sistemler, koşulların gerektirdiği ölçüde matematik modele dönüştürülüp deprem etkisi sonucu oluşan deplasman ve iç kuvvetler elde edilmektedir. Genelde hesabı yapılan sistemlerin çok sayıda serbestlik derecesi vardır, bu nedenle de bunları altyapılara ayırmak gerekebilir. Her altyapının taşıdığı ya da mesnet görevi gördüğü başka bileşenler de bulunabilir. Yapının döşemesine, çatısına ya da duvarlarına bağlı; yük taşıma kapasitesi olmayan, titreşim sınırlarının emniyet açısından hesaplanması gereken ve kendi yapısal karakteristikleri ile deprem kuvvetlerine karşı koyan bütün bileşenler *yapısal olmayan eleman* ya da *ikincil sistem* olarak tanımlanmaktadır.

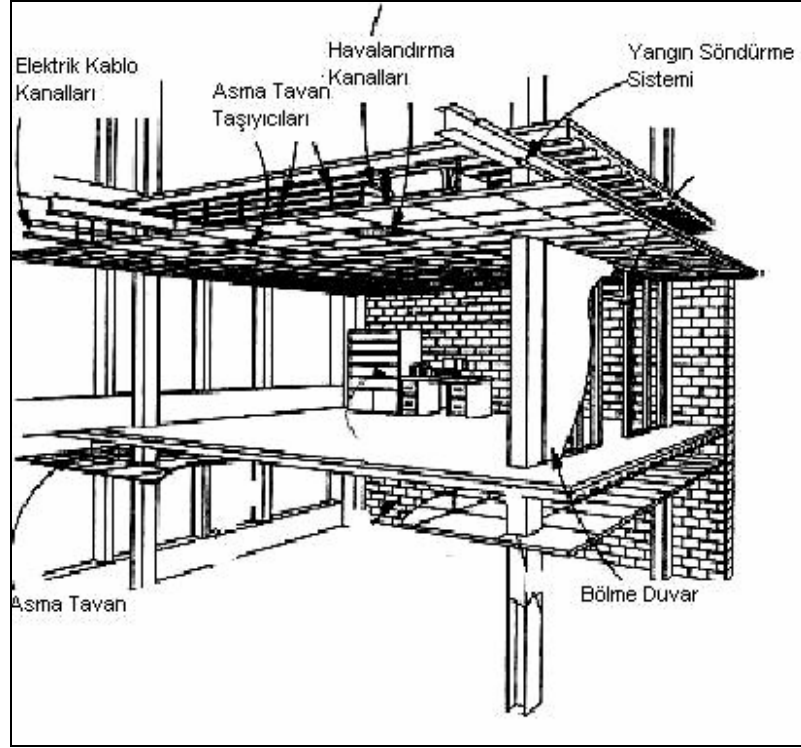
İkincil sistemler kullanım amacı ve fonksiyonlarına göre üç ayrı sınıfa ayrılırlar: mimari bileşenler, mekanik ve elektrik donanımlar ve bina içindeki bileşenlerdir.

*Mimari bileşenler*; merdivenler, parapetler, helikopter pistleri, ışıklandırma sistemleri, bölme duvarlar, panolar ve asma tavanlar gibi bileşenlerdir.

*Mekanik ve elektrik donanımlar*; elektrik jeneratörleri, pompalar, depolama tankları, kreynler, acil güç sistemleri, vanalar, boru sistemleri, bacalar, kontrol panelleri, bilgisayar sistemleri, yangın koruma sistemleri, tesisatlar bu kategorideki bazı ikincil sistemlerdir.

*Bina içindeki bileşenler*; dolaplar, raflar, dekoratif amaçlı elemanlar ve masa gibi bina içinde montajı yapılmış veya serbest duran ikincil sistemlerdir (Villaverde,2004).

Şekil 1.1' de bir bina içerisinde bulunan başlıca ikincil sistemler verilmektedir:



Şekil 1.1 Bina içerisinde bulunan yapısal olmayan elemanlar (Johnson, 2003).

Yapısal olmayan elemanlar yapılarla kıyaslandığında, modellenmesi açısından kabul edilen genel standartlara pek rastlanmamaktadır. Birçok durumda modelleme elemanın dinamik özelliklerini ve dinamik karakteristiklerini göz önüne alan tasarımcı tarafından yapılmaktadır. Yapısal olmayan elemanlar/ ikincil sistemler, modelleme açısından rijit, esnek ve üstten asılı olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar:

*Rijit ikincil sistemler;* dinamik karakteristikleri yapıya sabitlendikleri elemanların (ankrajların) süneklik ve esnekliklerine bağlıdır. Bu durumda, eleman toplam kütesine eşit tek serbestlik dereceli sistem olarak modellenip, rijitlik ve süneklikleri de ankrajlarınkine eşdeğer olarak göz önüne alınır. Bir yapıda bulunduğu kata civatalarla sabitlenmiş motor, türbin vs. elemanlar rijit ikincil sistemlerdir (Şekil 1.2).

*Esnek İkincil Sistemler;* çok serbestlik dereceli olarak yayılı kütle, rijitlik özelliklerine göre modellenen sistemlerdir. Yapıya birden fazla noktaya mesnetlenen boru hatları esnek ikincil sistemlere örnektir (Şekil 1.2).

*Üstten Asılı İkincil Sistemler*; yapı içerisinde bulunduğu katın tavanına asılı bulunan, tek serbestlik dereceli sarkaç kütlesi olarak modellenebilen ikincil sistemlerdir. Işıklılandırma sistemleri, kablo geçiş sistemleri ve dekoratif amaçlı elemanlar bu sistemlere örnektir (Villaverde,1997).



Şekil 1.2 Doğalgaz Dönüşüm Santrali içerisindeki boru sistemleri ve ekipmanlar (Manisa Doğalgaz Enerji Santrali, Girgin,2005).

1964 Alaska Depremi'ne kadar, yapısal olmayan elemanlarda depremler nedeniyle oluşan hasarlara gereken önem verilmemiştir. Bu deprem ve sonrasında meydana gelen depremlerde; yapısal olmayan eleman hasarlarından kaynaklanan can ve mal kayıplarındaki artışlar yapısal olmayan elemanların sismik tasarımına gereken önemin verilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Yapısal olmayan elemanlar ya da ikincil sistemler; taşıyıcı sistemin bir parçası olmamakla birlikte, deprem etkisi açısından bütünlüklerinin sağlanması zorunlu olan elemanlardır. Bu nedenle önem sırası olarak yapısal olmayan elemanlar aslında ikincil öneme sahip değildir. Ancak ülkemizde büyük depremlerde yapısal sistem hasarlarının çok büyük olması nedeniyle yapısal olmayan eleman hasarları gündeme gelememektedir.

Yaşanan depremler göstermektedir ki ikincil sistemlerde meydana gelen hasarlar, elemanların devrilmesi ya da düşmesi; hastaneler, acil servis birimleri, su getirme

sistemleri, enerji santralleri ve haberleşme sistemleri gibi hayati önem taşıyan ve fonksiyonlarının sürekliliğinin devamı söz konusu birimlerin işlevlerinin azalmasına neden olmaktadır. İkincil sistemlerde deprem etkisi nedeniyle oluşabilecek hasarlar, yapısal hasarlarda oluşabilecek maddi kayıplardan daha fazla değerlere ulaşmaktadır. Özellikle endüstriyel yapılardaki fonksiyonların işlevselliği açısından önemli kritik sistemlerde oluşabilecek hasarlar, ürün kaybı, işgücü kaybı ve çevresel etkilere neden olmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.3 1995 Kobe Depremi'nde yola düşen pano (Villaverde, 2004).



Şekil 1.4 1999 Kocaeli Depremi'nde Tüpraş rafinerisinde yangın koruma sistemleri ve tanklarda meydana gelen hasarlar (Johnson, 2003).

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde çok sayıda yapısal olmayan eleman hasarı gözlenmiştir. Hasarlar nedeniyle ortaya çıkan yangınlar, Tüpraş rafinerisindeki sistem fonksiyonlarının yitirilmesine ve bir yıldan uzun bir süre ile kullanılamamasına neden olmuştur. Depremler sonrasında özellikle hastanelerde ikincil sistem hasarları nedeniyle meydana gelebilecek hasarlar, beraberinde oluşabilecek yangınlara karşı yangın koruma sistemleri, duman fanları, acil durum jeneratörleri, asansörler ve tahliye sistemlerinin sismik etkilere karşı korunmasının önemini ortaya çıkarmıştır. Uluslararası sigorta kurumlarının yaptığı araştırmalara göre, bir deprem sonrası meydana gelen hasarların ve kayıpların % 80 e varan kısmı bu yangınlardan kaynaklanmaktadır (Kalafat,2006).

## 1.2 Kapsam

Sunulan çalışma kapsamında, ilk bölümde ikincil sistemlerin tanımı yapılmış, yapısal olmayan elemanların sismik tasarımının önemi vurgulanmıştır.

İkinci bölümde, ikincil sistemlerin dinamik analizinde yaklaşık kırk yıldır devam etmekte olan çalışmalar yer almaktadır. Bu bölümde, *kat tepki spektrumu* ve *tasarım bazlı yöntemler*le ilgili yapılan çalışmalar ve ikincil sistemlerin dinamik analiz parametrelerinin çalışmalara etkileri incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, deprem etkisine maruz yapıda, ikincil sistemin bulunduğu kattaki maksimum tepki değerlerini tanımlayan kat tepki spektrumu, stokastik yöntemle elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde, ikincil sistemin yapıya en fazla iki noktadan mesnetlendiği durum için, ikincil sisteme etkileyen eşdeğer deprem yükü elde edilmiştir tasarım bazlı esaslara göre elde edilmiştir.

Beşinci bölümde, deprem yönetmelik ve şartnamelerinde, ekipmanlara etkileyen eşdeğer deprem yükleri verilmiş ve ikincil sistemlerle ilgili yönetmelik koşulları yer almıştır.

Altıncı bölümde, kat tepki spektrumu yöntemi ile hastane yapısında bulunan ekipmanın yapıda bulunduğu farklı katlar için kat ivme tepki spektrumu oluşturulmuştur. İkincil sistem dinamik karakteristiklerinin etkisini incelemek amacıyla, tek serbestlik dereceli taşıyıcı ve ikincil sistemlere ait birleşik sistem tepkileri incelenmiştir.

Yedinci bölümde, yapılan çalışma ile ilgili sonuç ve öneriler verilmiştir.

## **BÖLÜM İKİ**

### **YAPISAL OLMAYAN (İKİNCİL) SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR**

#### **2.1 İkincil Sistemlerin Genel Karakteristikleri**

##### ***2.1.1 Genel Fiziksel Karakteristikleri***

Yapısal olmayan elemanlar ya da ikincil sistemler, yapı taşıyıcı sistemine göre kütlece daha hafif, taşıyıcı sisteme rijit ya da mafsallı olarak bağlıdır. Bu tipteki ikincil sistemler deprem hareketlerine maruz kaldıklarında etkilerden çok fazla etkilenmezler. Bazı ikincil sistemlerin sahip olduğu fiziksel özellikleri, sistemleri deprem etkilerine karşı koyabilecek hale getirmektedir. Bu fiziksel karakteristikler şöyle sıralanabilir:

- İkincil sistemler yapının farklı yerlerinde bulunabilmektedir, bu yüzden yer hareketine değil, yapının dinamik tepkisine bağlı olarak oluşan harekete maruzdur.
- Yapıyla kıyaslandığında ikincil sistemlerin kütleleri az ve rijitlikleri düşük değerdedir. Buna bağlı olarak da yapı ve ikincil sistem doğal açısız frekansları eşit ya da birbirine yakın değerdedir. İkincil sistemin bağlı olduğu mesnet noktalarındaki dinamik tepki değerleri de oldukça büyük değerdedir.
- Sönüm oranları yapıya kıyasla daha düşük değerde olup rezonans durumundaki hareketlere karşı sönüm karakteristiklerine sahip değildirlir.
- Yapıya birden fazla noktadan mesnetlenebilirler, bu nedenle de mesnetlerinde farklı hareketler nedeniyle deplasmanlar oluşabilir.
- Tasarımlarının dış kuvvetlere karşı koyabilmek için değil de, bir fonksiyonu gerçekleştirebilmek için yapılması gereklidir. Ancak yapıldıkları malzeme



özelliklerinin en küçük titreşim kademelerini karşılayabilecek nitelikte olması gerekir (Villaverde, 1997).

### **2.1.2 Genel Dinamik Karakteristikleri**

Taşıyıcı sistemlere bağlı ikincil sistemlerin ya da yapısal olmayan elemanların dinamik analizinde etkili olan, deprem etkisine maruz ikincil sistemlerin tepkilerini etkileyen dinamik parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler, taşıyıcı ve ikincil sistem *frekanslarının örtüşmesi*, sistemler arası *dinamik etkileşim*, *klasik olmayan sönüm* ve *çoklu mesnet zorlamaları*dır. Yapılan ilk çalışmalarda, bu dinamik parametrelerin bir veya birkaçı ihmal edilmiş, ancak özellikle sistem kütle oranlarının büyük olması ve ikincil sistem frekanslarının birleşik sistem frekansına yakın olması durumunda parametrelerin göz önüne alınması gerekliliği ortaya konmuştur. İkincil sistemlerin dinamik analizinde etkili olan parametreler:

- **Frekans Örtüşmesi:** Taşıyıcı ve ikincil sistem frekanslarının birbirine yakın veya eşit olması durumudur. Ağırlıkları taşıyıcı sisteme kıyasla küçük ikincil sistemlere aktarılan kuvvetlerin büyük değerler almasına neden olmaktadır.
- **Dinamik Etkileşim:** İkincil sistem kütlelerinin taşıyıcı sistem ağırlığına göre ihmal edilemeyeceği ve frekans örtüşmesi durumlarında etkili olan; ikincil sistem tepkilerini azaltabilen parametredir.
- **Klasik olmayan sönüm:** İkincil sistem kütle, rijitlik ve sönüm oranları taşıyıcı sistemle karşılaştırıldığında düşük değerler almasından kaynaklanan parametredir. Yapı-zemin etkileşimi ve taşıyıcı sistem ve ikincil sistemlerden oluşan birleşik sistemlerin dinamik analizinde klasik olmayan sönüm göz önüne alınmaktadır.
- **Çoklu mesnet zorlamaları:** İkincil sistemin taşıyıcı sisteme birden fazla noktadan mesnetlenmesiyle ortaya çıkan durumdur. Bu durumda ikincil sistemlerin mesnet noktalarındaki farklı tepkilerin korelasyonu ile maksimum tepkiler elde edilmektedir.

## 2.2. Yapılan Çalışmaların Tarihi Gelişimi

İkincil sistemlerin ya da yapısal olmayan elemanların dinamik analizi ile ilgili yaklaşım ve çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi yaklaşık kırk yıldır devam etmektedir. Nükleer enerji santrallerindeki kritik ekipman ve sistemler için yapılan ilk çalışmalar, bina türü yapılardaki ikincil sistemler için geniş ölçekte kullanılamamıştır. Analiz yöntemlerinin geliştirilmesinde, ikincil sistem ve taşıyıcı sistem kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerinin birleşik sistem çözümünde farklılıklarından dolayı birtakım zorlukları ortaya çıkarmıştır. Önerilen yaklaşımların çoğunda taşıyıcı sistem ve ikincil sistemler birleşik sistemler olarak göz önüne alınmış, ancak sistemlerin dinamik parametreleri birbirinden bağımsız olarak elde edilmiştir. *Kat tepki spektrumu yöntemi* ve ikincil sisteme etki eden eşdeğer statik yükün belirlenmesi esasına dayalı *tasarım bazlı yöntem* ikincil sistemlerin dinamik analizinde uygulanan yöntemlerdendir.

### 2.2.1 Kat Tepki Spektrumu Yöntemi ile İlgili Yaklaşımlar

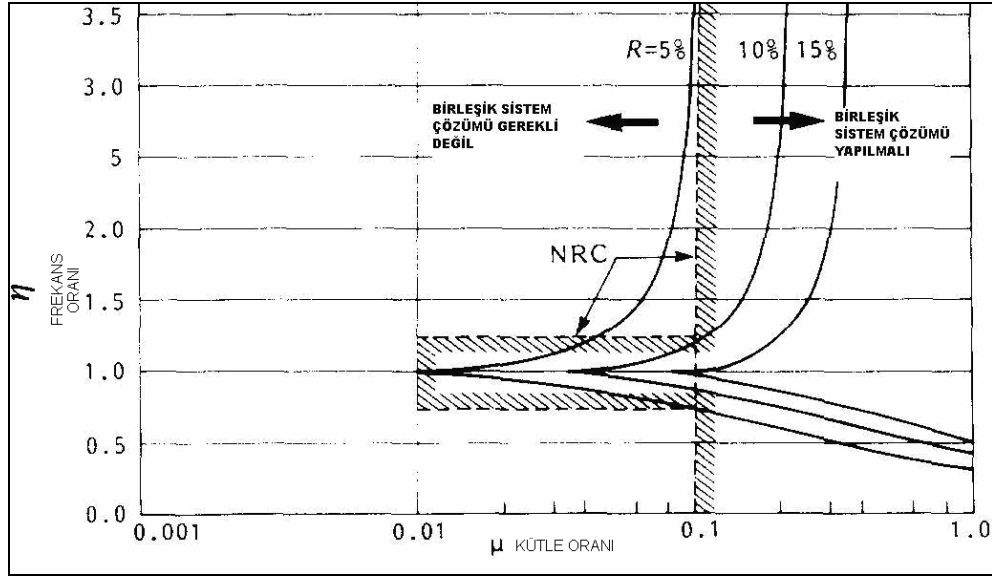
İkincil sistemlerin dinamik analizinde uygulanan ilk yöntem *kat tepki spektrumu yöntemi*dir. Taşıyıcı sistem ve ikincil sistemleri birbirinden ayrı olarak göz önüne alan ilk yaklaşımlarında, taşıyıcı sistemde ikincil sistemin bulunduğu katta o bölgeye ait ivme kaydı ya da tasarım spektrumu göz önüne alınarak ivme- zaman geçmişi belirlenmiştir. Buradan hareketle mesnet noktalarındaki tepki spektrumlarına bağlı *kat tepki spektrumu* oluşturulmuştur. Yöntemin geliştirilmesi ile ilgili ilk çalışmalar, Biggs ve Rosset (1970), Amin (1971), Kapur ve Shao (1973), Peters (1977), Venmarcke (1977), ve Atalık (1978) tarafından yapılmıştır. Singh (1975) tarafından, *kat tepki spektrumunun* belirli bir zemin tepki spektrumundan stokastik yaklaşımla elde edilmesiyle önerdiği yaklaşım; ikincil sistem frekansının yapı frekansına eşit olduğu durumda (rezonans) sınırlıdır. Peters (1977); taşıyıcı sisteme tek serbestlik dereceli olarak bağlı, dinamik etkileşimi göz önüne almadan yaptığı çalışmada, yapının modal analizi gerçek ya da yapay oluşturulan zemin hareketlerinden kaçınarak elde etmiştir. Singh (1980) tarafından, rezonans durumu için *kat tepki spektrumu* elde edilmiştir.

Taşıyıcı sistem ve ikincil sistem arasındaki dinamik etkileşimi ihmal eden *kat tepki spektrumu* ile ilgili ilk yaklaşımlarda, özellikle kütle oranı büyük sistemlerin dinamik tepkileri için hatalı sonuçlar verebilmektedir. Kütle oranı küçük sistemlerin de frekans örtüşmesi durumunda dinamik etkileşimin hesaba katılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de *kat tepki spektrumunun* elde edilmesinde taşıyıcı sistem ve ikincil sistemlerin birleşik sistemler olarak göz önüne alınması gerekmektedir.

### 2.2.2 Yaklaşımlarda Dinamik Karakteristiklerin Etkisi

*Kat tepki spektrumu* yaklaşımlarında taşıyıcı sistem ve ikincil sistemler arasındaki dinamik etkileşimin göz önüne alınması, birleşik sistem çözümünün uygulanmasını beraberinde getirmektedir. Birleşik sistem çözümünde, *pertürbasyon teknikleri* ya da *mod sentez teknikleri* ile birleşik sistemin modal analizi yapılmıştır. Sistemler arası dinamik etkileşimin etkinliği ölçüsünde de yöntemlerden hangisinin kullanılacağına karar verilebilir. Sistemlerin modal kütleleri oranı  $\mu = \frac{m_e}{M_p}$ , temel açısal frekansları oranı  $\eta = \frac{\omega_e}{\omega_p}$  olmak üzere, taşıyıcı ve ikincil sistemler arası dinamik etkileşimin etkisi  $\mu$  değeri arttıkça ve  $\eta$  değeri azaldıkça ortaya çıkmaktadır. Bu değerlere bağlı olarak da ayrıık ya da birleşik sistem yaklaşımlarının geçerli olduğu aralık Şekil 2.1' de gösterilmektedir. Grafikte NRC (Nuclear Regulatory Commission, 1975) sınırı, yöntemlerin geçerli olduğu bölgeyi göstermektedir (Chen ve Soong, 1988).

Sistemlerin sönüm parametrelerinin birbirinden oldukça farklı değerlerde olmasından dolayı birleşik sistemin klasik olmayan sönüm parametresi de yapılan çalışmalarda yer almıştır. Singh ve Sharma (1985) tarafından, klasik olmayan sönümlü sistemler için *kat tepki spektrumunun* elde edilmesine yönelik çalışmada kütlece ihmal edilebilen ikincil sistemler için dinamik etkileşim etkisi dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.1 Sistemler arası frekans oranı ve kütle oranına bağlı olarak uygun yöntemin seçimi (Chen ve Soong, 1988).

Igusa ve Kiureghian (1985) tarafından önerilen yaklaşımda ise, klasik olmayan sönüm, dinamik etkileşim ve frekans örtüşmesi gözönüne alınarak pertürbasyon teknikleri ile birleşik sistemin *kat tepki spektrumu* elde edilmiştir.

Çoklu mesnet zorlamaları nedeniyle ikincil sistemin taşıyıcı sisteme bağlı olduğu noktalardaki farklı hareketlerin çapraz korelasyonu da rastgele titreşim analizi gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Igusa ve Kiureghian (1985) tarafından yapılan çalışmada, birleşik sistemin sistemlere ait dinamik parametreleri öncelikle birbirinden bağımsız olarak elde edilmiş ve klasik sönümlü olmayan sistemin dinamik analizi yapılmıştır. Gupta ve Jaw (1985) çalışmalarında, yapıya çoklu mesnetli ikincil sistemlerin klasik olmayan sönümünü de dikkate alarak *yapı içi tepki spektrumunu* ya da *kat tepki spektrumunu* oluşturmuşlardır.

### 2.2.3 Birleşik Sistem Yöntemi ile ilgili yaklaşımlar

*Birleşik sistem yönteminde*, sistem parametrelerindeki farklılıklardan dolayı hesap yöntemlerindeki zorluklar, daha etkili yöntemlerin geliştirilmesiyle çözülmeye çalışılmıştır.

### 2.2.3.1 Klasik Sönümlü Olmayan Birleşik Sistemler

Modal analizde, yapıları oluşturan bileşenlerin, yapısal elemanlarının benzer sönüm mekanizmalarına sahip oldukları kabulüyle sahip oldukları sönüm; klasik olmayan sönümdür. Yapı- zemin etkileşimi göz önüne alınarak yapılan çalışmalarda zemin modal sönüm oranının, yapınıninkine kıyasla dört kat büyük değerler aldığı gözlenmiştir. Yapısal olmayan elemanlar ya da ikincil sistemlerin de yapıya göre sönüm özellikleri oldukça farklıdır. Klasik olmayan sönüm, sistem sönüm özellikleri birbirinden oldukça farklı sistemlerin dinamik analizinde etkili sönümdür.

Çok serbestlik dereceli sistemlerin dinamik analizinde  $[C]$  sönüm matrisi, genelleştirilmiş sönüm matrisi,  $[\Phi]$  modal matris olmak üzere genelleştirilmiş sönüm matrisi;

$$[C_r] = [\Phi]^T [C] [\Phi] \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilmektedir.  $[C_r]$  genelleştirilmiş sönüm matrisi diyagonal bir matris değilse, ( $i \neq j$  için  $C_{rij} \neq 0$  ise), bu durumda sistemdeki sönüm klasik olmayan sönümdür. Klasik sönümlü olmayan sistemlere modal analiz uygulanabilmesi için kompleks özdeğer probleminin çözümü gereklidir. Elde edilen özdeğer ve özvektörler kompleks değerli ancak bu bileşenlere bağlı elde edilen dinamik tepkiler reel değerlidir.

### 2.2.3.2 Özdeğerlerin Elde Edilmesinde Çözüm Yöntemleri

İkincil sistemin kütle, rijitlik ve sönüm terimleri, taşıyıcı sistemle kıyaslandığında küçük değerlerdeki kütle, rijitlik ve sönüm parametrelerine sahiptir. Birleşik sisteme küçük parametrelili diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan yöntemlerden biri olan pertürbasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Birleşik sisteme ait dinamik parametreleri taşıyıcı ve ikincil sistemlerin sistem karakteristiklerine bağlı olarak belirlenir. İkincil sistem tepkileri de birleşik sistemin bu dinamik parametrelerin dahilinde; modal birleştirme ya da diğer analiz yaklaşımlarıyla elde edilir. Sackman

ve Kelly (1979); yaklaşımlarında birleşik sistemlerin açısıl frekanslarının elde edilmesinde pertürbasyon yöntemini kullanmıştır. Sackman, Kiureghian ve Nour-Omid(1983); çok serbestlik dereceli taşıyıcı sisteme bağlı tek serbestlik dereceli ikincil sistemin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde pertürbasyon yöntemini kullanarak doğal frekansları, mod şekillerini, frekans örtüşmesi ve dinamik etkileşim parametrelerini de dikkate alarak elde etmiştir. Birleşik sistemin modal analizdeki parametrelerinin elde edilmesiyle, yapılardaki kütlece hafif ekipmanların, rassal süreçle güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile dinamik analizi yapılarak çözümü elde edilmiştir.

Birleşik sisteme ait matrislerin büyük boyutlu olmasıyla ortaya çıkabilecek sayısal zorlukların üstesinden gelinmesi, sistemlerin alt sistemlere ayrılarak çözümü ile mümkün olabilmektedir. Alt yapılara ayırma; tüm yapının seçilen sınır koşullarına bağlı olarak alt sistemlere bölünmesidir. *Sonlu elemanlar yöntemi* ya da diğer uygun sayısal yöntemlerle altyapılara ayrılan sistemlerin sınır koşullarında deplasman ya da kuvvetleri bulunarak, her alt sistem ayrı olarak analiz edilmelidir.

*Bileşen Mod Sentez Yöntemi* (Hurty 1965); alt sistemlere ayrılarak çözüm yaklaşımlarındandır (Villaverde 1986). Bileşen mod sentezi tekniği; sönümlü zorlanmış dinamik etki altındaki sistemler için geliştirilerek rijit cisim hareketi de formülasyon içine dahil edilmiştir. İkincil sistemin taşıyıcı sisteme bağlı olduğu noktalarda ortaya çıkabilecek bağlantı modları vektörlerin doğrusal bağımsızlık sorusunu ortaya çıkarmaktadır. Bu durumda iki ucu ankastre olarak göz önüne alınan ikincil sistemin normal mod ve iki ucu ankastre durumdaki mod vektörleri lineer bağımsızdır.

#### **2.2.4 Tasarım Bazlı Yaklaşımlar**

Villaverde (1986) çalışmasında; taşıyıcı sistem ve ikincil sistem birleşik sistem olarak, sistemlerin birbirinden bağımsız açısıl frekans ve mod şekillerine bağlı olarak elde etmiştir. Villaverde (1991) tarafından yapılan ve ilk çalışmasının devamı niteliğindeki çalışmada, klasik olmayan sönüm parametresini de dikkate alarak

yaklaşık bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Bu çalışmaların ışığında, tasarıma yönelik eşdeğer statik yük elde edilerek yapılan çalışmada, ikincil sistemlerin dinamik analizinde basitleştirilmiş bir çözüm yöntemi önerilmiştir (Villaverde, 1997). İkincil sistemlerin dinamik analiziyle ilgili bağlı olduğu yapının doğrusal olmayan davranışı da dikkate alarak çalışma da Villaverde (2006) tarafından yapılmıştır.

Yapı yönetmeliklerinde ikincil sistemlerin ya da yapısal olmayan elemanların deprem hesabında uygulanacak eşdeğer statik yük ile ilgili çalışmalar Villaverde (1997) ve Singh ve Suarez (1998) tarafından yapılmıştır. Singh, Moreschi, Suarez ve Matheu (2006) çalışmalarında, rijit ve esnek ikincil sistemlerle ilgili 2003 NEHRP yönetmelik koşullarının geliştirilmesi için yeni formüller önermiştir.

## BÖLÜM ÜÇ

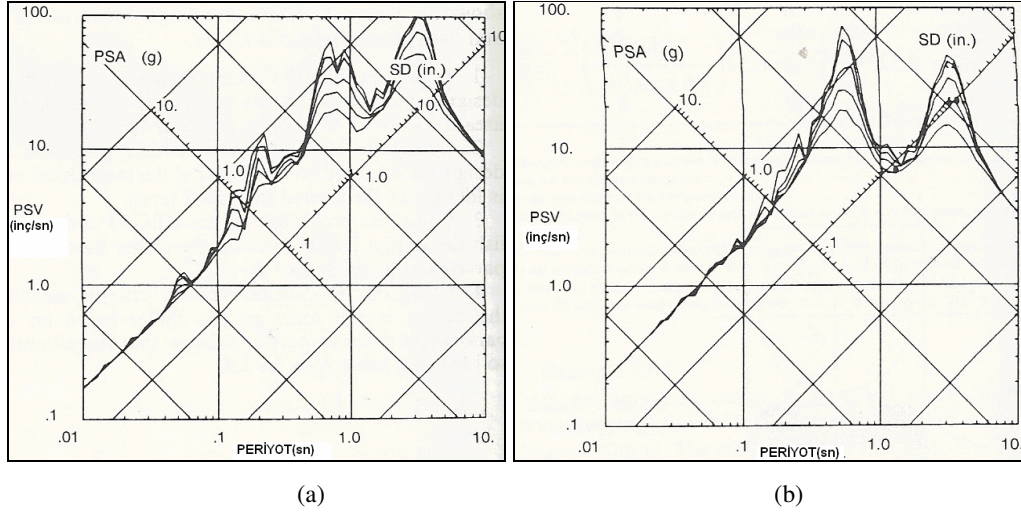
### KAT TEPKİ SPEKTRUMU

#### 3.1 Genel

*Kat tepki spektrumu*, ikincil sistemlerin dinamik analizinde uygulanan ve güçlü yer ivmelerine maruz taşıyıcı sistemde seçilen bir noktada farklı sönüm oranları ve açılal frekans değeri tek serbestlik dereceli ikincil sistemlerin, taşıyıcı sistem hareketine bağıl maksimum hız, deplasman ve ivme tepki değerlerini ifade eder.

Taşıyıcı sistemlerin dinamik analizinde; elde edilen yer değıştirme, hız ve ivme spektrumlarından yararlanarak sisteme etki eden elastik kuvvet ve atalet kuvvetleri elde edilebildiğı gibi, *kat tepki spektrumu* ile de benzer şekilde ikincil sisteme etki eden kuvvetler hesaplanabilir.

*Kat tepki spektrumu*, taşıyıcı sistemin her serbestlik derecesi için aynı değildir ve ikincil sistemin bulunduğu her kat için ayrı ayrı elde edilmelidir. Şekil 3.1’de, on katlı çelik taşıyıcı bir sistemin 1. ve 10. katları için Kat tepki spektrumları verilmiştir (Sabol,1989).



Şekil 3.1 10 katlı çelik taşıyıcı sistem bir yapının (a) 1. katı için ve (b) 10. katı için Kat Tepki Spektrumları (Sabol,1989).



*Kat tepki spektrumu yönteminde*, sistemleri birleşik olarak inceleyerek dinamik etkileşimi dikkate alan iki farklı yaklaşım söz konusudur. Igusa ve Kiureghian (1985 b); deprem hareketini rastgele titreşim hareketi olarak göz önüne alarak stokastik yöntemlerle *kat tepki spektrumunu* elde etmişlerdir. Diğer bir yaklaşım ise, Gupta ve Jaw (1985) tarafından tepki spektrumu değerlerine bağlı ve zaman tanım alanında çözümlerle elde edilen *yapı içi tepki spektrumu* yöntemidir. Her iki yöntemde de frekans örtüşmesi, sistemler arası dinamik etkileşim, klasik olmayan sönüm ve çoklu mesnet zorlamaları dikkate alınmıştır.

Sunulan çalışma kapsamında, Igusa ve Kiureghian tarafından *kat tepki spektrumunun* elde edilmesindeki aşamalar incelenmiştir. Yöntemde, tek serbestlik dereceli ikincil sistem ve taşıyıcı sistemden oluşan birleşik sistemin modal parametreleri sistemlerin dinamik parametrelerine bağlı olarak belirlenmiş, kat tepki spektrumu da stokastik yaklaşımla bu parametrelerden zemin tepki spektrumu değerlerine bağlı olarak elde edilmiştir.

### 3.2 Birleşik Sistemin Modal Parametrelerinin Elde Edilmesi

$N$  serbestlik dereceli, klasik sönümlü taşıyıcı sistemin hareket denklemindeki kütle matrisi  $[M]$ , rijitlik matrisi  $[K]$ , sönüm matrisi  $[C]$  olarak ifade edilmek üzere hareket denkleminin çözümünden elde edilen özdeğerleri (açısal frekansları)  $\omega_{pi}$ , modal sönüm oranları  $\zeta_{pi}$ , mod vektörleri  $\Phi_i$  ile belirtilmektedir.

$[\Phi]$  ;  $\Phi_i$  mod vektörlerini kapsayan modal matrisi,

$$\Phi = [\Phi_1 \quad \dots \quad \Phi_N] \quad (3.1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır.

Mod vektörlerinin ortogonalliğinden yararlanarak genelleştirilmiş kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri elde edilmiştir.

Genelleştirilmiş kütle matrisi,

$$[M_r] = [\Phi]^T [M] [\Phi] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_n \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (3.2)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Genelleştirilmiş sönüm matrisi,

$$[C_r] = [\Phi]^T [C] [\Phi] = \begin{bmatrix} 2M_1 \omega_{p1} \zeta_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2M_2 \omega_{p2} \zeta_{p2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M_n \omega_{pn} \zeta_{pn} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (3.3)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Genelleştirilmiş rijitlik matrisi,

$$[K_r] = [\Phi]^T [K] [\Phi] = \begin{bmatrix} M_1 \omega_{p1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 \omega_{p2}^2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_n \omega_{pn}^2 \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (3.4)$$

ile tanımlanmaktadır.

Tek serbestlik dereceli, taşıyıcı sisteme bağlı ikincil sistemin kütle matrisi  $[m]$ , rijitlik matrisi  $[k]$ , sönüm matrisi  $[c]$  şeklinde ifade edildiğinde hareket denkleminin çözümünden elde edilen özdeğerleri (açısal frekansları)  $\omega_e$ , modal sönüm oranları  $\zeta_{st}$ , mod vektörleri  $\phi_i$  ile gösterilmiştir. Buna göre ikincil sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri,

$$[m] = [m_e] \quad , \quad [c] = [2m_e \omega_e \zeta_e] \quad , \quad [k] = [m_e \omega_e^2] \quad (3.5)$$

ifadeleri ile verilmektedir. İkincil sistem ve taşıyıcı sistemin oluşturduğu (N+1) serbestlik dereceli birleşik sistemde  $[M_{sis}]$  kütle matrisini,  $[K_{sis}]$  rijitlik matrisini,  $[C_{sis}]$  sönüm matrisi ,

$$[M_{sis}] = \begin{bmatrix} [M] & [M_{ps}] \\ [M_{sp}] & [m] \end{bmatrix}, [K_{sis}] = \begin{bmatrix} [K] & [K_{ps}] \\ [K_{sp}] & [k] \end{bmatrix}, [C_{sis}] = \begin{bmatrix} [C] & [C_{ps}] \\ [C_{sp}] & [c] \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ile ifade edilmektedir. Birleşik sistemin kütle, rijitlik ve sönüm matrislerindeki  $ps$  ve  $sp$  alt indisleri, ikincil sistemin taşıyıcı sisteme mesnetlendiği noktalardaki parametrelerini ifade etmektedir. Birleşik sisteme ait mesnet noktalarındaki parametreleri ifade eden  $[M_{ps}] = [M_{sp}]^T$ ,  $[K_{ps}] = [K_{sp}]^T$  ve  $[C_{ps}] = [C_{sp}]^T$  matrisleri olmak üzere taşıyıcı sistemin herhangi bir  $l$  serbestlik derecesi için aşağıda verilmektedir:

$$\{C_{ps}\}^T = \langle 0 \quad \dots \quad 0 \quad -2m_e \omega_e \zeta_e \quad 0 \quad \dots \quad 0 \rangle \quad (3.7)$$

$$\{K_{ps}\}^T = \langle 0 \quad \dots \quad 0 \quad m_e \omega_e^2 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \rangle \quad (3.8)$$

Birleşik sisteme ait hareket denklemi,

$$[M_{sis}]\{\ddot{x}_0\} + [C_{sis}]\{\dot{x}_0\} + [K_{sis}]\{x_0\} = -[M_{sis}]\{r_0\}\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (3.9)$$

şeklinde verilmektedir. (3.9) denklemindeki  $x_0$  birleşik sistemin bağıl deplasmanını,  $\ddot{x}_g(t)$  deprem ivmesi değerini belirtmektedir. Birleşik sisteme ait deplasmanlar konuma ve zamana bağlı bileşenler cinsinden;

$$[\Phi_{sis}] = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ 0 & \phi \end{bmatrix}, \{Y_{sis}(t)\} = \langle Y_1(t) \quad \dots \quad Y_n(t) \quad y_e(t) \rangle \quad (3.10)$$

olmak üzere,

$$\{x_0\} = [\Phi_{sis}] \{Y_{sis}(t)\} \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Birleşik sistemin genelleştirilmiş kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri;

$$[M_{sis,r}] = \{\Phi_{sis}\}^T [M_{sis}] \{\Phi_{sis}\} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_e \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

şeklinde verilmektedir. Genelleştirilmiş sönüm matrisleri;

$$[C_{sis,r}] = \Phi_{sis}^T C_{sis} \Phi_{sis} = \begin{bmatrix} 2M_1 \omega_{p1} \zeta_{p1} & 0 & 0 & c_{1l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 2M_n \omega_{pN} \zeta_{pN} & c_{Nl} \\ c_{1l} & \dots & c_{Nl} & 2m_e \omega_e \zeta_e \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Genelleştirilmiş rijitlik matrisleri;

$$[K_{sis,r}] = \Phi_{sis}^T K_{sis} \Phi_{sis} = \begin{bmatrix} M_1 \omega_{p1}^2 & 0 & 0 & k_{1l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & M_n \omega_{pN}^2 & k_{Nl} \\ k_{1l} & k_{Nl} & m_e \omega_e^2 \end{bmatrix}_{(N+1) \times (N+1)} \quad (3.14)$$

ile verilmektedir. Sistem kütle ve rijitlik matrislerinde yer alan  $c_{il} = \Phi_{pi}^T C_{ps}$  ve  $k_{il} = \Phi_{pi}^T K_{ps}$  terimleri ile ifade etmektedir.

Birleşik sisteme ait hareket denklemi;

$$[M_{sis,r}]\{\ddot{Y}_{sis}(t)\} + [K_{sis,r}]\{Y_{sis}(t)\} + [C_{sis,r}]\{\dot{Y}_{sis}(t)\} = -[M_{sis,r}]\{r\}\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir. Yazılan hareket denkleminin çözümü, (N+1)x(N+1) mertebedeki kompleks özdeğer probleminin çözümünü gerektirir ve pertürbasyon teknikleri ile bu özdeğerler (açısal frekanslar) elde edilmiştir. Birleşik sisteme ait açısal frekans  $\omega_i^*$ , modal sönüm oranları  $\zeta_i^*$  ve mod vektörleri  $\Phi_i^*$ , frekans örtüşmesi, dinamik etkileşim ve klasik olmayan sönüm parametreleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Dinamik analiz parametreleri ise denklem (3.16)'ta verilmektedir.

$$\beta_i = \frac{\omega_i - \omega_e}{\omega_{ai}} \quad \text{Frekans örtüşmesi parametresi} \quad (3.16a)$$

$$\gamma_i = \Phi_{ki}^2 \frac{m_e}{M_i} \quad \text{Dinamik etkileşim parametresi} \quad (3.16b)$$

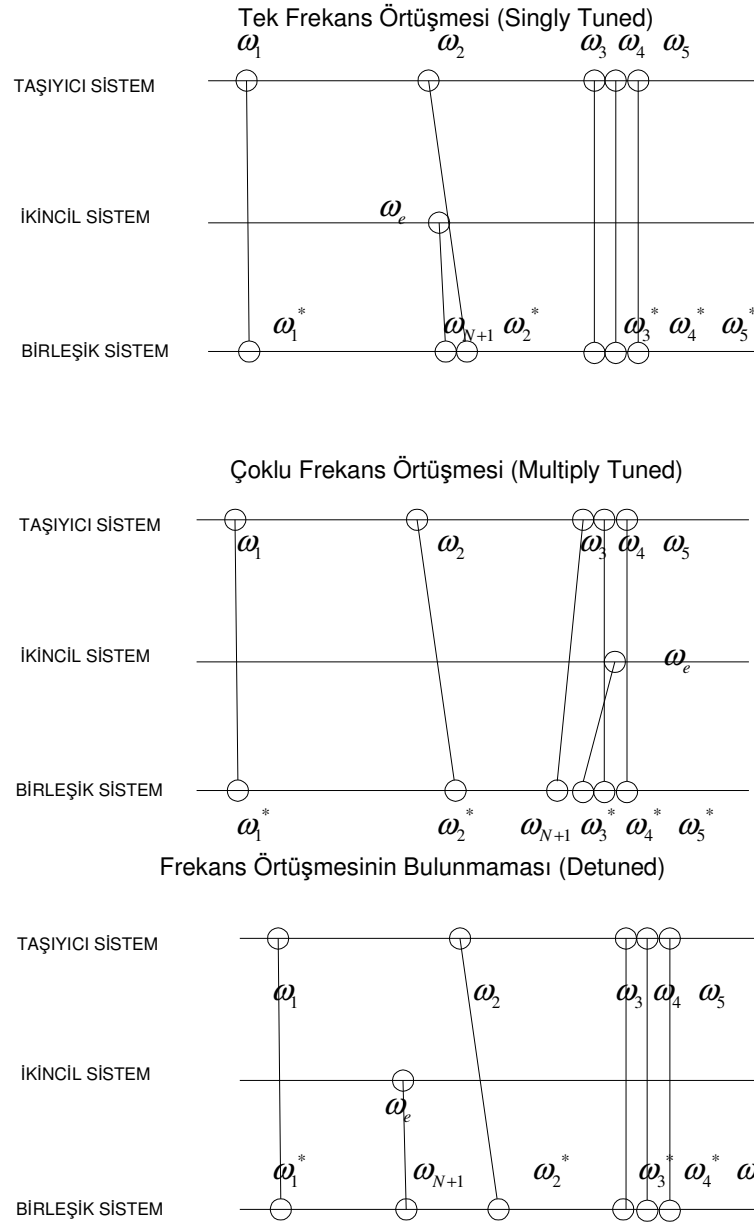
$$\delta_i = \left( \zeta_i - \zeta_e \frac{\omega_i}{\omega_e} \right) \frac{\omega_i}{\omega_e} \quad \text{Klasik olmayan sönüm parametresi} \quad (3.16c)$$

(3.16) denklemlerinde  $\omega_{ai} = \frac{(\omega_i + \omega_e)}{2}$  ortalama açısal frekans, ikincil sistemin taşıyıcı sisteme k. serbestlik derecesinde bağlı,  $\Phi_{ki}$  genlik değeri, taşıyıcı sistemin i modu için ikincil sistemin taşıyıcı sisteme bağlı serbestlik derecesindeki değerdir.

(N+1) serbestlik dereceli birleşik sistemin açısal frekans, modal sönüm oranları, mod vektörleri ve modal katılım çarpanları frekans örtüşmesi durumları için ayrı ayrı elde edilmiştir.

İkincil sistemle taşıyıcı sistem frekanslarının tek frekansının birbirine ve birleşik sisteminkine eşit olduğu frekans örtüşmesi durumu *tek frekans örtüşmesi*; taşıyıcı sistem frekanslarından birkaçının ve ikincil sistemin tek frekansının birbirine ve birleşik sisteminkine eşit olduğu *çoklu frekans örtüşmesi* durumudur. Şekil 3.2'de

sistem frekanslarının birbirine göre durumu verilmektedir (Igusa ve Kiureghian, 1983).



Şekil 3.2 Taşıyıcı sistem, ikincil sistem ve birleşik sistemin frekans durumları (Igusa ve Kiureghian, 1983).

Sistemler arası *frekans örtüşmesinin bulunmadığı* ya da *tek frekans örtüşmesi* durumlarında modal açılmal frekansları,

$$\omega_i^* = \omega_{ai} [1 + 0,5 \operatorname{sgn}(\beta_i) \operatorname{Re}(z_i)], i=1,2, \dots, N \quad (3.17a)$$

$$\omega_{N+1}^* = \omega_{aj} [1 - 0,5 \operatorname{sgn}(\beta_j) \operatorname{Re}(z_j)] \quad (3.17b)$$

ile ifade edilmektedir. Modal sönüm oranları;

$$\zeta_i^* = \frac{\omega_{ai}}{2\omega_i^*} \left[ \frac{\omega_i}{\omega_{ai}} \zeta_i + \frac{\omega_e}{\omega_{ai}} \zeta_e + \operatorname{sgn}(\beta_i) \operatorname{Im}(z_i) \right], i=1,2, \dots, N \quad (3.18a)$$

$$\zeta_{N+1}^* = \frac{\omega_{aj}}{2\omega_j^*} \left[ \frac{\omega_j}{\omega_{aj}} \zeta_j + \frac{\omega_e}{\omega_{aj}} \zeta_e - \operatorname{sgn}(\beta_j) \operatorname{Im}(z_j) \right] \quad (3.18b)$$

ile verilmektedir. (3.17)- (3.18) denklemlerindeki  $z_i$  katsayısı;

$$z_i = \sqrt{\gamma_i \left[ i \left( \frac{\omega_i}{\omega_{ai}} \zeta_i - \frac{\omega_e}{\omega_{ai}} \zeta_e \right) + \beta_i \right]^2} \quad (3.19)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Birleşik sistemin mod şekli, modal katılım çarpanı  $\psi_{ij}$  cinsinden;

$$\Phi_i^* = \left\{ \begin{array}{c} \sum_{j=1}^N \psi_{ij} \Phi_j \\ 1 \end{array} \right\}, i = 1, 2, \dots, N+1 \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (3.20) denklemindeki  $\psi_{ij}$  modal katılım çarpanının elde edilebilmesi için;

$$\psi_{ij} = \frac{-1}{\Phi_{kj}^*} \left\{ \beta_j \frac{\omega_{aj}^2}{\omega_e^2} + i\delta_j - \operatorname{sgn}(\beta_j) \sqrt{\left[ \gamma_j + \left( \beta_j \frac{\omega_{aj}^2}{\omega_e^2} + i\delta_j \right)^2 \right]} \right\}, i \neq j \text{ için} \quad (3.21a)$$

$$\psi_{ij} = \frac{-1}{\Phi_{ki}} \left\{ \beta_i \frac{\omega_{ai}^2}{\omega_e^2} + i\delta_i \frac{\omega_i}{\omega_e} + \operatorname{sgn}(\beta_i) \sqrt{\gamma_i + \left( \beta_i \frac{\omega_{ai}^2}{\omega_e^2} + i\delta_i \frac{\omega_i}{\omega_e} \right)^2} \right\}, i = j \text{ için} \quad (3.21b)$$

ifadeleri verilmektedir. Modal katılım çarpanlarından da görüleceği üzere, klasik sönümlü olmayan birleşik sistemde  $\delta_j \neq 0$  olması durumunda mod şekilleri karmaşık değerlidir. Sistem frekanslarının birbirine eşit olması (rezonans) durumunda frekans örtüşmesi parametresi  $\beta_j = 0$ ,  $\omega_j = \omega_e$ ,  $\delta_j = \zeta_i - \zeta_e$  olur.

Sistemler arası *çoklu frekans örtüşmesi* durumunda taşıyıcı sistem modlarının  $(l+1)$  ve  $(l+m)$  aralığındaki tüm modlarında frekans örtüşmesi olduğu varsayılarak,  $(N+1)$  serbestlik dereceli birleşik sistemin özdeğer problemi yalnızca bu modlar göz önüne alınarak  $[2(m+1) \times 2(m+1)]$  boyutlarına indirgenmiştir. İndirgenmiş sistemin özdeğer problemi pertürbasyon yöntemleri ile elde edilebilir. Elde edilen kompleks değerli özdeğerler  $s_i^*$  ve özvektörler  $\Phi_i^*$  karmaşık değerlidir ( $i=1,2, \dots, 2(m+1)$  olmak üzere).  $(m+1)$  sayıdaki özdeğerin bulunması yeterlidir, çünkü diğer eşlenikleridir. Birleşik sistemin modal açısal frekansları ve modal sönüm oranları özdeğerler cinsinden ifade edildiğinde  $i = 1, 2, \dots, m$  olmak üzere;

$$\omega_{l+i}^* = |s_i|, \quad \omega_{N+1}^* = |s_{m+1}| \quad (3.22a)$$

$$\zeta_{l+i}^* = -\frac{\operatorname{Re}(s_i)}{\omega_i}, \quad \zeta_{N+1}^* = -\frac{\operatorname{Re}(s_{m+1})}{\omega_{m+1}} \quad (3.22b)$$

ile verilmektedir.

### 3.3 Kat Tepki Spektrumu Oluşturulması

Güçlü yer ivmelerinin meydana geldiği yer değiştirme dalgalarının belirli sayılamayacağı, rasgele olabileceği göz önüne alındığında, hareketin kesin olarak



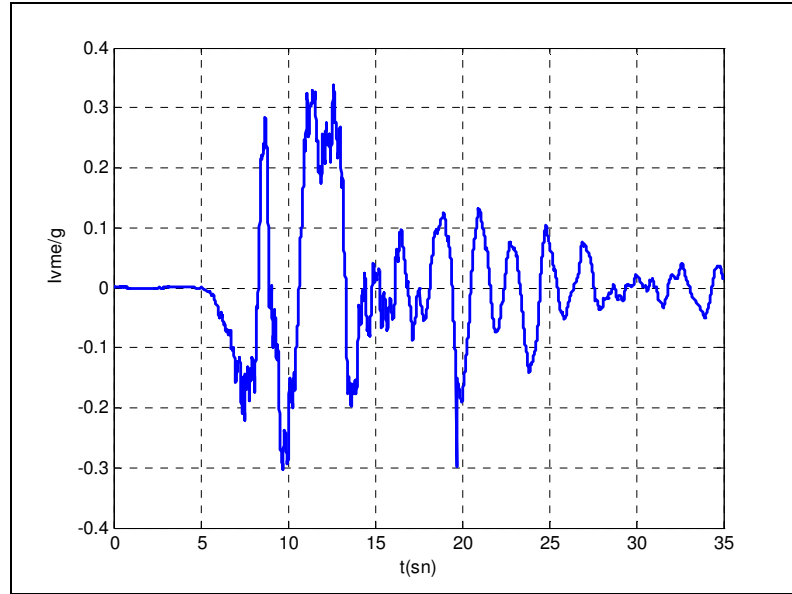
belirlenemeyeceği durumu ortaya çıkar ve bu nedenle deterministik olmayan stokastik yaklaşımla incelenmektedir. Kat tepki spektrumunun stokastik yaklaşımla elde edilmesinde de rasgele değişken olarak göz önüne alınan güçlü yer ivmelerine bağlı spektral momentler, birleşik sistem modal parametrelerine bağlı olarak elde edilmiştir. İkincil sistem tepkilerinin farklı modlardaki tepkilerinin korelasyonları cinsinden yazılan karşılıklı spektral momentler; güçlü yer ivmelerinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu ve ikincil sistemin karmaşık frekans tepki fonksiyonlarına bağlı olarak;

$$\lambda_{m,ij} = \int_0^{\infty} \omega^m G(\omega) H_i(\omega) H_j(-\omega) d\omega \quad (3.23)$$

ile verilmektedir (Igusa ve Kiureghian, 1985a).

Güçlü yer ivmelerinin belirli bir zaman aralığındaki değişiminin ani artan ve azalan değerler aldığı rasgele titreşim süreci geniş band sürecidir (Şekil 3.3). Eğer spektral yoğunluk fonksiyonu, göz önüne alınan kritik frekanslar civarında yavaş değişiyorsa,  $G_x(\bar{\omega}) = G_o$  sabit değeri alınarak rastsal süreç, frekans bandı genişliğinin sonsuz olduğu *beyaz gürültü zorlaması* olarak adlandırılır (Celep, 2001).

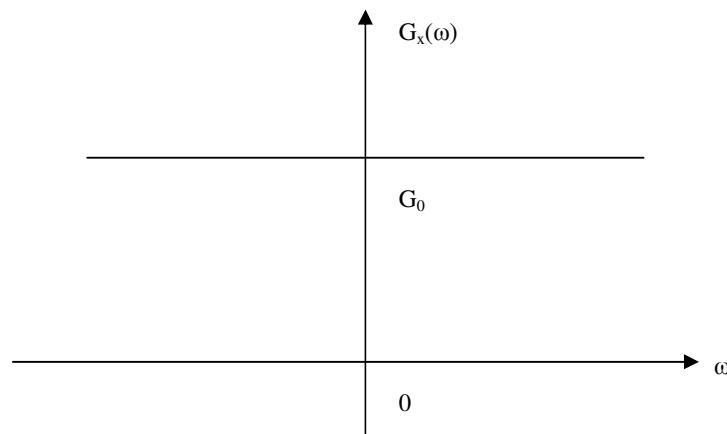
Spektral momentlerin zemin tepki spektrumu ordinatına, belirli bir süredeki pik tepki değerlerine ve birleşik sistemin herhangi iki modundaki tepkilerinin karşılıklı korelasyonuna bağlı denklemi ilk üç spektral moment için (3.24) ile verilmektedir.



Şekil 3.3 Güçlü yer ivmelerinin rassal süreçte geniş band işleme (17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Yarımca Doğu-Batı İvme Kayıtları).

Denklem (3.24)'te ilk üç spektral momentin ( $m=0,1,2$ ) alınmasının nedeni, deprem hareketinin spektral yoğunluk fonksiyonunun beyaz gürültü olması durumunda sistem tepkilerinin  $\lambda_2$  den büyük değerlerinin olmamasıdır (Igusa ve Diğer.,1984).

$$\lambda_m = \sum_i \sum_j \frac{F_{m,ij}}{P_i P_j} S_i S_j, \quad m = 0,1,2 \quad (3.24)$$



Şekil 3.4 Spektral yoğunluk fonksiyonunun frekans tanım aralığında sabit olması durumu (Celep,2001).

(3.24) denklemindeki  $S_i$ , taşıyıcı sistemin i. modundaki frekans ve sönüm oranına karşılık gelen deplasman, hız ve ivme tepki spektrumu ordinatıdır.  $F_{m,ij}$  katsayısı, sistem modal parametrelerine bağlı katsayıdır ve

$$F_{m,ij} = a_i a_j \rho_{m,ij} w_{m,ij} - (a_i c_j - a_j c_i) \eta_{m+1,ij} w_{m+1,ij} + c_i c_j \rho_{m+2,ij} w_{m+2,ij} \quad (3.25)$$

ile verilmektedir. (3.25) denkleminde  $a_i$ ,  $c_i$  genelleştirilmiş modal katılım çarpanları;  $\rho_{m,ij}$ ,  $\eta_{m,ij}$ ,  $w_{m,ij}$  modal korelasyon katsayıları,  $\Gamma_j$  j. modun modal katılım çarpanıdır. Bu katsayılar;

$$a_i = 2 \operatorname{Re}(b_i s_i), \quad c_i = 2 \operatorname{Re}(b_i) \quad (3.26a)$$

$$s_i = -\omega_i^* \zeta_i^* + i \omega_i^* \sqrt{(1 - \zeta_i^{*2})} \quad (3.26b)$$

$$b_i = \frac{s_i (\sum_{j=1}^N \psi_{ij} m_j \Gamma_j + m_e) (\sum_{j=1}^N \psi_{ij} q_j + q_{N+1})}{s_i^2 (\sum_{j=1}^N \psi_{ij}^2 m_j + m_e) - (\sum_{j=1}^N \omega_j^2 \psi_{ij}^2 m_j + \omega_e^2 m_e - \omega_e^2 m_e \sum_{j=1}^N \Phi_{kj} \psi_{ij})} \quad (3.26c)$$

$$\rho_{m,ij} = \frac{\operatorname{Re} \lambda_{m,ij}}{\sqrt{\lambda_{m,ii} \lambda_{m,jj}}}, \quad \eta_{m,ij} = \frac{\operatorname{Im} \lambda_{m,ij}}{\sqrt{\lambda_{m,ii} \lambda_{m,jj}}}, \quad w_{m,ij} = \sqrt{\frac{\lambda_{m,ii} \lambda_{m,jj}}{\lambda_{0,ii} \lambda_{0,jj}}} \quad (3.27)$$

ile ifade edilmektedir.

(3.26) denklemlerinde ikincil sistemin taşıyıcı sisteme mesnetlendiği kata göre bağlı deplasman, hız ve ivme tepkilerinin elde edilmesinde;  $q_j$  birleşik sistemin j. modunun ikincil sistem tepkisine katkısını göstermek üzere,  $q_j = -\Phi_{jk}$  ve  $q_{N+1} = 1$  dir. Deprem hareketinin geniş band işlemi ve rassal sürecin *beyaz gürültü zorlaması* göz önüne alınmasıyla, güç spektral fonksiyonunun sabit genlik değeri  $G_x(\bar{\omega}) = G_o$

için, (3.27) denklemindeki korelasyon katsayılarının birleşik sistemin modal açısal frekans ve sönüm oranlarına bağlı olarak verilen karşılıklı spektral momentleri:

$$\lambda_{0,ii} = \frac{\pi G_0}{4\xi_i^* \omega_i^{*3}} \quad (3.28a)$$

$$\lambda_{1,ii} = \frac{\pi G_0}{4\xi_i^* \omega_i^{*2}} \cdot \frac{2}{\pi\alpha_i} \cdot \tan \frac{\alpha_i}{\xi_i^*} \quad (3.28b)$$

$$\lambda_{2,ii} = \frac{\pi G_0}{4\xi_i^* \omega_i^*} \quad (3.28c)$$

$$\operatorname{Re} \lambda_{0,ij} = \frac{2\pi G_0}{K_{ij}} (\omega_i^* \xi_i^* + \omega_j^* \xi_j^*) \quad (3.29a)$$

$$\operatorname{Im} \lambda_{1,ij} = \frac{2\pi G_0}{K_{ij}} \left( \frac{-\omega_i^{*2} + \omega_j^{*2}}{2} \right) \quad (3.29b)$$

$$\operatorname{Re} \lambda_{2,ij} = \frac{2\pi G_0}{K_{ij}} (\omega_i^* \xi_j^* + \omega_j^* \xi_i^*) \quad (3.29c)$$

$$K_{ij} = (\omega_i^{*2} - \omega_j^{*2})^2 + 4\omega_i^* \omega_j^* (\omega_i^* \xi_i^* + \omega_j^* \xi_j^*) (\omega_i^* \xi_j^* + \omega_j^* \xi_i^*) \quad (3.30a)$$

$$\alpha_i = \sqrt{1 - \xi_i^{*2}} \quad (3.30b)$$

ile ifade edilmektedir (Igusa ve diğer., 1984).

Stokastik yaklaşımla ikincil sistem maksimum tepkilerinin istatistiksel olarak birleştirilmesinden elde edilen *kat ivme spektrumu*, spektral moment  $\lambda_0$  cinsinden;

$$\text{kareli ortalamasının karekökü: } \sqrt{\lambda_0} \quad (3.31a)$$

$$\text{ortalama değeri: } p\sqrt{\lambda_0} \quad (3.31b)$$

standart sapma değeri:  $q\sqrt{\lambda_0}$  (3.31c)

ile ifade edilmektedir (Igusa ve Kiureghian, 1985).

(3.27) ile ifade edilen korelasyon katsayıları,

$$\rho_{0,ij} = \frac{8(\omega_i \zeta_i + \omega_j \zeta_j) \zeta_i \zeta_j \omega_i^2 \omega_j^2}{K_{ij}} \quad (3.32a)$$

$$\eta_{1,ij} = \frac{2(\omega_i^2 - \omega_j^2) \zeta_i \zeta_j \omega_i^2 \omega_j^2 \alpha_i \alpha_j}{K_{ij} \sqrt{\tan^{-1} \frac{\alpha_i}{\zeta_i} \tan^{-1} \frac{\alpha_j}{\zeta_j}}} \quad (3.32b)$$

$$w_{1,ij} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\omega_i \omega_j}{\alpha_i \alpha_j} \tan^{-1} \frac{\alpha_i}{\zeta_i} \tan^{-1} \frac{\alpha_j}{\zeta_j}} \quad (3.32c)$$

$$\rho_{2,ij} = \frac{8\sqrt{\omega_i \zeta_i \omega_j \zeta_j} (\omega_i^2 \omega_j \zeta_j + \omega_j^2 \omega_i \zeta_i)}{K_{ij}} \quad (3.32d)$$

ile verilmektedir. (3.32) denklemlerindeki *kat tepki spektrumu* ifadelerinde p ve q pik faktörleri,  $\delta$  şekil faktörü,  $\tau$  depremin süresi olmak üzere;

$$p = \sqrt{2 \ln v_e \tau} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln v_e \tau}}, \quad q = \frac{1,2}{\sqrt{2 \ln v_e \tau}} - \frac{5,4}{13 + (2 \ln v_e \tau)^{3,2}} \quad (3.33a)$$

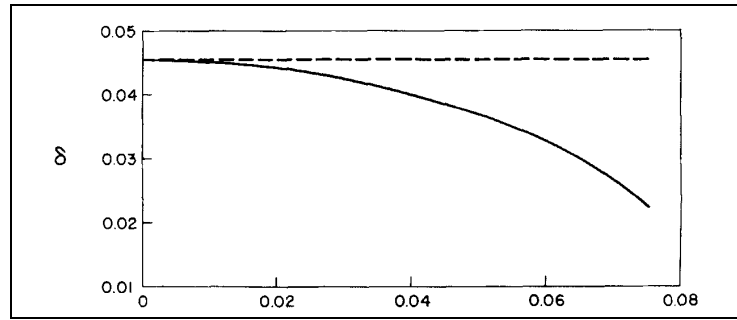
ifadesi ile verilmektedir. (3.33a) da yer alan terimler v ve  $\delta$ ;

$$v = \sqrt{\frac{(\lambda_2 / \lambda_0)}{\pi}} \quad (3.33b)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{(1-\lambda_1^2)}{\lambda_0\lambda_2}} \quad (3.33c)$$

$$v_e\tau = \begin{cases} \max(2, 1; 2\delta v\tau) & 0 < \delta \leq 0,1 \\ (1,63\delta^{0,45} - 0,38)v\tau & 0,1 < \delta \leq 0,69 \\ v\tau & 0,69 < \delta \leq 1 \end{cases} \quad (3.33d)$$

Tek serbestlik dereceli taşıyıcı sisteme bağlı tek serbestlik dereceli ikincil sistem için  $\delta$  şekil faktörünün sistem sönüm oranları farkına bağlı değişimi Şekil 3.5'te verilmektedir.



$(\zeta_p - \zeta_s)$  Sönüm oranları farkı

Şekil 3.5 Tek serbestlik dereceli taşıyıcı sisteme bağlı tek serbestlik dereceli ikincil sistem için  $\delta$  şekil faktörünün sönüm oranları farkına bağlı değişimi (Igusa ve Diğer., 1984)

## BÖLÜM DÖRT

### TASARIM BAZLI YÖNTEM

#### 4.1 Genel

*Tasarım bazlı yöntem*, Villaverde(1985) tarafından yapısal olmayan elemanların deprem hesabı ile ilgili yapılan çalışmalarda, eşdeğer statik yüklerin hesabına dayalı bir yöntemdir. Sistemler arası dinamik etkileşim, sistem frekanslarının birbirine göre durumu, ikincil sistemin yapıya bağlı olduğu noktaların sayısı ve buldukları konum dikkate alınmaktadır. Yöntemde, taşıyıcı sisteme en çok iki noktadan bağlı ikincil sistemler için maksimum dinamik tepkileri belirli sönüm oranı ve açısız frekans için zemin tepki spektrumuna göre elde edilmektedir. Taşıyıcı sistem ve ikincil sistemlerin hareket denklemleri, reaksiyon kuvvetleri göz önüne alınarak ayrı ayrı çözümlenerek mod şekilleri, doğal açısız frekansları, genelleştirilmiş kütleleri ile birleşik sisteme ait açısız frekanslar rezonans ve rezonans dışı durumları için elde edilmektedir. *Tasarım bazlı yöntemde* yapılan başlıca kabuller şunlardır:

- İkincil sistemin taşıyıcı sisteme en fazla iki noktadan bağlı olduğu kabul edilmiştir.
- Birleşik sisteme ait dinamik tepkiler iki alt sisteme ait temel açısız frekansa karşılık gelen ilk iki modu dikkate alınarak hesaplanmıştır.
- Birleşik sistemin açısız frekansı ile taşıyıcı ve ikincil sistem açısız frekansları örtüşmektedir.
- İkincil sistemin yapıya tek noktadan bağlı olması durumunda mod şekli yüksekliği boyunca lineer artış göstermekte; iki noktadan bağlı olduğu durumda ise bağlı olduğu noktalarda sıfır, maksimuma ulaştığı nokta ise yüksekliği boyunca tek bir noktadadır.
- Taşıyıcı sistem sönüm oranı %5, ikincil sistem sönümsüz olarak dikkate alınmıştır.

Tek serbestlik dereceli sistemler için elde edilen dayanım azaltma faktörlerinin, sistemler temel periyotlarında titreştiklerinden çok serbestlik dereceli sistemler için de geçerli olduğu kabul edilmiştir (Villaverde,2004).

Tasarım bazlı yöntemde taşıyıcı sistem ve ikincil sistemin modal analizi sistemler sönümsüz göz önüne alınarak gerçekleştirilmiş, sönümsüz birleşik sisteme ait parametreler elde edilmiştir. İkincil sistem maksimum deplasmanları hesaplanarak sisteme etki eden deprem yükleri elde edilmiştir (Villaverde,1991).

#### 4.2 Sönümsüz Birleşik Sistemin Modal Analizi

Üç serbestlik dereceli sönümsüz taşıyıcı sistemin birinci ve üçüncü serbestlik derecelerinde bağlı iki serbestlik dereceli sönümsüz ikincil sistem incelenerek, mod bileşenleri birleşik sistemin modal parametreleri sistemlerin birbirinden bağımsız çözümünden elde edilen parametrelere bağlı olarak elde edilmiştir (Villaverde, 1985).

N serbestlik dereceli sönümsüz taşıyıcı sistem için hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{x}_p\} + [K]\{x_p\} = \{R(t)\} \quad (4.1)$$

ile verilmiştir.  $R(t)$  sistemler arasındaki reaksiyon kuvvetleri vektörü olmak üzere;

$$\{R(t)\} = \langle R_1(t) \ 0 \ R_3(t) \rangle^T \text{ dir.}$$

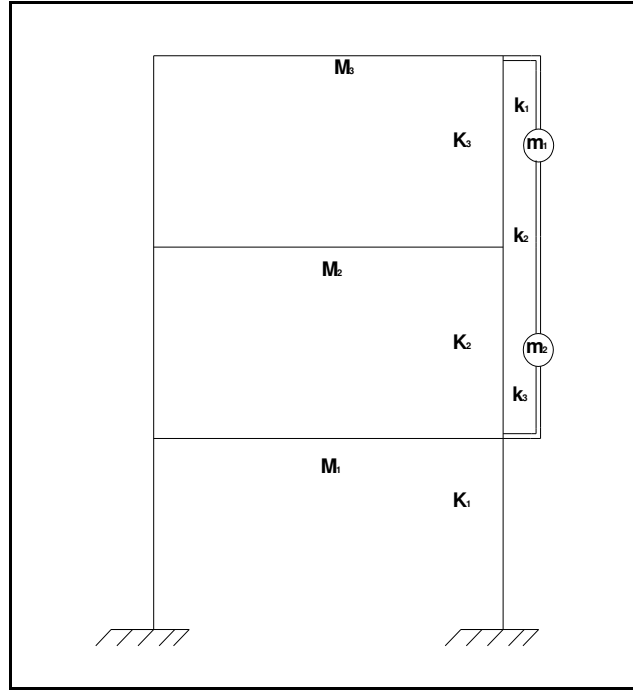
ile verilmektedir.  $x_p$  taşıyıcı sistem deplasmanları konuma ve zamana bağlı bileşenler cinsinden;

$$\{x_p\} = [\Phi]\{Y(t)\} \quad (4.2)$$

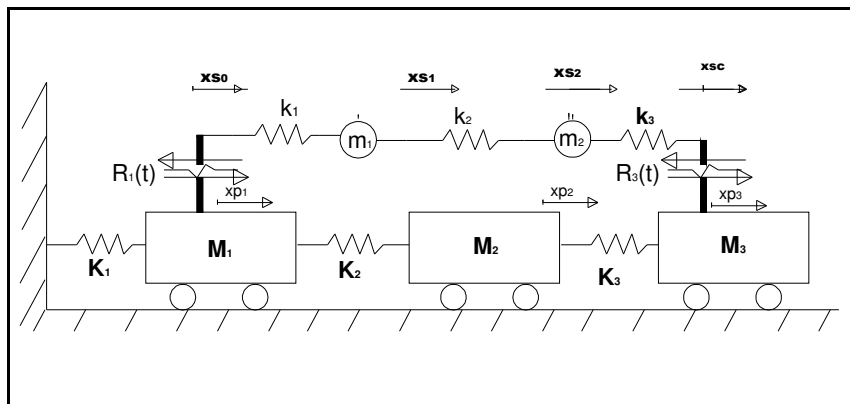


$[\Phi]_{N \times V}$  taşıyıcı sistemin mod vektörlerinin oluşturduğu modal matris,  $\{Y(t)\}$  zamana bağlı genlik vektörüdür. Mod vektörlerinin ortogonalliğinden yararlanarak (4.1) denklemini  $[\Phi]^T$  ile çarpıldığında,

$$[\Phi]^T [M][\Phi]\{\ddot{Y}\} + [\Phi]^T [K][\Phi]\{Y\} = [\Phi]^T \{R(t)\} \quad (4.3)$$



Şekil 4.1 Taşıyıcı sistem-ikincil sistem kesiti (Villaverde,1985).



Şekil 4.2 Taşıyıcı sistem-ikincil sistem kütle-yay modeli (Villaverde,1985).

Taşıyıcı sistemin i. modu için  $M_{ri}$  genelleştirilmiş kütlesi,  $\Phi_b(i)$  genlik değeri ve  $\omega_{pi}$  doğal açısal frekansı olmak üzere,

$$M_{ri} \ddot{Y}_i + \omega_{pi}^2 M_{ri} \dot{Y}_i = \Phi_1(i) R_1(t) + \Phi_3(i) R_3(t), \quad (i=1,2,3) \quad (4.4)$$

elde edilir. Taşıyıcı sistem ve sisteme bağlı ikincil sistemden oluşan birleşik sistemde, taşıyıcı sistem deplasman bileşeni  $u_p$  olmak üzere taşıyıcı sistem deplasmanları bu bileşenler cinsinden yazıldığında;

$$\{x_p\} = \{u_p\} \cos(\omega t - \theta) \quad (4.5)$$

$$\{Y(t)\} = \{Y\} \cos(\omega t - \theta) \quad (4.6)$$

$$\{u_p\} = [\Phi] \{Y(t)\} \quad (4.7)$$

elde edilir. (4.7) denklemi (4.4) denkleminde yerine konduğunda  $\omega$  birleşik sistem doğal açısal frekansı olmak üzere taşıyıcı sistem i. modu için;

$$(\omega - \omega_{pi}^2) Y_i = \frac{[\Phi_1(i) R_1(t) + \Phi_3(i) R_3(t)]}{M_{ri}}, \quad i=1,2,3 \quad (4.8)$$

denklemi elde edilir. İkincil sistemin bağlı olduğu noktalardaki reaksiyon kuvvetleri oranı

$$\eta = \frac{R_3(t)}{R_1(t)} \quad (4.9)$$

olmak üzere taşıyıcı sistem bileşen mod faktörü,

$$Y_i = \frac{(\omega - \omega_{pi}^2) M_{ri} [\Phi_1(i) + \eta \Phi_3(i)]}{(\omega - \omega_{pi}^2) M_{ri} [\Phi_1(i) + \eta \Phi_3(i)]} \quad (4.10)$$

ile verilmektedir. Elde edilen denklemler genelleştirilmiş durum için taşıyıcı sistemin m ve n serbestlik derecelerinde bağlı birleşik sistemin r. modu için yazıldığında;

$$\{u_p\}_r = [\Phi]\{Y\}_r = \sum_{i=1}^N Y_i(r)\{\Phi\}_i \quad (4.11)$$

ile ifade edilmektedir.

$$\hat{\Phi}_r(i) = \Phi_a(i) + \eta_r \Phi_b(i) \quad (4.12)$$

$$\eta_r = \frac{R_a(t)}{R_b(t)} \quad (4.13)$$

olmak üzere bileşen mod faktörü;

$$Y_i(r) = \frac{(\omega - \omega_{pl}^2) M_{rl} [\hat{\Phi}_r(i)]}{(\omega - \omega_{pi}^2) M_{ri} [\hat{\Phi}_r(l)]}, \quad 1 = 1, 2, \dots, N \quad (4.14)$$

elde edilir. n serbestlik dereceli sönümsüz ikincil sistem için hareket denklemi:

$$[m]\{\ddot{x}_s\} + [k]\{x_s\} = -\{R(t)\} \quad (4.15)$$

ile verilmektedir.  $x_s$  ikincil sistem deplasmanları konuma ve zamana bağlı bileşenler olarak;

$$\{x_s\} = [\phi]\{y(t)\} \quad (4.16)$$

ile ifade edilir.  $[\phi]_{n \times n}$  ikincil sistemin mod vektörlerinin oluşturduğu modal matris,  $\{y(t)\}$  zamana bağlı genlik vektörüdür.  $[\phi]_{n \times n}$  ikincil sistemin modal matrisinin oluşturulmasında Hurty'nin *Bileşen Mod Sentezi Tekniği (1965)* kullanılmıştır. Bu yöntemde deplasman vektörü sistem rijit cisim, serbest uçlarının ankastre mesnetli olması ve normal mod durumları gözönüne alınarak elde edilmektedir.

İkincil sisteme ait mod vektörleri *Bileşen Mod Sentezi Tekniğine* göre;

$$\{\phi\}_0 = \{1 \ 1 \ 1 \ 1\}^T \quad (\text{Rijit cisim modu}) \quad (4.17)$$

Taşıyıcı sisteme bağlı uçlarından birincisi sabit tutulup diğer uca birim yük uygulandığında esneklik terimleri;

$$f_{1c} = \frac{1}{k_1}, \quad f_{2c} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}, \quad f_{3c} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \text{ olmak üzere;}$$

$$\{\phi\}_c = \{0 \ f_{1c} \ f_{2c} \ f_{3c}\}^T \quad (4.18)$$

$$\{\phi\}_j = \{0 \ \phi_1(j) \ \phi_2(j) \ 0\}^T, \quad j=1,2 \quad (4.19)$$

İkincil sisteme ait Hurty *Bileşen Mod Tekniğine* göre modal matris:

$$[\phi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \phi_1(1) & \phi_2(2) & f_{1c} \\ 1 & \phi_2(1) & \phi_2(2) & f_{2c} \\ 1 & 0 & 0 & f_{3c} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

ile ifade edilmiştir. Mod vektörlerinin ortogonalliğinden yararlanarak (4.15) denklemi  $[\phi]^T$  ile çarpıldığında,

$$[\phi]^T [m][\phi]\{\ddot{y}\} + [\phi]^T [k][\phi]\{y\} = -[\phi]^T \{R(t)\} \quad (4.21)$$

ile verilmektedir. (4.21) denkleminde ikincil sistemin j. modu için genelleştirilmiş kütle terimleri;

$$m_{jr} = \{\phi\}_j^T [m]\{\phi\}_j, \quad j = 0,1,2 \quad (4.22)$$

$$m_{cjr} = \{\phi\}_c^T [m]\{\phi\}_j, \quad j=0,1,2,c \quad (4.23)$$

ile ifade edilmiştir. Taşıyıcı sistem ve sisteme bağlı ikincil sistemden oluşan birleşik sistemin ikincil sistem deplasman bileşeni  $u_s$  ile gösterilirse ve taşıyıcı sistem deplasmanları bu bileşenler cinsinden yazılırsa;

$$\{x_s\} = \{u_s\} \cos(\omega t - \theta) \quad (4.24)$$

$$\{y(t)\} = \{y\} \cos(\omega t - \theta) \quad (4.25)$$

$$\{u_s\} = [\phi] \{y(t)\} \quad (4.26)$$

ile elde edilir. (4.26) denklemini (4.21) denkleminde yerine konulduğunda ikincil sistem için bileşen mod faktörü:

$$y_j = \frac{\omega^2 (y_0 + m_{cjr} y_c / m_{jr})}{(\omega_{sj}^2 - \omega^2)} \quad (4.27)$$

ile ifade edilmektedir. Elde edilen denklemler genelleştirilmiş durum için taşıyıcı sisteme a ve b serbestlik derecelerinde bağlı ikincil sistemden oluşan birleşik sistemin r. modu için;

$$\{u_s\}_r = [\phi] \{y(t)\}_r = \sum_{i=1}^{n+1} y_j(r) \{\phi\}_j \quad (4.28)$$

$$y_j(r) = \frac{\omega_r^2 y_{oj}(r)}{(\omega_{sj}^2 - \omega_r^2)}, \quad j=1,2, \dots, n \quad (4.29)$$

$$y_{0j}(r) = y_0(r) + m_{cjr} y_c(r) / m_{jr} = \sum_{i=1}^N \Phi_0(i, j) Y_i(r) \quad (4.30)$$

$$\Phi_0(i, j) = \Phi_a(i) + \beta_j [\Phi_b(i) - \Phi_a(i)] \quad (4.31)$$

$$\beta_j = \frac{1}{f_{cc}} \frac{\{\phi\}_j^T [m] \{\phi\}_j}{\{\phi\}_c^T [m] \{\phi\}_j} \quad (4.32)$$

elde edilmiştir.

Taşıyıcı sisteme a ve b serbestlik derecelerinde bağlı ikincil sistemlerin deplasmanları arasındaki uygunluk koşulu  $x_{s0} = x_{pb}$  ve  $x_{sc} = x_{pa}$  olmak üzere genel durumda  $y_0$  ve  $y_c$  'nin birleşik sistemin r. modu için bileşen mod faktörleri;

$$y_0(r) = \sum_{i=1}^N \Phi_a(i) Y_i(r) \quad (4.33)$$

$$y_c(r) = \frac{1}{f_{cc}} \sum_{i=1}^N [\Phi_b(i) - \Phi_a(i)] Y_i(r) \quad (4.34)$$

ile verilmektedir. Taşıyıcı sistem ve ikincil sistemin frekanslarının birbirine göre durumu, ikincil sistemin deprem etkisinde dinamik tepkilerini etkilemektedir. Rezonans durumunda; taşıyıcı sistem ve ikincil sistem frekanslarının birbirine eşit olduğu durumdur  $\omega_0 = \omega_{pl} = \omega_{sj}$ . Bu durumda birleşik sistemin r. modu için açılal frekansı,

$\gamma_{ij} = \frac{mrj}{Mrl}$  genelleştirilmiş kütleler oranı olmak üzere,

$$\omega_r = \omega_0 \left[ 1 \mp \Phi_0(l, j) \frac{\sqrt{\gamma_{ij}}}{2} \right] \quad (4.35)$$

ifadesi ile verilmektedir. (4.35) denkleminde birleşik sistem açılal frekansının iki değeri bulunmaktadır ve kütle oranının büyük olduğu sistemlerde frekans örtüşmesi parametresinin önemli olduğu görülmektedir.

Rezonans dışı durumda, birleşik sistemin r. modu için açısıl frekanstır.

$$\omega_r^2 = \frac{(\omega_{pi}^2 + \omega_{sj}^2)}{2} \mp \sqrt{\left[ \frac{(\omega_{pi}^2 - \omega_{sj}^2)}{2} + \Phi_0^2(l, j) \gamma_{ij} \omega_{pi}^2 \omega_{sj}^2 \right]} \quad (4.36)$$

denklemini genel durumda birleşik sistem r. modu için açısıl frekansı veren denklemdir. Birleşik sistemin herhangi bir r. modu için ikincil sistemim maksimum deplasmanları belirli zemin tepki spektrumuna bağlı olarak ;

$$\{x_s\}_r = \Gamma_r \{du_s\}_r S_d(\omega_r, \zeta_r) \quad (4.37a)$$

$$\{du_s\}_r = \{u_s(1) - u_p(a) \dots u_s(i) - u_p(i-1) \dots u_p(b) - u_p(n)\} \quad (4.37b)$$

denklemleri ile verilmektedir. (4.37b) denklemindeki  $u_p(i), i = a, b$  ve  $u_s(j), j = 1, 2, \dots, n$  birleşik sistemin r. modu için  $\{u_p\}_r$  ve  $\{u_s\}_r$  vektörlerinin elemanlarıdır.

### 4.3 Eşdeğer Deprem Yükünün Elde Edilmesi

Sönümsüz birleşik sistemin herhangi bir r. modu için ikincil sistem maksimum deplasmanları (4.37) denklemleri ile verilmiştir. Bölüm 4.1'de yapılan kabuller ışığında ikincil sistem elemanlarındaki maksimum deplasmanlar vektörü;

$$\{x_s\} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_0}{D} \{d\phi_1\} S_d(\omega_0, \zeta_0) \quad (4.38)$$

ile verilmektedir. Denklemden  $S_d$  spektral deplasmanı,  $\Phi_0$  genlik değeri olmak üzere;

$$\Phi_0 = \Phi_0(1, 1) = \frac{1}{2} [\Phi_a(1) + \Phi_b(1)] \quad (4.39)$$

D katsayısı,

$$D = \sqrt{|\Phi_0^2(1,1)\gamma_{11} - (\zeta_{p1} - \zeta_{s1})|} \quad (4.40)$$

ile verilmektedir.  $\gamma_{11}$  kütle oranı,  $\zeta_{p1}$  ve  $\zeta_{s1}$  sırasıyla taşıyıcı ve ikincil sistem modal sönüm oranlarıdır.

$\Phi_0$  genlik değeri ;  $W$  taşıyıcı sistem toplam ağırlığı,  $W_i$  i. katın ağırlığı olmak üzere;

$$\Phi_0 = \frac{Wh_{ort}}{\sum_{i=1}^N W_i h_i} \quad (4.41)$$

şeklinde de ifade edilmektedir. (4.40) denkleminde  $h_i$  i. kat yüksekliği,  $h_{ort}$  ikincil sistemin taşıyıcı sisteme bağlı olduğu kat yüksekliklerinin ortalamasıdır.

İkincil sistem maksimum deplasman vektörü ile rijitliğinin çarpımından elde edilen eşdeğer yük vektörü,

$$\{F_s\} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_0}{D} [m] \{d\phi_1\} S_a(\omega_0, \zeta_0) \quad (4.42)$$

ile verilmektedir.

$F_{s,j}$ ; İkincil sistemin j. kütesine etki eden eşdeğer yük;  $C_p$  bileşen büyütme faktörü,  $\phi_{j1}$  temel moduna karşılık gelen genlik değeri, T yapı temel periyodu olmak üzere,

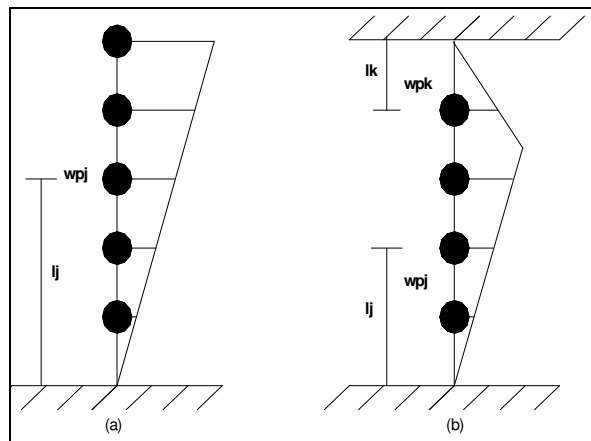
$$F_{s,j} = C_p W_{sj} \phi_{j1} \frac{S_a(\omega_0, \zeta_0)}{g} \quad (4.43)$$



$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{2w_s}{W} + \frac{(1+0,5T)^2 - 1}{200\Phi_0^2}}} \leq \frac{\sqrt{200\Phi_0}}{1+0,5T} \quad (4.44)$$

$$\phi_{j1} = \frac{w_s l_j}{\sum_{i=1}^n w_{sj} l_j} \quad (4.45)$$

ile ifade edilir (Villaverde,1997).



Şekil 4.3 İkincil sistem elemanları için varsayılan mod şekilleri: (a) tek noktadan, (b) iki noktadan taşıyıcı sisteme bağlı durumlar için (Villaverde, 2004).

İkincil sistem elemanlarına etki eden eşdeğer deprem yükü

$$F_{sj} = \frac{w_s l_j}{\sum_{i=1}^n w_{sj} l_j} V_p \quad (4.46)$$

ile verilmektedir. Şekil 4.3'te ikincil sistem elemanlarının taşıyıcı sisteme tek noktadan ve iki noktadan bağlı olduğu durumlar için  $l_j$ , en yakın mesnetlendiği noktalara uzaklıktır.  $V_p$  mesnet noktalarında oluşan reaksiyon kuvveti,

$$V_p = \frac{C_p}{RR_p} S_a w_s \quad (4.47)$$

denklemleri ile verilmiştir. (4.47) denkleminde;  $C_p$  büyütme faktörü,  $S_a$  spektral ivme değeri,  $R$  ve  $R_p$  sırasıyla taşıyıcı sistem ve ikincil sistemin doğrusal olmayan davranışını göz önüne almak için geliştirilen dayanım azaltma faktörleridir. İkincil sistem tepkilerinde bir azaltma söz konusu olup, bunun nedeni de yapı temel frekansı ile ikincil sistem temel frekansının örtüşmesi durumunda yapıdaki doğrusal olmayan davranış bu azaltmaya yol açmasıdır.  $R$  ve  $R_p$  dayanım azaltma faktörleri için  $\mu$  süneklik faktörüne bağlı olarak,

$$R_\mu = \begin{cases} 1 + \frac{T-0,03}{0,095}(\sqrt{2\mu-1}-1); & 0,03 \leq T \leq 0,125sn \\ \sqrt{2\mu-1} & ; 0,125 \leq T \leq 0,5sn \\ \mu & ; T \geq 0,5sn \end{cases} \quad (4.48)$$

ile verilmektedir.

Tasarım Bazlı yöntemle, yapısal olmayan elemanların deprem hesabında basitleştirilmiş bir çözüm yolu izlenerek, sistem tepkilerinin eşdeğer statik yüke bağlı olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Yöntem tasarımcının deprem etkisindeki yapısal olmayan elemanların nasıl bir etkiyle karşılaşacağı ve tasarım aşamasında bu elemanların hesaba katılıp katılmayacağı konusunda değerlendirme yapmasına olanak sağlar (Villevarde,2006).

## **BÖLÜM BEŞ**

### **YAPISAL OLMAYAN ELEMANLARLA İLGİLİ YÖNETMELİK KOŞULLARI**

#### **5.1 Genel**

Yapı yönetmelikleri ve deprem şartnamelerinde yapısal olmayan elemanların ya da ikincil sistemlerin sismik tasarımı ile ilgili öneriler getirilmektedir. ABD’de yayımlanan, uluslararası alanda geçerliliği olan yönetmeliklerden bazıları; UBC (Uniform Building Code), IBC (International Building Code), NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) ve yönetmelikleridir. FEMA (Federal Emergency Management Agency) tarafından mekanik ve elektrik donanımların sismik sınırlandırılması ile hastanelerde ve okullarda alınacak sismik tedbirlerle ilgili standartlardandır (Filiatrault, Christopoulos & Stearns, 2001).

UBC ve NEHRP yönetmeliklerinde, yapısal olmayan elemanlarla ilgili alınması gereken sismik önlemler, elemanların tasarım depremi göz önüne alınarak oluşan ivme ve deplasmanlara karşı kırılma, yer değiştirme ve düşmesini önleyicidir. Genellikle ikincil sistemlerle ilgili yönetmelik koşullarının dayandığı koşullar taşıyıcı sistem tasarımındaki kavramlara benzerdir. İkincil sistemin ağırlığı ile orantılı, deprem ivmesine bağlı, yapı içerisindeki konumuna bağlı olarak belirlenen eşdeğer yatay yük, yönetmeliklerde ikincil sisteme etki ettirilerek sismik tasarımı yapılır.

Eşdeğer yatay yük yöntemi, meydana gelen güçlü yer ivmelerindeki kat ivme kayıtları göz önüne alınarak, yapı içerisinde yük dağılımı trapez yayılı varsayımıyla, amprik olarak oluşturulmuştur. Yapısal olmayan elemanların yapıya bağlantı noktalarındaki elastik ötesi deformasyon kapasiteleri için formüllerde tepki düzeltme faktörü ( $R_p$ ) kullanılmıştır. Eşdeğer yatay yük yöntemindeki formüller, yapısal olmayan bileşenlerin dinamik tepkilerini etkileyen en önemli faktörler dikkate alınarak elde edilmiştir.

## 5.2 Uniform Building Code (UBC)

1961 yılından önceki Uniform Building Code (UBC) içerisinde ikincil sistemlerin sismik tasarımı ile ilgili koşullar yer almıyordu. 1961 yılındaki UBC ile yapısal olmayan bileşenlerin analizi için yük uygulanması ile ilgili maddeler yürürlüğe kondu. Ancak bu yönetmelikte, taşıyıcı sistem ve ikincil sistem arasındaki dinamik etkileşim, bileşenlerin yapı içerisindeki konumları, sistemler arası rezonans etkileri ve mesnet noktalarındaki faz dışı hareketler hesaba katılmıyordu. Yönetmelikteki yaklaşım deneysel çalışmalara dayalı olup yapı dinamiği prensiplerine dayanmıyordu.

1997 yılında hazırlanan UBC içerisinde, yapı içerisindeki dolgu ve diyafram duvarları gibi yapısal olmayan elemanların yapıya yeterli rijitlikte gerekli ankraj ve gergilerle bağlantılarının hesabı için eşdeğer yatay yük verilmektedir. (5.1) ile verilen eşdeğer deprem yükü, (5.2)' ye göre uygulanabilirliği bakımından kolay olmasına karşın yaklaşıktır. İkincil sisteme etkiyen eşdeğer deprem yükü:

$$F_p = 4.0C_a I_p W_p \quad (5.1)$$

$$F_p = \frac{a_p c_a I_p}{R_p} \left(1 + 3 \frac{h_x}{h_r}\right) W_p \quad (5.2)$$

$$0,7C_a I_p W_p \leq F_p \leq 4C_a I_p W_p \quad (5.3)$$

ile tanımlanmaktadır. Denklemlerde;  $F_p$ , yapısal olmayan elemanın merkezine uygulanan yatay yük;  $a_p$ , bileşen büyütme faktörüdür.  $a_p$ , bileşen büyütme faktörü, eleman tipine göre 1 ila 2,5 arasında değişen ve zemin hareketinin dinamik etkisinin yapı tarafından artırılmasını hesaba katan katsayıdır. Yönetmelikte  $a_p$ 'nin belirlenmesinde elemanların esnek (titreşimi yalıtılmış) ya da rijit bağlı olması ve temel periyodu 0,06 sn den büyük olduğu kabul edilmektedir.  $C_a$ , yapı tasarımı için belirli sismik katsayı;  $I_p$ , bileşen önem faktörü (önemli elemanlarda 1,5 standart elemanlarda 1 olarak alınır);  $R_p$ , bileşen tepki düzeltme faktörü ( 1,5 ila 4 arasında

değişen katsayıdır.);  $h_x$ , bileşenin bulunduğu yerin yerden yüksekliği;  $h_r$ , çatı üst kotu;  $W_p$ , elemanın ağırlığı ile ifade edilmektedir.

Yönetmelikte ayrıca; yapıya farklı noktalardan bağlı ikincil sistemler, bağlantı noktalarındaki bağıl hareketlerinin etkilerine göre tasarımını belirtmektedir. Bağıl hareketlerin hesaplanması da yapının elastik olmayan maksimum deplasmanlarına bağlıdır. Formüllerle belirtilen yatay yükler; elemanların ve bu elemanları yapıya bağlayan bağlantıların tasarımında kullanılır. İkincil sistem elemanlarının ve bağlantılarının tasarımında yapı tasarımındaki gibi yük kombinasyonlarının kullanımı geçerlidir (Villaverde, 2004).

### 5.3 NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) Koşulları

Yapısal olmayan elemanların sismik tasarımı ile ilgili koşullar 1985 yılında yürürlüğe giren NEHRP koşullarında da yer almaktadır. Koşulların daha rasyonel hale getirilmesi, yöntemin basit hale indirgenmesi ve geçmiş depremlerin yapılar üzerindeki etkilerinin gözlenmesi ile yapısal olmayan elemanlarla ilgili 1994 ve 1997 yıllarında yayımlanan NEHRP koşulları ile düzenlenmiştir. En son yürürlüğe giren NEHRP (2003) koşulları da UBC (1997) koşulları gibi yapısal olmayan elemanların tasarımında limit analize dayalı tasarım prensiplerine uymaktadır. Tasarım kriterlerinde deprem ivmesi, büyütme faktörü, elemanın rijitliği ve ağırlığı ve performans seviyesi göz önüne alınır (Singh ve Diğer., 2006).

Yapısal olmayan elemanlara etki eden yatay yük;

$$F_p = \frac{0,4a_p S_{DS} W_p}{R_p} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) r \quad (5.4)$$

$$0,3S_{DS} I_p W_p \leq F_p \leq 1,65S_{DS} I_p W_p \quad (5.5)$$

ile tanımlanmaktadır.

Denklemlerdeki;  $F_p$ , yapısal olmayan elemanın merkezine uygulanan yatay yük;  $S_{DS}$ , % 5 sönüm oranı için kısa süreli tasarım spektral ivmesi;  $S_s$ , zemin sınıfına göre spektral ivme,  $F_a$  bölge etkilerine göre katsayı olmak üzere,  $S_{DS} = (2/3) F_a S_s$  olarak ifade edilmektedir.  $a_p$ , bileşen büyütme faktörüdür ve eleman tipine göre 1 ila 2,5 arasında değişen katsayıdır.  $I_p$ , bileşen önem faktörü (önemli elemanlarda 1,5, standart elemanlarda 1 olarak alınır);  $R_p$ , tepki düzeltme faktörü (bileşenin tipine ve deformasyon kapasitesine göre değişen katsayı) tanımlanmıştır. Denklemlerde ayrıca,  $z$ , bileşenin yapıya bağlı bulunduğu en yüksek noktanın temel seviyesinden yüksekliği;  $h$ , yapının en üst kotu;  $W_p$ , bileşen ağırlığı;  $r$ , tasarım tepki ivmesinin yapı temel periyodundaki artışa karşılık azalması sonucu etkisinin göz önüne alınmasındaki faktör;  $S_{D1}$ , 1. sn deki tasarım spektral ivme değeri de yer almaktadır.

$T_p$  yapısal olmayan elemanın periyodu ve  $T_{flx} = \left(1 + 0.25 \frac{z}{h}\right) \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$  olmak üzere  $r$

faktörü

$$r = \begin{cases} 1 & (T_p \leq T_{flx} \text{ için}), \\ \frac{T_{flx}}{T_p} & (T_p > T_{flx} \text{ için}) \end{cases} \quad (5.6)$$

ile verilmektedir. Yapısal olmayan elemanın yapıya bağlandığı iki nokta arasındaki bağıl deplasmanları arasındaki koşullar da belirlenmiştir. Aynı yapıya (A yapısı) X ve Y yüksekliklerinde bağlı elemanın deplasmanları sırasıyla  $\delta_{XA}$ ,  $\delta_{YA}$  olmak üzere bağıl deplasmanı:

$$D_p = \delta_{XA} - \delta_{YA} \quad (5.7)$$

olmak üzere,  $\Delta_{aA}$  ve  $\Delta_{aB}$ , A ve B yapılarının sınır kat ötelemeleri ve bu ötelemenin bulunduğu katın yüksekliği  $h_{sx}$  olmak üzere aynı yapıya iki noktadan bağlı elemanın bağıl deplasmanın maksimum değeri;

$$D_p = (X - Y) \frac{\Delta_{aA}}{h_{sx}} \quad (5.8)$$

ile ifade edilmektedir. Farklı iki yapıya (A ve B yapıları) X ve Y yüksekliklerinde bağlı elemanın bağlı deplasmanları  $\delta_{xA}$ ,  $\delta_{yB}$  olmak üzere bağlı deplasmanı;

$$D_p = |\delta_{xA}| - |\delta_{yB}| \quad (5.9)$$

ile ifade edilirse, farklı iki yapıya iki noktadan bağlı elemanın bağlı deplasmanının sınır kat ötelemelerine bağlı maksimum değeri,

$$D_p = \frac{X \Delta_{aA}}{h_{sx}} - \frac{Y \Delta_{aB}}{h_{sx}} \quad (5.10)$$

olmalıdır. Yapısal olmayan elemanların yapıya farklı noktalardan bağlı olduğu göz önüne alınarak elde edilen bağlı deplasmanlara karşı koyacak şekilde, elemanların sismik tasarımı yapılmalıdır.

#### 5.4 IBC (International Building Code)

ICC (International Code Council) tarafından hazırlanan IBC 2003'e göre yapısal olmayan elemanlara etki ettirilen yatay yükler NEHRP koşulları ile benzer şekilde;

$$F_p = \frac{0,4a_p S_{DS} W_p}{\frac{R_p}{I_p}} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \quad (5.11)$$

ile ifade edilmektedir. Formüldeki  $I_p$  yapı önem faktörüdür.

### 5.5 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (2007)

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'in (2007), 2.11 Bölümünde binalarda balkon, parapet, baca vb konsol olarak bilinen yapı taşıyıcı sistemine bağlı, ancak bağımsız çalışan yapısal çıkıntılar ile cephe, ara bölme panoları, vb. yapısal olmayan tüm mimari elemanlara ve mekanik, elektrik donanımlarla binaya bağlantılarının hesabında kullanılacak eşdeğer deprem yükü:

$$f_e = 0,5A_0Iw_e \left( 1 + 2 \frac{H_i}{H_N} \right) \quad (5.11)$$

ile verilmektedir. Denklemden;  $f_e$ , yapısal çıkıntının, mimari elemanın mekanik ya da elektrik donanımının merkezine etkiyen eşdeğer deprem yükü ifade etmektedir.  $A_0$ , etkin yer ivmesi katsayısı;  $I$ , bina önem katsayısı;  $w_e$ , yapısal olmayan elemanın ağırlığı;  $H_i$ , binanın  $i$ . katının temel üzerinden ölçülen yüksekliği;  $H_N$ , binanın temel üzerinden ölçülen toplam yüksekliği kavramları kullanılmaktadır.

Hesaplanan deprem yükünün yatay doğrultuda elemanın ağırlık merkezine en elverişsiz iç kuvvetleri verecek durumda etki ettirilmesi gerekmektedir. Düşey konumda olmayan elemanlara ise; hesaplanan eşdeğer deprem yükünün yarısının düşey doğrultuda etki ettirileceği hükmü yer almaktadır (Madde 2.11.1).

(5.11) denklemi ile verilen eşdeğer deprem yükü, yapının  $i$ . katındaki bulunan donanımın ağırlığı  $0.2w_i$  den büyük olması durumunda, donanımların ağırlık ve binaya bağlantı rijitlik özellikleri, bina taşıyıcı sisteminin deprem hesabında göz önüne alınacaktır ( Madde 2.11.2).

Mekanik veya elektrik donanımının bulunduğu kattaki en büyük ivmeyi tanımlayan *kat ivme spektrumu*'nun uygun yöntemlerle belirlenmesi durumunda (5.11) denklemi uygulanmayabilir ( Madde 2.11.3).



Yangın söndürme sistemleri ve acil yedek elektrik sistemleri ile dolgu duvarlarına bağlanan donanımlar için madde 2.11.1 deki denklemin iki katı alınacaktır ( Madde 2.11.4).

## **5.6 FEMA ( Federal Emergency Management Agency) Standartları**

ABD’de deprem güvenliği konusunda faaliyet gösteren en büyük kuruluş olan Federal Afet Yönetim Kurumu (FEMA) tarafından yayınlanan standartlar deprem yönetmeliklerinin yanı sıra uygulanan standartlardır. Bunlar arasında *Mekanik Ekipmanlarda Sismik Sınırlandırma* (FEMA 415), *Elektrik Ekipmanlarda Sismik Sınırlandırma* (FEMA 413), *Hava Kanallarında ve Borularda Sismik Sınırlandırma* (FEMA 414) gibi doğrudan ekipmanların bağlantılarının nasıl yapılması gerektiğini, titreşim yalıtımı detaylarını içermektedir. Bina kullanım olanlarına yönelik olanlar ise; *İlk ve Orta Dereceli Okullarda Sismik Tedbirler* (FEMA 149) ve *Sağlık Tesislerinde Sismik Tedbirler* (FEMA 150) mevcut standartlardır.

FEMA 356 şartnamesinde deprem anında ve sonrasında tesislerdeki yapısal olmayan elemanlardan beklenenler derecelendirilmiş ve dört kademeli performans düzeyi sıralaması oluşturulmuştur. Beklenen performans seviyeleri aşağıda açıklanmıştır:

### **5.6.1 İşlevsellik Performans Seviyesi**

Yapının deprem sonrası hasar durumunda, yapısal olmayan elemanlarının deprem öncesindeki fonksiyonlarını aynı şekilde devam ettirebilmeleri durumudur. Bu performans seviyesinde, aydınlatma, mekanik ve elektrik tesisatları ile bilgi işlem sistemlerinin büyük bölümünün işlevlerini yerine getirmeye devam ettikleri durumdur. Yapısal olmayan elemanların deprem sonrasında bu performans seviyesinde bulunması sismik koruma yapılmasıyla mümkün olmaktadır. Özellikle hastanelerdeki sistemlerin deprem esnasında işlevlerini yerine getirebilmeleri; can güvenliğinin tam sağlanması açısından önemlidir.

### ***5.6.2 Hemen Kullanım Performans Seviyesi***

Deprem sonrasında yapıdaki giriş- çıkış kapıları, merdivenler, asansörler, acil aydınlatma sistemleri, yangın alarm sistemleri gibi sistemlerin genel olarak işlevlerini sürdürebilmekte oldukları durumdur. Bu performans seviyesinde, elemanlarda hafif hasar meydana gelebilir, binada yapısal bir tehlike bulunmamaktadır. Binadaki elektrik ve mekanik sistemler için önlemler alınmalı ve işlevlerini sürdürmeleri sağlanmalıdır. Hastane ve haberleşme merkezleri için yeterli güvenliğin sağlanamadığı seviye yüksek nitelikli ofis vb binalar için tercih edilebilir.

### ***5.6.3 Can Güvenliği Performans Seviyesi***

Deprem sonrasında binadaki yapısal olmayan elemanlarda hasarın meydana geldiği ancak bu hasarın can güvenliğini tehlikeye atacak boyutta olmadığı durumdur. Yapısal olmayan elemanlarda meydana gelen hasarın maddi boyutu oldukça fazla olup, havalandırma, sıhhi tesisat ve yangın sistemleri zarar görüp işlevlerini kaybedebilirler; ancak yapıda genel olarak can güvenliğini tehdit edebilecek riskler oldukça düşüktür. Bu performans seviyesi, ancak deprem sonrasında uzun süre kullanım dışı kalmasının mahsur teşkil etmeyeceği depo vb gibi binalarda tercih edilebilir.

### ***5.6.4 Riski Azaltılmış Performans Seviyesi***

Deprem sonrası hasar gören yapısal olmayan elemanların düşme tehlikesi meydana gelebilecek durumudur. Bu durumda dış ortama büyük zarar verebilecek yapısal olmayan elemanların, insanların çok bulunduğu yerlere parapet, dış cephe panelleri, asma tavanlar ve büyük raflar gibi yapısal olmayan elemanların düşmelerinin engellenmesi gerekmektedir. Bu hasar seviyesinde amaç, tüm yapıdaki yapısal olmayan elemanlarda meydana gelen hasarları belirlemek değil, insanlar için tehlike oluşturabilecek elemanların belirlenmesidir. Bu performans seviyesi, ancak hiçbir nitelik beklenmeyen en alt sınıf binalar için ve sadece deprem esnasındaki can güvenliğinin sağlanması açısından tercih edilebilir (Kalafat,2006)

## BÖLÜM ALTI UYGULAMALAR

### 6.1 Giriş

İkincil sistemler ya da yapısal olmayan ekipmanların, deprem sonrasında kullanılabilirliğinin ve fonksiyonlarının devamının birincil öneme sahip olduğu yapılardan biri de hastanelerdir. Deprem sonrasında meydana gelebilecek yangınlara karşı yangın söndürme sistemlerinin, acil servislerdeki ekipmanların hasarının önlenmesi bu açıdan hastanelerde önem taşımaktadır.

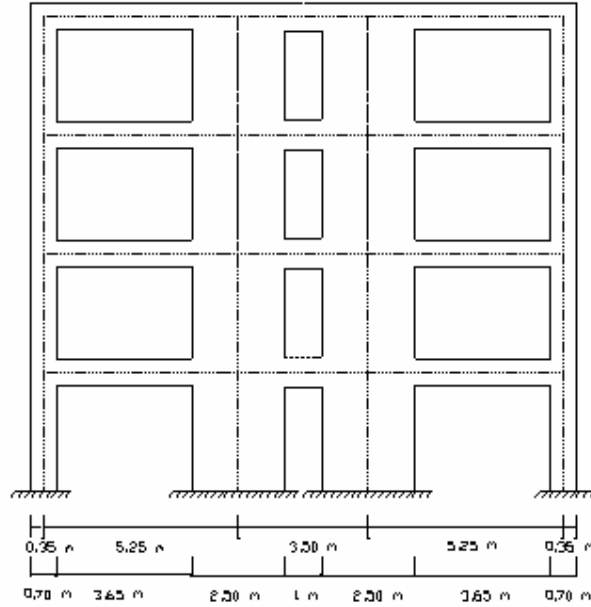
Yapılan çalışmada, dört katlı bir hastane yapısı 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremine maruz varsayılmış, yapıda bulunan 3 ton ağırlığındaki bir ekipman için bulunduğu kata bağlı *kat ivme tepki spektrumu* depremin ivme tepki spektrumu değerlerine bağlı olarak bulunan Igusa ve Kiureghian tarafından önerilen stokastik yaklaşımla elde edilmiştir. İkincil sisteme etki eden eşdeğer deprem yükünün hesabına dayalı *Tasarım Bazlı yöntem* ile *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik*'teki ilgili maddesindeki eşdeğer deprem yükü kıyaslanmıştır. Ayrıca, dinamik karakteristiklerin etkisini incelemek amacıyla, tek serbestlik dereceli taşıyıcı sisteme bağlı tek serbestlik dereceli ikincil sistem için birleşik sistem tepkileri stokastik yaklaşımla elde edilmiştir.

### 6.2 Kat İvme Tepki Spektrumunun Elde Edilmesi

Dört katlı boşluklu perde-çerçeve sistemden oluşan hastane yapısının taşıyıcı sistem kesiti, malzeme ve kesit özellikleri aşağıda verilmiştir.

Beton sınıfı.....	C 30
Kat Yüksekliği.....	$h_i = 3,2$ m
Kolon boyutları.....	70 cm x 70 cm
Kiriş Boyutları.....	30 cm x 70 cm
Perde Kalınlığı.....	30 cm

Döşeme Kalınlığı..... $h_f = 15$  cm  
 Hareketli yük..... $500 \text{ kg/m}^2$  (TS 498)  
 Kat Ağırlığı.....81 t



Şekil 6.1 Hastane yapısına ait düzlem boşluklu perde-çerçeve taşıyıcı sistem kesiti.

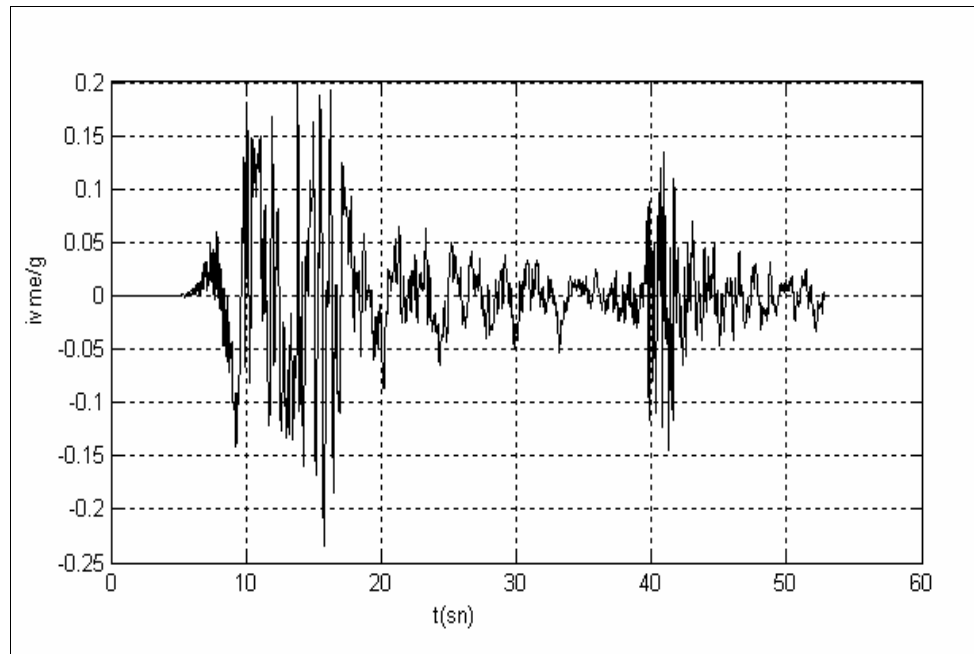
Taşıyıcı sistemin modal analizi eşdeğer çerçeve analojisi ile SAP 2000 V.9 analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiş, modal parametreleri (periyotlar, açısal frekanslar, modal sönüm oranları, mod şekilleri) elde edilmiştir.

Tablo 6.1 Taşıyıcı sistemin modal parametreleri

Mod	1	2	3	4
Periyot (sn)	0,173	0,05	0,026	0,019
Açısal Frekans (rad/sn) $\omega_{pi}$	36,23	125,08	237,4	325,7
Modal Kütle (Mi)	453,6	24,9	17,3	3,75
Modal Katılım Faktörü ( $\Gamma_i$ )	-5,815	2,6	-1,321	0,647
Mod Şekli ( $\Phi_{1,i}$ )	0,0418	-0,1458	0,2098	-0,156
Mod Şekli ( $\Phi_{4,i}$ )	0,2285	0,173	0,118	0,055
Modal Sönüm Oranları ( $\zeta_i$ )	0,0254	0,0304	0,0511	0,0681

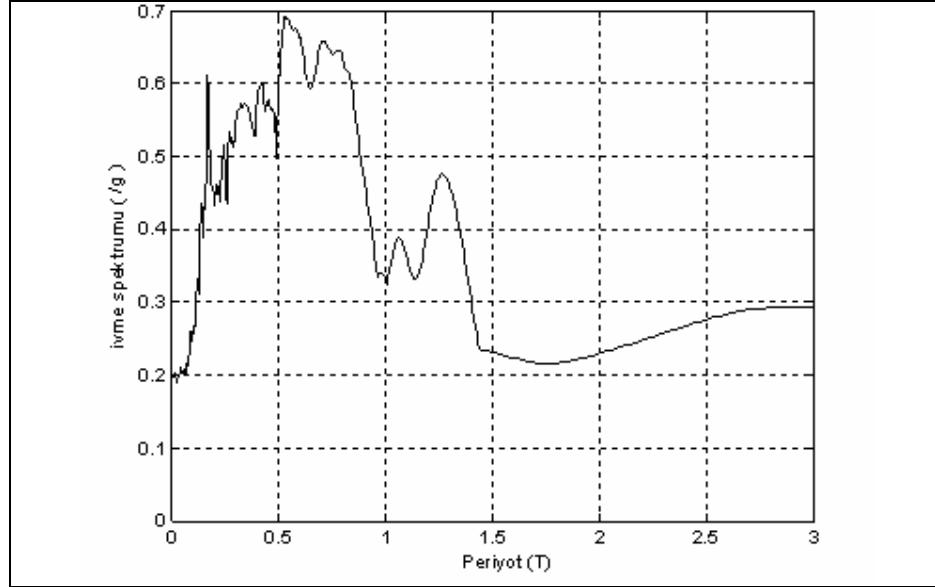
Taşıyıcı sistem ve tek serbestlik dereceli ekipmandan oluşan birleşik sistemin, klasik olmayan sönüm, dinamik etkileşim ve frekans örtüşmesi parametrelerine bağlı olarak modal parametreleri elde edilmiştir. Taşıyıcı sistem sönüm oranı % 5, ikincil sistem sönüm oranı % 2 olarak alınmıştır (Igusa ve Kiureghian,1985).

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde, Yarımca-Petkim’de Doğu-Batı doğrultusunda ölçülen güçlü yer ivmelerinin yapıya etkidiği varsayılmış, güç spektral yoğunluk fonksiyonu belirli aralıkta sabit olmak üzere, t=10-20 sn aralığında stasyoner olarak göz önüne alınmıştır. % 5 sönüm oranı için SPEKTRUM yazılımı ile elde edilmiş normalize edilmiş ivme tepki spektrumu da Şekil 6.3’te verilmektedir (Kasımzade, 2004).



Şekil 6.2 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminin Yarımca Doğu-Batı ivme kayıtları (Kasımzade, 2004).

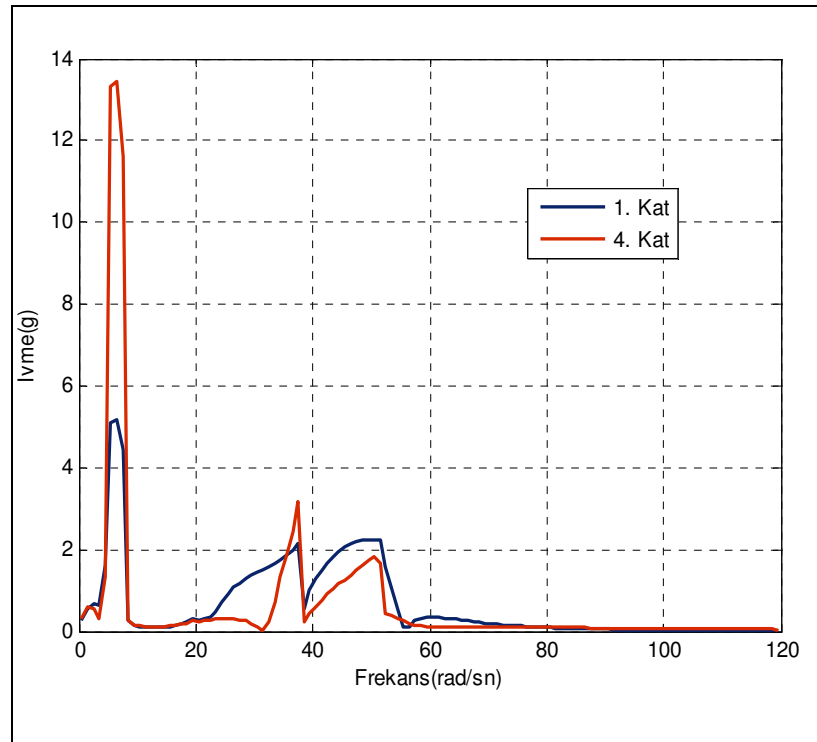
Şekil 6.3'teki taşıyıcı sistem periyotlarına karşılık gelen ivme tepki spektrumu değerleri;  $S_1= 0,5926g$ ,  $S_2=0,2030g$ ,  $S_3=0,1955g$  ve  $S_4=0,1993g$  olarak elde edilmiştir. Kat ivme tepki spektrumunun oluşturulmasında stokastik yaklaşım uygulanmış, deprem etkisinin stasyoner olduğu durum için korelasyon katsayıları ve yapının ivme tepki spektrumu değerlerine bağlı spektral momentler elde edilmiştir.



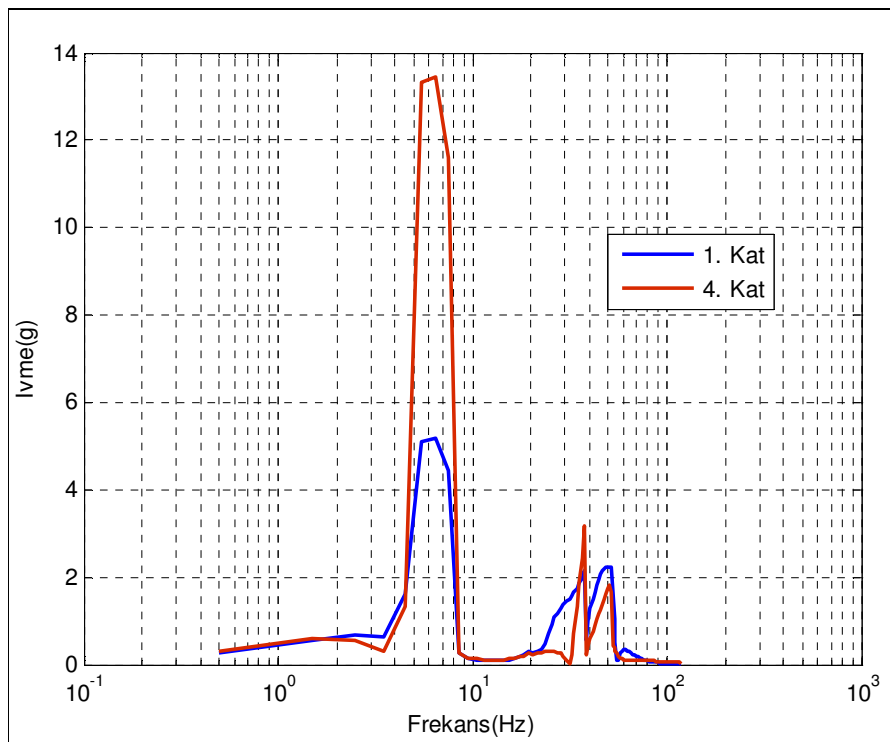
Şekil 6.3 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi % 5 sönüm oranı için ivme tepki spektrumu (Kasımzade, 2004).

Modal pik faktörleri, güçlü yer ivmelerinin stasyonere kabul edildiği zaman aralığında hesaplanarak maksimum ivme değerlerinin ortalaması elde edilmiştir. Kat ivme tepki spektrumu, ekipman açılma frekansının belirli bir aralığı için elde edilen bu maksimum ivme değerlerinin ortalamasının grafik olarak gösterimidir. 3 ton ağırlığındaki ekipman için kat ivme tepki spektrumu değerleri taşıyıcı sistemde bulunduğu serbestlik derecelerine göre ekipman açılma frekansına bağlı olarak Şekil 6.4 ve 6.5'te verilmektedir (EK-1).

Ekipman açılma frekansının yapı açılma frekansına yakın olduğu durumda, sistemde frekans örtüşmesi oluşmaktadır. Güçlü yer ivmelerine maruz yapıdaki ekipmanın dinamik tepkisi, bu durumda tepe değerlere ulaşmaktadır. Şekil 6.4'te görüldüğü gibi ekipmanın bulunduğu kata bağlı olarak ivme tepki spektrumu değerleri değişmektedir. *Kat ivme tepki spektrumlarında*, tepe noktalarının değeri taşıyıcı sistem ve ikincil sistemin frekanslarının örtüştüğü modlara ve ekipmanın parametrelerine bağlıdır. Taşıyıcı sistem ilk modu için modal sönüm oranı düşük olduğundan, ilk tepe değeri diğer modlardaki değerlerine göre daha yüksektir.



Şekil 6.4 Ekipmanın bulunduğu 1. ve 4. katlar için Kat İvme Tepki Spektrumu



Şekil 6.5 Ekipmanın bulunduğu 1. ve 4. katlar için Kat İvme Tepki Spektrumu

Ekipmanın mesnetlendiği kattaki mod şekli ya da modal katılım faktörü değerlerinin küçük olması da tepe değerlerinin düşük değerler almasına neden olur. Bu nedenle her kat için ivme tepki spektrumları farklı değerler almaktadır. Şekil 6.4'te 3 ton ağırlığındaki ekipman için bulunduğu 1. katta maruz kaldığı maksimum ivme değeri, frekans örtüşmesi durumunda, 5,18g iken; aynı ekipman 4. katta 13,43g ivmeye maruz kalmaktadır.

*Kat İvme Tepki Spektrumu* ile tek serbestlik dereceli ekipmanın doğal açıl frekansına karşılık gelen ivme değeri bulunarak güçlü yer ivmelerine maruz yapıda bulunduğu katta maksimum ivme değeri belirlenebilir.

### 6.3 Ekipmana Etkiyen Eşdeğer Deprem Yükü Hesabı

*Tasarım bazlı yöntem*, taşıyıcı sisteme en fazla iki noktadan bağlı ikincil sistemlerin dinamik analizinde, sisteme etkiyen eşdeğer deprem yükünün hesabında kullanılmak üzere uygulanan yöntemdir (Villaverde,2006).

Hastane yapısının 4. katındaki 3 tonluk ekipmana etkiyen eşdeğer deprem yükünün hesabı aşağıda verilmektedir.

$$\Phi_0 = \frac{Wh_{ort}}{\sum_{i=1}^N W_i h_i}$$

$$\Phi_0 = \frac{324 * 12,8}{81(3,2 + 6,4 + 9,6 + 12,8)} = 1,6$$

$T_1=0,173$  sn,  $w_s = 3$  t,  $\phi_{41} = 0,2285$  ve  $S_a(g) = 0,5926$  olmak üzere;

$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{2w_s}{W} + \frac{(1+0,5T)^2 - 1}{200\Phi_0^2}}} \leq \frac{\sqrt{200\Phi_0}}{1+0,5T}$$



$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{2.3}{324} + \frac{(1+0,5 \cdot 0,173)^2 - 1}{200 \cdot 1,6^2}}} = 7,28 < 16,46$$

$$F_{sj} = C_p W_{sj} \phi_{j1} \frac{S_a(\omega_0, \zeta_0)}{g}$$

$$F_s = 7,28 * 3 * 0,2285 * 0,5926 = 2,96 \text{ t.}$$

“Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-2007”de mekanik ve elektrik donanımına etkiyen eşdeğer deprem yükleri

$$f_e = 0,5 A_0 I W_e \left( 1 + 2 \frac{H_i}{H_N} \right)$$

ile verilmektedir.

Yapı birinci derece deprem bölgesinde ve hastane yapısı olduğundan  $A_0=0,40$ ,  $I=1,5$  alınarak ekipmana etki eden eşdeğer deprem yükü,

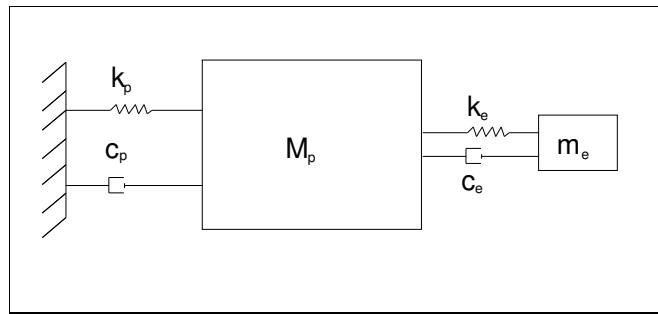
$$f_e = 0,5 * 0,40 * 1,5 * 3 \left( 1 + 2 \frac{12,8}{12,8} \right)$$

$$f_e = 2,8 \text{ t elde edilmiştir.}$$

Tasarım bazlı yöntem ve yönetmelikten elde edilen, ikincil sisteme etki eden eşdeğer deprem yükü değerleri birbirine oldukça yakın değerde bulunmuştur. Ancak *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelikte* verilen ekipmana etkiyen eşdeğer deprem yükü, depreme dayanıklı yapı tasarımında uluslararası alanda kabul gören birçok yönetmelikte yer alan formüllere kıyasla, bileşen büyütme faktörü ve spektral ivme değerine bağlı değildir.

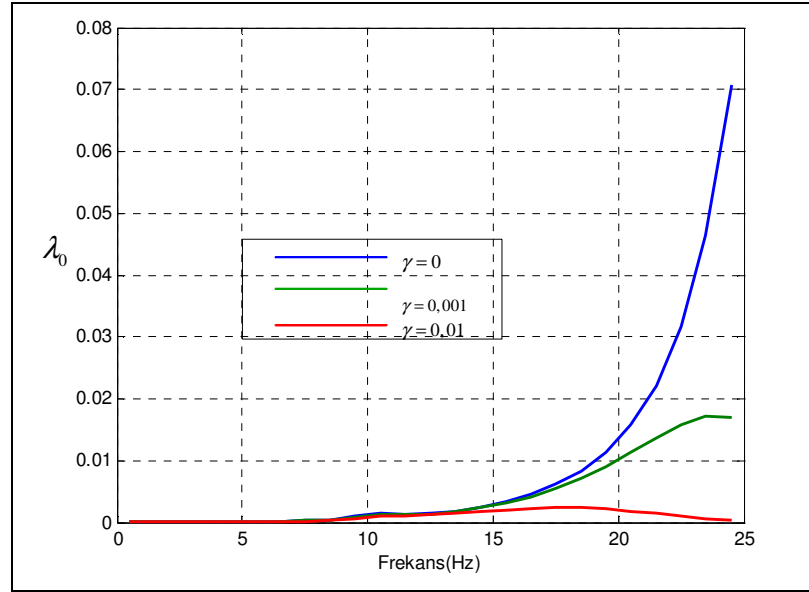
#### 6.4 Dinamik Karakteristiklerin Sistem Tepkisine Etkileri

Taşıyıcı sistem ve ikincil sistem arasındaki dinamik etkileşim, özellikle sistemlerin kütle oranının düşük olması ve frekans örtüşmesi durumlarında, birleşik sistem tepkilerinin büyük değerler almasına neden olur. Sistemler arası dinamik etkileşim etkisini incelemek amacıyla, tek serbestlik dereceli taşıyıcı sisteme bağlı ikincil sistem incelenerek, farklı kütle oranları için sistem tepkileri Bölüm 3'te belirtilen esaslara göre stokastik yaklaşımla elde edilmiştir. Ekte MATLAB bilgisayar programı ile birleşik sistem tepkilerinin elde edilmesi verilmiştir (EK-2).



Şekil 6.6 Tek serbestlik dereceli taşıyıcı sistem ve tek serbestlik dereceli ikincil sistemden oluşan birleşik sistem.

Farklı ekipman kütleleri için, taşıyıcı ve ikincil sistemler arası dinamik etkileşimin etkisi, birleşik sistem tepkisinin ekipman açılal frekansına bağlı olarak Şekil 6.7'de verilmektedir. Buna göre, ikincil sistem kütlesinin ihmal edildiği durumda ( $m_e=0$ ) birleşik sistem tepkileri büyük değerlere ulaşmaktadır ( $\gamma=0$ ). İkincil sistem kütlesindeki artışa bağlı olarak da birleşik sistem tepkileri azalmaktadır. Sistemler arası dinamik etkileşim, özellikle ikincil sistem kütlelerinin taşıyıcı sisteme göre ihmal edilemeyeceği ve frekans örtüşmesi durumlarında etkili olan, ikincil sistem tepkisini azaltabilen parametredir.



Şekil 6.7 Birleşik sistem tepkilerinin kütle oranına bağlı değişimi ( $\omega_p = 10$  rad/sn).

## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, yapısal olmayan elemanlar ya da ikincil sistemlerin deprem sırasında maruz kaldıkları etkiler, ikincil sistemlerin dinamik analizinde ortaya konulan yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir:

- İkincil sistemlerin; özellikle deprem sonrası oluşabilecek hasarlara bağlı işlev kayıplarına karşı hastaneler, itfaiye binaları ve nükleer santraller gibi yapılarda, yapının dinamik analizinde göz önüne alınması gereklidir.
- İkincil sistemleri taşıyıcı sistemden ayrı olarak inceleyerek, sistemler arası dinamik etkileşimi ihmal etmek, özellikle kütle oranının büyük olduğu durumlarda sistemin dinamik tepkilerinin çok büyük değerlere ulaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle de, hem *kat tepki spektrumu yöntemi*; hem de *tasarım bazlı yöntemde* sistemlerin birleşik sistem olarak göz önüne alınmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır.
- Kat ivme tepki spektrumu ile ekipmanın bulunduğu katta, belirli bir deprem kaydı göz önüne alınarak, ekipmanın doğal açısız frekansına karşılık gelen ve ekipmana etkileyen ivme değeri belirlenebilir. Tasarım bazlı yöntemde ise; yapı yönetmeliklerinde verilen eşdeğer deprem yüklerine benzer şekilde ekipmana etkileyen eşdeğer deprem yükü belirlenebilmektedir. *Kat ivme tepki spektrumunun*, özellikle ekipman kütle oranı büyük yapılarda, sistemin dinamik tepkisinin daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. İkincil sistem kütle oranının küçük mertebelerde olduğu durumda ise sistem frekans örtüşmesi durumunda büyük ivme değerlerine maruz kalmaktadır. *Kat ivme tepki spektrumunun* özellikle kütle oranı yüksek ikincil sistemlerin bulunduğu santral yapılarında uygulanması, sistem tepkileri için daha kesin sonuçlara ulaşmayı sağlayabilir.
- Ülkemizde, depremler nedeniyle yapı taşıyıcı sisteminde meydana gelen hasarlar, ikincil sistemler ya da yapısal olmayan elemanlarda oluşacak hasarların geri planda kalmasına yol açmıştır. Uluslararası yapı yönetmeliklerinde eşdeğer deprem yükü, ikincil sistemlerin karakteristik özelliklerine göre belirlenmiş olmasına karşın; Deprem Yönetmeliği'nde bu konuda kısıtlı maddeler yer almakla birlikte önerilen ifade spektral ivme değerine bağlı değildir. Aynı zamanda, 2.11 Bölümü'nde verilen

bu eşdeğer deprem yükü, 1998 Deprem Yönetmeliği'ndeki değerinin de yarısıdır. İkincil sistemlerin dinamik analizi ile ilgili koşullar düzenlendiğinde ekipmana etkiyen deprem yükü; yapı mod şekli ve maruz kaldığı deprem ivmesine göre olacağından daha yakın sonuçlar verebilir.

- *Kat ivme tepki spektrumu*, daha kesin sonuçlar vermekle beraber, işlem hacmi bakımından diğer yöntemlere kıyasla daha çok zaman almaktadır. Bu nedenle gerçekçi ve kullanıcı dostu hesap yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

**KAYNAKLAR**

- Amin, M., Hall, W.J., Newmark, N.M., & Kassawara, R.P. (1971). Earthquake Response of Multiply Connected Light Secondary Systems by Spectrum Methods, in *ASME First National Congress on Pressure Vessels and Piping*, San Francisco, CA, American Society of Civil Engineers, pp. 103–129.
- Asfura, A. & Kiureghian, A. D., (1984). A New Floor Response Spectrum Method for Seismic Analysis of Multiply Supported Secondary Systems, Earthquake Engineering and Research Center. College of Engineering University of California. Berkeley, California.
- Atalik, T.S. (1978). An Alternative Definition of Instructure Response Spectra, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*,6(1), 71–78.
- Asfura, A. & Kiureghian, A. D., (1986). Floor Response Spectrum Method for Seismic Analysis of Multiply Supported Secondary Systems. *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, Vol. 14, 245–265.
- Bayazit, M. ,Oğuz B. (1994). *Mühendisler için İstatistik (2. Baskı)*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Biggs, J.M., & Roesset, J.M. (1970). Seismic Analysis of Equipment Mounted on a Massive Structure, in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, Hansen, R.J., Ed., MIT Press, Cambridge, MA, pp. 319–343.
- Celep, Z. ,Kumbasar, N. (1996). *Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş (2. Baskı)*. Beta Dağıtım, İstanbul.
- Chen Y. & Soong T.T. (1988). Seismic Response of Secondary Systems, State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*, Vol. 10, 218-228.

- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures*. Prentice Hall, New Jersey.
- Clough, R.W., & Penzien, J. (1993). *Dynamics of Structures* (2nd Edition). McGraw-Hill, Singapore.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007), İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Subesi Yayını, No. 53.
- Filiatraut, A., Christopoulos, C.,& Stearns, C. (2001). Guidelines, Specifications and Seismic Performance Characterization of Nonstructural Building Components and Equipment. Pasific Earthquake Engineering Research Center, California.
- Gupta, A. K., & Jaw, J. W. (1986). A New Instructure Response Spectrum (IRS) Method for Multiply Connected Secondary Systems with Coupling Effects. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 96, 63-80.
- Gülkan, P. ,& Yaman, İ. Ö. (1997). Tali Sistemlerin Dinamik Hesabında Kullanılan Kat Davranış Spektrumu. *İMO Teknik Dergi*,1997, 1491-1506.
- Gülkan, P., & Yaman, İ.Ö. (1997). Floor Response Spectrum Approach in Dynamic Analysis of Secondary Subsystems. *İMO Teknik Dergi*,1997, 453-456.
- Igusa, T., & Kiureghian A. D. (1985a). Dynamic Response of Multiply Supported Secondary Systems. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 111, No.1, 20-41.
- Igusa, T., & Kiureghian A. D. (1985b). Generation of Floor Response Spectra Including Oscillator-Structure Interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 13, 661-676.
- Igusa, T., Kiureghian A. D.,& Sackman J. L. (1984). Modal Decomposition Method for Stationary Response of Non-Classically Damped Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, 121-136.

- Johnson, G. S. (2003), Equipment and Systems. *Handbook of Earthquake Engineering. Chapter 20*. CRC Press.
- Kapur, K.K., & Shao, L.C. (1973). Generation of seismic floor response spectra for Equipment Design, in *Proceedings of ASCE Conference on Structural Design of Nuclear Power Plants Facilities*, Chicago, IL, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 2, pp. 29–71.
- Kasımzade, A. A. (2004). *Yapı Dinamiği* (2. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Kalafat, E. (2006). Tesisatlarda Sismik Koruma. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Isıtma, Soğutma, Havalandırma, Klima, Yangın ve Sıhhi Tesisat Dergisi*, Sayı 23, 1-15.
- Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of Vibrations* (1st Ed.). Singapore, McGraw-Hill.
- Newmark, N. M. & Hall, J.W. (1982). *Earthquake Spectra and Design*. Earthquake Engineering Research Institute, California.
- Peters, K.A., Schmitz, D., & Wagner, U. (1977). Determination of Floor Response Spectra on the Basis of The Response Spectrum Method, *Nucl. Eng. Design*, 44(2), 255–262.
- Sabol, T. A., (1989). Chapter 12. Design of Nonstructural Systems and Components. *The Seismic Design Handbook, Edited by Naeim*. Chapman & Hall, California.
- Sackman, J. L., Kiureghian, A. D., & Nour-Omid, B. (1983a). Dynamic Analysis of Light Equipment in Structures: Modal Properties of The Combined System. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 109, No:1, 73-89.



- Sackman, J. L., Kiureghian, A. D., & Nour-Omid, B. (1983b). Dynamic Analysis of Light Equipment in Structures: Response to Stochastic Input. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 109, No:1, 90-101.
- Saudy, A., Aziz, T., & Ghobarah, A. (1994). A New Stochastic Analysis of Multiple Supported Secondary Systems: I. Dynamic Interaction Effects. *Nuclear Engineering and Design*, Vol 147, 235-249.
- Singh, M.P. (1980). Seismic Design Input for Secondary Systems, *J. Struct. Div.*, 106(2), 505–517.
- Singh, M.P. & Sharma, A. M. (1985). Seismic Floor Spectra by Mode Acceleration Approach . *Journal of The Engineering Mechanics*, Vol. 111, No.11.
- Singh, M.P., Moreschi, L. M., Suarez, L. E., & Matheu, E. E. (2006a). Seismic Design Forces I: Rigid Nonstructural Elements. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No:10, 1524-1532.
- Singh, M.P., Moreschi, L. M., Suarez, L. E., & Matheu, E. E. (2006b). Seismic Design Forces II: Flexible Nonstructural Elements. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No:10, 1532-1542.
- Suarez, L.E. & Singh, M.P. (1987). Seismic Response of SDF Equipment-Structure System. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 113, No.1.
- Şakar, G. (2000). *Hastanelerde Yapısal Olmayan Hasarların Azaltılması*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi. 92 Sayfa.
- TS 498, *Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Vanmarcke, E.H. (1977). A Simple Procedure for Predicting Amplified Response Spectra and Equipment Response, in *Proceedings of 6th World Conference on*

*Earthquake Engineering*, New Delhi, India, Sarita Prakashan, Meerut, Vol. III, pp. 3323–3327.

Villaverde, R., (1986). Simplified Seismic Analysis of Piping or Equipment Mounted on Two Points of a Multistory Structure. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 92, 37–50.

Villaverde, R., (1986). Simplified Seismic Analysis of Secondary Systems. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No:3, 588–604.

Villaverde, R., (1991). Approximate Formulas to Calculate The Seismic Response of Light Attachments to Buildings. *Nuclear Engineering And Design*, Vol. 128, 349–368.

Villaverde, R., (1997). Method to Improve Seismic Provisions for Nonstructural Components in Buildings. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No:4, 432–439.

Villaverde, R., (1997). Seismic Design of Secondary Structures: State of The Art. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No:8, 1011–1019.

Villaverde, R., (2004). Chapter 19. *Seismic Analysis and Design of Nonstructural Elements. Earthquake Engineering From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. CRC Press.

Villaverde, R., (2006). Simple Method to Estimate The Seismic Nonlinear Response of Nonstructural Components in Buildings. *Engineering Structures*, Vol. 28, 1209–1221.

Yaman, İ. Özgür (1995). M Sc. Thesis. Floor Response Spectrum Development for Structural Systems. Middle East Technical University. 88 Page.

## EKLER

### EK-1. KAT İVME TEPKİ SPEKTRUMUNUN MATLAB 7.0 PROGRAMI KULLANILARAK OLUŞTURULMASI

#### % BİRLEŞİK SİSTEM MODAL PARAMETRELERİ

```

me=3, we=0.5:120, so1=0.0254, soe=0.02;
wp1=5.76 ,gen1=0.2285,M1=453.6;
gama1=(gen1)^2*(me/M1);
wa1=(we+wp1)/2;
beta1=(wp1-we)./wa1;
delta1=(so1-soe*wp1./we)*wp1./we;
z1=sqrt(gama1+(((wp1*so1)./wa1-soe*we./wa1)*i+beta1).^2);
w1=wa1.*(1+0.5*sign(beta1)*real(z1)');
son1=(wa1./(2.*w1)).*((so1*(w1./wa1)+(we./wa1)*soe+sign(beta1)*imag(z1)'));

wp2=19.91 ,gen2=0.173 ,M2=24.9, so2=0.0304;
gama2=(gen2)^2*(me/M2);
wa2=(we+wp2)/2;
beta2=(wp2-we)./wa2;
delta2=(so2-soe*wp2./we)*wp2./we;
z2=sqrt(gama2+(((wp2*so2)./wa2-soe*we./wa2)*i+beta2).^2);
w2=wa2.*(1+0.5*sign(beta2)*real(z2)');
son2=(wa2./(2.*w2)).*((so2*(w2./wa2)+(we./wa2)*soe+sign(beta2)*imag(z2)'));

wp3=37.78, gen3=0.118, M3=17.3, so3=0.051;
gama3=(gen3)^2*(me/M3);
wa3=(we+wp3)/2;
beta3=(wp3-we)./wa3;
delta3=(so3-soe*wp3./we)*wp3./we;
z3=sqrt(gama3+(((wp3*so3)./wa3-soe*we./wa3)*i+beta3).^2);

```

```
w3=wa3.*(1+0.5*sign(beta3)*real(z3)');
son3=(wa3./(2.*w3)).*((so3*(w3./wa3)+(we./wa3)*soe+sign(beta3)*imag(z3)'));
```

```
wp4=51.83 ,gen4=0.055 ,M4=3.75, so4=0.0681;
gama4=(gen4)^2*(me/M4);
wa4=(we+wp4)/2;
beta4=(wp4-we)./wa4;
delta4=(so4-soe*wp4./we)*wp4./we;
z4=sqrt(gama4+(((wp4*so4)./wa4-soe*we./wa4)*i+beta4).^2);
w4=wa4.*(1+0.5*sign(beta4)*real(z4)');
son4=(wa4./(2.*w4)).*((so4*(w4./wa4)+(we./wa4)*soe+sign(beta4)*imag(z4)'));
```

#### **% MODAL KATSAYILAR**

```
f11=(-1/gen1)*((beta1.*(wa1./we).^2+i*delta1.*(w1./we)+(sign(beta1).*
sqrt(gama1+(beta1.*(wa1./we).^2+i*delta1.*(w1./we)).^2)))));
f12=(-1/gen2)*((beta2.*(wa2./we).^2+i*delta2-
sign(beta2).*sqrt(gama2+(beta2.*(wa2./we).^2+i*delta2).^2)))));
f13=(-1/gen3)*((beta3.*(wa3./we).^2+i*delta3-
sign(beta3).*sqrt(gama3+(beta3.*(wa3./we).^2+i*delta3).^2)))));
f14=(-1/gen4)*((beta4.*(wa4./we).^2+i*delta4-
sign(beta4).*sqrt(gama4+(beta4.*(wa4./we).^2+i*delta4).^2)))));
```

```
f22=(-1/gen2)*((beta2.*(wa2./we).^2+i*delta2.*(w2./we)+(sign(beta2).*
sqrt(gama2+(beta2.*(wa2./we).^2+i*delta2.*(w2./we)).^2)))));
f21=(-1/gen1)*((beta1.*(wa1./we).^2+i*delta1-
sign(beta1).*sqrt(gama1+(beta1.*(wa1./we).^2+i*delta1).^2)))));
f23=(-1/gen3)*((beta3.*(wa3./we).^2+i*delta3-
sign(beta3).*sqrt(gama3+(beta3.*(wa3./we).^2+i*delta3).^2)))));
f24=(-1/gen4)*((beta4.*(wa4./we).^2+i*delta4-
sign(beta4).*sqrt(gama4+(beta4.*(wa4./we).^2+i*delta4).^2)))));
```

f33=(-1/gen3)\*((beta3.\*(wa3./we).^2+i\*delta3.\*(w3./we)+(sign(beta3).\*  
sqrt(gama3+(beta3.\*(wa3./we).^2+i\*delta3.\*(w3./we).^2))));

f31=(-1/gen1)\*((beta1.\*(wa1./we).^2+i\*delta1-  
sign(beta1).\*sqrt(gama1+(beta1.\*(wa1./we).^2+i\*delta1).^2));

f32=(-1/gen2)\*((beta2.\*(wa2./we).^2+i\*delta2-  
sign(beta2).\*sqrt(gama2+(beta2.\*(wa2./we).^2+i\*delta2).^2));

f34=(-1/gen4)\*((beta4.\*(wa4./we).^2+i\*delta4-  
sign(beta4).\*sqrt(gama4+(beta4.\*(wa4./we).^2+i\*delta4).^2));

f44=(1/gen4)\*((beta4.\*(wa4./we).^2+i\*delta4.\*(w4./we)+(sign(beta4).\*sqrt(gama4+  
(beta4.\*(wa4./we).^2+i\*delta4.\*(w4./we).^2))));

f41=(-1/gen1)\*((beta1.\*(wa1./we).^2+i\*delta1-  
sign(beta1).\*sqrt(gama1+(beta1.\*(wa1./we).^2+i\*delta1).^2));

f42=(-1/gen2)\*((beta2.\*(wa2./we).^2+i\*delta2-  
sign(beta2).\*sqrt(gama2+(beta2.\*(wa2./we).^2+i\*delta2).^2));

f43=(-1/gen3)\*((beta3.\*(wa4./we).^2+i\*delta3-  
sign(beta3).\*sqrt(gama3+(beta3.\*(wa3./we).^2+i\*delta3).^2));

### **% KOMPLEKS AÇISAL FREKANSLAR**

s1=-w1.\*son1+i\*w1.\*sqrt(1-son1.^2);

s2=-w2.\*son2+i\*w2.\*sqrt(1-son2.^2);

s3=-w3.\*son3+i\*w3.\*sqrt(1-son3.^2);

s4=-w4.\*son4+i\*w4.\*sqrt(1-son4.^2);

### **% KATSAYILAR**

#### **% bi KATSAYISI(bi=Ai/Bi)**

n1=-5.815, n2=2.60, n3=-1.321, n4=0.647

A1=s1.\*((f11\*n1\*M1+f12\*n2\*M2+f13\*n3\*M3+f14\*n4\*M4+me).\*(-f11\*gen1-  
f12\*gen2-f13\*gen3-f14\*gen4+1));

$$B1 = ((s1.^2).*(f11.^2*M1+f12.^2*M2+f13.^2*M3+f14.^2*M4+me))-$$

$$(((w1.^2.*f11.^2*M1)+(w2.^2.*f12.^2*M2)+(w3.^2.*f13.^2*M3)+(w4.^2.*f14.^2*M4)+(we.^2*me)-(we.^2*me).*(gen1*f11+gen2*f12+gen3*f13+gen4*f14)));$$

$$b1 = A1./B1;$$

$$A2 = s2.*((f21.*n1*M1+f22.*n2*M2+f23.*n3*M3+f24.*n4*M4+me).*(-f21*gen1-$$

$$f22*gen2-f23*gen3-f24*gen4+1));$$

$$B2 = ((s2.^2).*(f21.^2*M1+f22.^2*M2+f23.^2*M3+f24.^2*M4+me))-$$

$$(((w1.^2.*f21.^2*M1)+(w2.^2.*f22.^2*M2)+(w3.^2.*f23.^2*M3)+(w4.^2.*f24.^2*M4)+(we.^2*me)-(we.^2*me).*(gen1*f21+gen2*f22+gen3*f23+gen4*f24)));$$

$$b2 = A2./B2;$$

$$A3 = s3.*((f31.*n1*M1+f32.*n2*M2+f33.*n3*M3+f34.*n4*M4+me).*(-f31*gen1-$$

$$f32*gen2-f33*gen3-f34*gen4+1));$$

$$B3 = ((s3.^2).*(f31.^2*M1+f32.^2*M2+f33.^2*M3+f34.^2*M4+me))-$$

$$(((w1.^2.*f31.^2*M1)+(w2.^2.*f32.^2*M2)+(w3.^2.*f33.^2*M3)+(w4.^2.*f34.^2*M4)+(we.^2*me)-(we.^2*me).*(gen1*f31+gen2*f32+gen3*f33+gen4*f34)));$$

$$b3 = A3./B3 ;$$

$$A4 = s4.*((f41.*n1*M1+f42.*n2*M2+f43.*n3*M3+f44.*n4*M4+me).*(-f41*gen1-$$

$$f42*gen2-f43*gen3-f44*gen4+1));$$

$$B4 = ((s4.^2).*(f41.^2*M1+f42.^2*M2+f43.^2*M3+f44.^2*M4+me))-$$

$$(((w1.^2.*f41.^2*M1)+(w2.^2.*f42.^2*M2)+(w3.^2.*f43.^2*M3)+(w4.^2.*f44.^2*M4)+(we.^2*me)-(we.^2*me).*(gen1*f41+gen2*f42+gen3*f43+gen4*f44)));$$

$$b4 = A4./B4;$$

### **% ai, ci KATSAYILARI**

$$a1 = 2*real(b1.*s1);$$

$$c1 = 2*real(b1);$$

$$a2 = 2*real(b2.*s2);$$

$$c2 = 2*real(b2);$$

$$a3=2*\text{real}(b3.*s3);$$

$$c3=2*\text{real}(b3);$$

$$a4=2*\text{real}(b4.*s4);$$

$$c4=2*\text{real}(b4);$$

### **% KORELASYON KATSAYILARI**

$$K11=4.*w1.*w1.*(w1.*\text{son1}+w1.*\text{son1}).*(w1.*\text{son1}+w1.*\text{son1});$$

$$K12=(w1.^2-w2.^2).^2+4.*w1.*w2.*(w1.*\text{son1}+w2.*\text{son2}).*(w1.*\text{son2}+w2.*\text{son1});$$

$$K13=(w1.^2-w3.^2).^2+4.*w1.*w3.*(w1.*\text{son1}+w3.*\text{son3}).*(w1.*\text{son3}+w3.*\text{son1});$$

$$K14=(w1.^2-w4.^2).^2+4.*w1.*w4.*(w1.*\text{son1}+w4.*\text{son4}).*(w1.*\text{son4}+w4.*\text{son1});$$

$$K22=4.*w2.*w2.*(w2.*\text{son2}+w2.*\text{son2}).*(w2.*\text{son2}+w2.*\text{son2});$$

$$K21=(w2.^2-w1.^2).^2+4.*w2.*w1.*(w2.*\text{son2}+w1.*\text{son1}).*(w2.*\text{son1}+w1.*\text{son2});$$

$$K23=(w2.^2-w3.^2).^2+4.*w2.*w3.*(w2.*\text{son2}+w3.*\text{son3}).*(w2.*\text{son3}+w3.*\text{son2});$$

$$K24=(w2.^2-w4.^2).^2+4.*w2.*w4.*(w2.*\text{son2}+w4.*\text{son4}).*(w2.*\text{son4}+w4.*\text{son2});$$

$$K33=4.*w3.*w3.*(w3.*\text{son3}+w3.*\text{son3}).*(w3.*\text{son3}+w3.*\text{son3});$$

$$K31=(w3.^2-w1.^2).^2+4.*w3.*w1.*(w3.*\text{son3}+w1.*\text{son1}).*(w3.*\text{son1}+w1.*\text{son3});$$

$$K32=(w3.^2-w2.^2).^2+4.*w3.*w2.*(w3.*\text{son3}+w2.*\text{son2}).*(w3.*\text{son2}+w2.*\text{son3});$$

$$K34=(w3.^2-w4.^2).^2+4.*w3.*w4.*(w3.*\text{son3}+w4.*\text{son4}).*(w3.*\text{son4}+w4.*\text{son3});$$

$$K44=4.*w4.*w4.*(w4.*\text{son4}+w4.*\text{son4}).*(w4.*\text{son4}+w4.*\text{son4});$$

$$K41=(w4.^2-w1.^2).^2+4.*w4.*w1.*(w4.*\text{son4}+w1.*\text{son1}).*(w4.*\text{son1}+w1.*\text{son4});$$

$$K42=(w4.^2-w2.^2).^2+4.*w4.*w2.*(w4.*\text{son4}+w2.*\text{son2}).*(w4.*\text{son2}+w2.*\text{son4});$$

$$K43=(w4.^2-w3.^2).^2+4.*w4.*w3.*(w4.*\text{son4}+w3.*\text{son3}).*(w4.*\text{son3}+w3.*\text{son4});$$

$$\text{bet1}=\text{sqrt}(1-\text{son1}.^2);$$

$$\text{bet2}=\text{sqrt}(1-\text{son2}.^2);$$

$$\text{bet3}=\text{sqrt}(1-\text{son3}.^2);$$

$$\text{bet4}=\text{sqrt}(1-\text{son4}.^2);$$

**% r0,ij**

$r011 = (8 * (w1 * son1 + w1 * son1) * \sqrt{son1 * son1 * w1.^3 * w1.^3}) ./ K11;$   
 $r012 = (8 * (w1 * son1 + w2 * son2) * \sqrt{son1 * son2 * w1.^3 * w2.^3}) ./ K12;$   
 $r013 = (8 * (w1 * son1 + w3 * son3) * \sqrt{son1 * son3 * w1.^3 * w3.^3}) ./ K13;$   
 $r014 = (8 * (w1 * son1 + w4 * son4) * \sqrt{son1 * son4 * w1.^3 * w4.^3}) ./ K14;$

$r022 = (8 * (w2 * son2 + w2 * son2) * \sqrt{son2 * son2 * w2.^3 * w2.^3}) ./ K22;$   
 $r021 = (8 * (w2 * son2 + w1 * son1) * \sqrt{son2 * son1 * w2.^3 * w1.^3}) ./ K21;$   
 $r023 = (8 * (w2 * son2 + w3 * son3) * \sqrt{son2 * son3 * w2.^3 * w3.^3}) ./ K23;$   
 $r024 = (8 * (w2 * son2 + w4 * son4) * \sqrt{son2 * son4 * w2.^3 * w4.^3}) ./ K24;$

$r033 = (8 * (w3 * son3 + w3 * son3) * \sqrt{son3 * son3 * w3.^3 * w3.^3}) ./ K33;$   
 $r031 = (8 * (w3 * son3 + w1 * son1) * \sqrt{son3 * son1 * w3.^3 * w1.^3}) ./ K31;$   
 $r032 = (8 * (w3 * son3 + w2 * son2) * \sqrt{son3 * son2 * w3.^3 * w2.^3}) ./ K32;$   
 $r034 = (8 * (w3 * son3 + w4 * son4) * \sqrt{son3 * son4 * w3.^3 * w4.^3}) ./ K34;$

$r044 = (8 * (w4 * son4 + w4 * son4) * \sqrt{son4 * son4 * w4.^3 * w4.^3}) ./ K44;$   
 $r041 = (8 * (w4 * son4 + w1 * son1) * \sqrt{son4 * son1 * w4.^3 * w1.^3}) ./ K41;$   
 $r042 = (8 * (w4 * son4 + w2 * son2) * \sqrt{son4 * son2 * w4.^3 * w2.^3}) ./ K42;$   
 $r043 = (8 * (w4 * son4 + w3 * son3) * \sqrt{son4 * son3 * w4.^3 * w3.^3}) ./ K43;$

**% r2,ij**

$r211 = 8 * (\sqrt{son1 * son1 * w1 * w1}) * (w1.^2 * w1 * son1 + w1.^2 * w1 * son1) ./ K11;$   
 $r212 = 8 * (\sqrt{son1 * son2 * w1 * w2}) * (w1.^2 * w2 * son2 + w2.^2 * w1 * son1) ./ K12;$   
 $r213 = 8 * (\sqrt{son1 * son3 * w1 * w3}) * (w1.^2 * w3 * son3 + w3.^2 * w1 * son1) ./ K13;$   
 $r214 = 8 * (\sqrt{son1 * son4 * w1 * w4}) * (w1.^2 * w4 * son4 + w4.^2 * w1 * son1) ./ K14;$

$r222 = 8 * (\sqrt{son2 * son2 * w2 * w2}) * (w2.^2 * w2 * son2 + w2.^2 * w2 * son2) ./ K22;$   
 $r221 = 8 * (\sqrt{son2 * son1 * w2 * w1}) * (w2.^2 * w1 * son1 + w1.^2 * w2 * son2) ./ K21;$   
 $r223 = 8 * (\sqrt{son2 * son3 * w2 * w3}) * (w2.^2 * w3 * son3 + w3.^2 * w2 * son2) ./ K23;$



$$r224=8*(\text{sqrt}(\text{son2}.*\text{son4}.*w2.*w4)).*(w2.^2.*w4.*\text{son4}+w4.^2.*w2.*\text{son2})./K24;$$

$$r233=8*(\text{sqrt}(\text{son3}.*\text{son3}.*w3.*w3)).*(w3.^2.*w3.*\text{son3}+w3.^2.*w3.*\text{son3})./K33;$$

$$r231=8*(\text{sqrt}(\text{son3}.*\text{son1}.*w1.*w3)).*(w3.^2.*w1.*\text{son1}+w1.^2.*w3.*\text{son3})./K31;$$

$$r232=8*(\text{sqrt}(\text{son3}.*\text{son2}.*w2.*w3)).*(w3.^2.*w2.*\text{son2}+w2.^2.*w3.*\text{son3})./K32;$$

$$r234=8*(\text{sqrt}(\text{son3}.*\text{son4}.*w4.*w3)).*(w3.^2.*w4.*\text{son4}+w4.^2.*w3.*\text{son3})./K34;$$

$$r244=8*(\text{sqrt}(\text{son4}.*\text{son4}.*w4.*w4)).*(w4.^2.*w4.*\text{son4}+w4.^2.*w4.*\text{son4})./K44;$$

$$r241=8*(\text{sqrt}(\text{son4}.*\text{son1}.*w4.*w1)).*(w4.^2.*w1.*\text{son1}+w1.^2.*w4.*\text{son4})./K41;$$

$$r242=8*(\text{sqrt}(\text{son4}.*\text{son2}.*w4.*w2)).*(w4.^2.*w2.*\text{son2}+w2.^2.*w4.*\text{son4})./K42;$$

$$r243=8*(\text{sqrt}(\text{son4}.*\text{son3}.*w4.*w3)).*(w4.^2.*w3.*\text{son3}+w3.^2.*w4.*\text{son4})./K44;$$

**% nü1,ij**

$$\text{nu111}=(2*\text{pi}*(-w1.^2+w1.^2).*\text{son1}.*\text{son1}.*w1.^2.*w1.^2.*\text{bet1}.*\text{bet1})./(K11.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})).*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})));$$

$$\text{nu112}=(2*\text{pi}*(-w1.^2+w2.^2).*\text{son1}.*\text{son2}.*w1.^2.*w2.^2.*\text{bet1}.*\text{bet2})./(K12.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})).*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})));$$

$$\text{nu113}=(2*\text{pi}*(-w1.^2+w3.^2).*\text{son1}.*\text{son3}.*w1.^2.*w3.^2.*\text{bet1}.*\text{bet3})./(K13.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})).*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})));$$

$$\text{nu114}=(2*\text{pi}*(-w1.^2+w4.^2).*\text{son1}.*\text{son4}.*w1.^2.*w4.^2.*\text{bet1}.*\text{bet4})./(K14.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})).*\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4})));$$

$$\text{nu122}=(2*\text{pi}*(-w2.^2+w2.^2).*\text{son2}.*\text{son2}.*w2.^2.*w2.^2.*\text{bet2}.*\text{bet2})./(K22.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})).*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})));$$

$$\text{nu121}=(2*\text{pi}*(-w2.^2+w1.^2).*\text{son2}.*\text{son1}.*w2.^2.*w1.^2.*\text{bet2}.*\text{bet1})./(K21.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})).*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})));$$

$$\text{nu123}=(2*\text{pi}*(-w2.^2+w3.^2).*\text{son2}.*\text{son3}.*w2.^2.*w3.^2.*\text{bet2}.*\text{bet3})./(K23.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})).*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})));$$

$$\text{nu124}=(2*\text{pi}*(-w2.^2+w4.^2).*\text{son2}.*\text{son4}.*w2.^2.*w4.^2.*\text{bet2}.*\text{bet4})./(K24.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})).*\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4})));$$

$$\text{nu133}=(2*\text{pi}*(-\text{w3}.^2+\text{w3}.^2).*\text{son3}.*\text{son3}.*\text{w3}.^2.*\text{w3}.^2.*\text{bet3}.*\text{bet3})./(\text{K33}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})));$$

$$\text{nu131}=(2*\text{pi}*(-\text{w3}.^2+\text{w1}.^2).*\text{son3}.*\text{son1}.*\text{w3}.^2.*\text{w1}.^2.*\text{bet3}.*\text{bet1})./(\text{K31}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})));$$

$$\text{nu132}=(2*\text{pi}*(-\text{w3}.^2+\text{w2}.^2).*\text{son3}.*\text{son2}.*\text{w3}.^2.*\text{w2}.^2.*\text{bet3}.*\text{bet2})./(\text{K32}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})));$$

$$\text{nu134}=(2*\text{pi}*(-\text{w3}.^2+\text{w4}.^2).*\text{son3}.*\text{son4}.*\text{w3}.^2.*\text{w4}.^2.*\text{bet3}.*\text{bet4})./(\text{K34}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4})));$$

$$\text{nu144}=(2*\text{pi}*(-\text{w4}.^2+\text{w4}.^2).*\text{son4}.*\text{son4}.*\text{w4}.^2.*\text{w4}.^2.*\text{bet4}.*\text{bet4})./(\text{K44}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4})*\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4})));$$

$$\text{nu141}=(2*\text{pi}*(-\text{w4}.^2+\text{w1}.^2).*\text{son4}.*\text{son1}.*\text{w4}.^2.*\text{w1}.^2.*\text{bet4}.*\text{bet1})./(\text{K41}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet4}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})));$$

$$\text{nu142}=(2*\text{pi}*(-\text{w4}.^2+\text{w2}.^2).*\text{son4}.*\text{son2}.*\text{w4}.^2.*\text{w2}.^2.*\text{bet4}.*\text{bet2})./(\text{K42}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet4}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})));$$

$$\text{nu143}=(2*\text{pi}*(-\text{w4}.^2+\text{w3}.^2).*\text{son4}.*\text{son3}.*\text{w4}.^2.*\text{w3}.^2.*\text{bet4}.*\text{bet3})./(\text{K43}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet4}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})));$$

**% w1,ij**

$$\text{w111}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w1}.*\text{w1})./(\text{bet1}.*\text{bet1})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1}));$$

$$\text{w112}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w1}.*\text{w2})./(\text{bet1}.*\text{bet2})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2}));$$

$$\text{w113}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w1}.*\text{w3})./(\text{bet1}.*\text{bet3})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3}));$$

$$\text{w114}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w1}.*\text{w4})./(\text{bet1}.*\text{bet4})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4}));$$

$$\text{w122}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w2}.*\text{w2})./(\text{bet2}.*\text{bet2})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2}));$$

$$\text{w121}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w2}.*\text{w1})./(\text{bet2}.*\text{bet1})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1}));$$

$$\text{w123}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w2}.*\text{w3})./(\text{bet2}.*\text{bet3})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3}));$$

$$\text{w124}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w2}.*\text{w4})./(\text{bet2}.*\text{bet4})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet4}./\text{son4}));$$

$$\text{w133}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w3}.*\text{w3})./(\text{bet3}.*\text{bet3})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3}));$$

$$\text{w131}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w3}.*\text{w1})./(\text{bet3}.*\text{bet1})*\text{atan}(\text{bet3}./\text{son3})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1}));$$

```
w132=(2/pi).*sqrt((w3.*w2)./(bet3.*bet2).*atan(bet3./son3).*atan(bet2./son2));
w134=(2/pi).*sqrt((w3.*w4)./(bet3.*bet4).*atan(bet3./son3).*atan(bet4./son4));
```

```
w144=(2/pi).*sqrt((w4.*w4)./(bet4.*bet4).*atan(bet4./son4).*atan(bet4./son4));
w141=(2/pi).*sqrt((w4.*w1)./(bet4.*bet1).*atan(bet4./son4).*atan(bet1./son1));
w142=(2/pi).*sqrt((w4.*w2)./(bet4.*bet2).*atan(bet4./son4).*atan(bet2./son2));
w143=(2/pi).*sqrt((w4.*w3)./(bet4.*bet3).*atan(bet4./son4).*atan(bet3./son3));
```

```
% w2,ij
```

```
w211=w1.^2;
w212=w1.*w2;
w213=w1.*w3;
w214=w1.*w4;
```

```
w221=w1.*w2;
w222=w2.^2;
w223=w2.*w3;
w224=w2.*w4;
```

```
w231=w3.*w1;
w232=w3.*w2;
w233=w3.*w3;
w234=w3.*w4;
```

```
w241=w4.*w1;
w242=w4.*w2;
w243=w4.*w3;
w244=w4.*w4;
```

**% Fm,ij**

$$F011=a1.*a1.*r011-(a1.*c1-a1.*c1).*nu111.*w111+c1.*c1.*r211.*w211;$$

$$F012=a1.*a2.*r012-(a1.*c2-a2.*c1).*nu112.*w112+c1.*c2.*r212.*w212;$$

$$F013=a1.*a3.*r013-(a1.*c3-a3.*c1).*nu113.*w113+c1.*c3.*r213.*w213;$$

$$F014=a1.*a4.*r014-(a1.*c4-a4.*c1).*nu114.*w114+c1.*c4.*r214.*w214;$$

$$F021=a2.*a1.*r021-(a2.*c1-a1.*c2).*nu121.*w121+c2.*c1.*r221.*w221;$$

$$F022=a2.*a2.*r022-(a2.*c2-a2.*c2).*nu122.*w122+c2.*c2.*r222.*w222;$$

$$F023=a2.*a3.*r023-(a2.*c3-a3.*c2).*nu123.*w123+c2.*c3.*r223.*w223;$$

$$F024=a2.*a4.*r024-(a2.*c4-a4.*c2).*nu124.*w124+c2.*c4.*r224.*w224;$$

$$F031=a3.*a1.*r031-(a3.*c1-a1.*c3).*nu131.*w131+c3.*c1.*r231.*w231;$$

$$F032=a3.*a2.*r032-(a3.*c2-a2.*c3).*nu132.*w132+c3.*c2.*r232.*w232;$$

$$F033=a3.*a3.*r033-(a3.*c3-a3.*c3).*nu133.*w133+c3.*c3.*r233.*w233;$$

$$F034=a3.*a4.*r034-(a3.*c4-a4.*c3).*nu134.*w134+c3.*c4.*r234.*w234;$$

$$F041=a4.*a1.*r041-(a4.*c1-a1.*c4).*nu141.*w141+c4.*c1.*r241.*w241;$$

$$F042=a4.*a2.*r042-(a4.*c2-a2.*c4).*nu142.*w142+c4.*c2.*r242.*w242;$$

$$F043=a4.*a3.*r043-(a4.*c3-a3.*c4).*nu143.*w143+c4.*c3.*r243.*w243;$$

$$F044=a4.*a4.*r044-(a4.*c4-a4.*c4).*nu144.*w144+c4.*c4.*r244.*w244;$$

**% Lambda 0**

$$S1=0.592635, S2=0.203049, S3=0.1955486, S4=0.199285$$

$$p1=2.89;$$

$$p2=3.31;$$

$$p3=3.56;$$

$$p4=3.68;$$

$$L0 = \frac{(F011 * S1^2)}{(p1^2)} + \frac{(F012 * S1 * S2)}{(p1 * p2)} + \frac{(F013 * S1 * S3)}{(p1 * p2)} + \frac{(F014 * S1 * S4)}{(p1 * p4)} + \frac{(F021 * S2 * S1)}{(p2 * p1)} + \frac{(F022 * S2^2)}{(p2 * p2)} + \frac{(F023 * S2 * S3)}{(p2 * p3)} + \frac{(F024 * S2 * S4)}{(p2 * p4)} + \frac{(F031 * S3 * S1)}{(p3 * p1)} + \frac{(F032 * S3 * S2)}{(p3 * p2)} + \frac{(F033 * S3^2)}{(p3 * p3)} + \frac{(F034 * S3 * S4)}{(p3 * p4)} + \frac{(F041 * S4 * S1)}{(p4 * p1)} + \frac{(F042 * S4 * S2)}{(p4 * p2)} + \frac{(F043 * S4 * S3)}{(p4 * p3)} + \frac{(F044 * S4^2)}{(p4 * p4)};$$

p=sqrt(L0);

x=we\*2\*pi

plot(x,p)

grid on

## EK-2: DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN SİSTEM TEPKİSİNE ETKİLERİNİN MATLAB 7.0 PROGRAMI KULLANILARAK İNCELENMESİ

### % BİRLEŞİK SİSTEM MODAL PARAMETRELERİ

```

me=2,mp=2000,sonp=0.05,sone=0.02,wp=10
we=0.5:25
gama=(me/mp)
wa=(we+wp)/2
beta=(wp-we)./wa
delta=(sonp-sone*wp./we)*wp./we
sona=(sonp+sone)/2
sond=sonp-sone
w1=wa.*(1+0.5*sign(beta).*real(sqrt(gama+(i*sond+beta).^2)))
w2=wa.*(1-0.5*sign(beta).*real(sqrt(gama+(i*sond+beta).^2)))
son1=(wa./w1).*(sona+0.5*sign(beta).*imag(sqrt(gama+(i*sond+beta).^2)))
son2=(wa./w2).*(sona-0.5*sign(beta).*imag(sqrt(gama+(i*sond+beta).^2)))

s1=wa.*(i-sona+sign(beta).*sqrt(gama+(i*sond+beta).^2))
s2=wa.*(i-sona-sign(beta).*sqrt(gama+(i*sond+beta).^2))
kp=wp^2*mp
ke=we.^2*me
m=[mp 0;0 me]
k=[(kp+ke) -ke;-ke ke]
d1=-((wa./we).^2-(i*(wp./we).*delta)-
sign(beta).*sqrt(gama+(i*(wp./we).*delta+(wa./we).^2.*beta).^2)
d2=-((wa./we).^2.*beta-
i.*delta+sign(beta).*sqrt(gama+(i*(wp./we).*delta+(wa./we).^2.*beta).^2)

b1=-((s1.*(d1.*mp+d2.*me))./(s1.^2.*((d1.^2*mp+me)-(d1.^2.*kp+ke.*(d1-1).^2))))
b2=-((s2.*(d1.*mp+d2.*me))./(s2.^2.*((d1.^2*mp+me)-(d1.^2.*kp+ke.*(d1-1).^2))))

```

$$a1=2*\text{real}(b1.*s1)$$

$$a2=2*\text{real}(b2.*s2)$$

$$c1=2*\text{real}(b1)$$

$$c2=2*\text{real}(b2)$$

### **% KORELASYON KATSAYILARI**

$$K11=4.*w1.*w1.*(w1.*son1+w1.*son1).*(w1.*son1+w1.*son1)$$

$$K12=(w1.^2-w2.^2).^2+4.*w1.*w2.*(w1.*son1+w2.*son2).*(w1.*son2+w2.*son1)$$

$$K22=4.*w2.*w2.*(w2.*son2+w2.*son2).*(w2.*son2+w2.*son2)$$

$$K21=(w2.^2-w1.^2).^2+4.*w2.*w1.*(w2.*son2+w1.*son1).*(w2.*son1+w1.*son2)$$

$$\text{bet1}=\text{sqrt}(1-\text{son1}.^2)$$

$$\text{bet2}=\text{sqrt}(1-\text{son2}.^2)$$

### **% r0,ij**

$$r011=(8*(w1.*son1+w1.*son1).*\text{sqrt}(\text{son1}.*\text{son1}.*w1.^3.*w1.^3))./K11$$

$$r012=(8*(w1.*son1+w2.*son2).*\text{sqrt}(\text{son1}.*\text{son2}.*w1.^3.*w2.^3))./K12$$

$$r022=(8*(w2.*son2+w2.*son2).*\text{sqrt}(\text{son2}.*\text{son2}.*w2.^3.*w2.^3))./K22$$

$$r021=(8*(w2.*son2+w1.*son1).*\text{sqrt}(\text{son2}.*\text{son1}.*w2.^3.*w1.^3))./K21$$

### **% r2,ij**

$$r211=8*(\text{sqrt}(\text{son1}.*\text{son1}.*w1.*w1)).*(w1.^2.*w1.*son1+w1.^2.*w1.*son1)./K11$$

$$r212=8*(\text{sqrt}(\text{son1}.*\text{son2}.*w1.*w2)).*(w1.^2.*w2.*son1+w2.^2.*w1.*son1)./K12$$

$$r222=8*(\text{sqrt}(\text{son2}.*\text{son2}.*w2.*w2)).*(w2.^2.*w2.*son2+w2.^2.*w2.*son2)./K22$$

$$r221=8*(\text{sqrt}(\text{son2}.*\text{son1}.*w2.*w1)).*(w2.^2.*w1.*son1+w1.^2.*w2.*son2)./K21$$

**% nü1,ij**

$$\text{nu111}=(2*\text{pi}*(-\text{w1}.^2+\text{w1}.^2)*\text{son1}.*\text{son2}.*\text{w1}.^2.*\text{w2}.^2.*\text{bet1}.*\text{bet2})./(\text{K11}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})))$$

$$\text{nu112}=(2*\text{pi}*(-\text{w1}.^2+\text{w2}.^2)*\text{son1}.*\text{son2}.*\text{w1}.^2.*\text{w2}.^2.*\text{bet1}.*\text{bet2})./(\text{K12}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})))$$

$$\text{nu122}=(2*\text{pi}*(-\text{w2}.^2+\text{w2}.^2)*\text{son2}.*\text{son2}.*\text{w2}.^2.*\text{w2}.^2.*\text{bet2}.*\text{bet2})./(\text{K22}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})))$$

$$\text{nu121}=(2*\text{pi}*(-\text{w2}.^2+\text{w1}.^2)*\text{son2}.*\text{son1}.*\text{w2}.^2.*\text{w1}.^2.*\text{bet2}.*\text{bet1})./(\text{K21}.*\text{sqrt}(\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})))$$

**% w1,ij**

$$\text{w111}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w1}.*\text{w1})./(\text{bet1}.*\text{bet1})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1}))$$

$$\text{w112}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w1}.*\text{w2})./(\text{bet1}.*\text{bet2})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2}))$$

$$\text{w122}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w2}.*\text{w2})./(\text{bet2}.*\text{bet2})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2}))$$

$$\text{w121}=(2/\text{pi})*\text{sqrt}((\text{w2}.*\text{w1})./(\text{bet2}.*\text{bet1})*\text{atan}(\text{bet2}./\text{son2})*\text{atan}(\text{bet1}./\text{son1}))$$

**% w2,ij**

$$\text{w211}=\text{w1}.^2$$

$$\text{w212}=\text{w1}.*\text{w2}$$

$$\text{w221}=\text{w1}.*\text{w2}$$

$$\text{w222}=\text{w1}.^2$$

**% Fm,ij**

$$\text{F011}=\text{a1}.*\text{a1}.*\text{r011}-(\text{a1}.*\text{c1}-\text{a1}.*\text{c1})*\text{nu111}.*\text{w111}+\text{c1}.*\text{c1}.*\text{r211}.*\text{w211}$$

$$\text{F012}=\text{a1}.*\text{a2}.*\text{r012}-(\text{a1}.*\text{c2}-\text{a2}.*\text{c1})*\text{nu112}.*\text{w112}+\text{c1}.*\text{c2}.*\text{r212}.*\text{w212}$$



```
F021=a2.*a1.*r021-(a2.*c1-a1.*c2).*nu121.*w121+c2.*c1.*r221.*w221  
F022=a2.*a2.*r022-(a2.*c2-a2.*c2).*nu122.*w122+c2.*c2.*r222.*w222
```

```
% Lambda 0
```

```
q=F011+F012+F021+F022
```

```
x=we*2*pi
```

```
plot(x,p)
```

```
grid on
```

### EK-3 SEMBOLLER LİSTESİ

- $\tau$  :Depremin süresi  
 [C] :Sönüm matrisi  
 $\{\phi_i\}$  :İkincil sistem mod vektörü  
 $\{Y(t)\}$ :Genlik vektörü  
 $\{\Phi\}$  :Taşıyıcı sistem mod vektörü  
 $a_i$  :Genelleştirilmiş modal katılım çarpanı  
 $C_p$  :Bileşen büyütme faktörü  
 $C_{ri}$  :Taşıyıcı sistem modal sönümü  
 $F_s$  :İkincil sisteme etkiyen eşdeğer deprem yükü  
 $h_i$  :i. katın temel üstünden yüksekliği  
 $h_{ort}$  :İkincil sistemin taşıyıcı sisteme mesnetlendiği kat yüksekliklerinin ortalaması  
 $\psi_{ij}$  :Modal katılım çarpanı  
 $K_{ri}$  :Taşıyıcı sistem modal rijitliği  
 $m_e$  :İkincil sistem kütlesi  
 $M_i$  :Taşıyıcı sistem modal kütlesi  
 $p,q$  :Pik faktörleri  
 $R_m(t)$  :İkincil sistemin taşıyıcı sisteme bağlı olduğu serbestlik derecelerindeki reaksiyon kuvveti  
 $S_a$  :Taşıyıcı sistemin temel moduna karşılık gelen spektral ivme  
 $s_i$  :Birleşik sistemin Kompleks açısal frekans değeri  
 $S_i$  :Zemin tepki spektrumu değeri  
 $V_p$  :İkincil sistemin taşıyıcı sisteme mesnetlendiği noktada oluşan reaksiyon kuvveti  
 $W_i$  :Taşıyıcı sistemin i. Katının ağırlığı  
 $w_s$  :Ekipman ağırlığı  
 $x_p$  :Taşıyıcı sistem bağıl deplasmanı  
 $x_s$  :İkincil sistem bağıl deplasmanı  
 $Y_i(r)$  :Taşıyıcı sistem bileşen mod faktörü  
 $Y_j(r)$  :İkincil sistem bileşen mod faktörü  
 $\beta_i$  :Frekans örtüşmesi parametresi

- $\gamma_i$  :Dinamik etkileşim parametresi  
 $\delta$  :Şekil faktörü  
 $\delta_i$  :Klasik olmayan sönüm parametresi  
 $\zeta_i^*$  :Birleşik sistem modal sönüm oranı  
 $\zeta_{pi}$  :Taşıyıcı sistem modal sönüm oranı  
 $\eta$  :Frekans oranı  
 $\lambda_{m,ij}$  :Birleşik sistem tepkilerinin karşılıklı spektral momentler  
 $\mu$  :Kütle oranı  
 $\rho_{m,ij}$  :Modal korelasyon katsayısı  
 $\omega_{ai}$  :Ortalama açısal frekans  
 $\omega_i^*$  :Birleşik sistem açısal frekansı  
 $\omega_{pi}$  :Taşıyıcı sistem açısal frekansı  
 $\omega_r$  :Birleşik sistem r. modu için açısal frekansı  
 $\omega_{sj}$  :İkincil sistem açısal frekansı  
 $\Phi_{jk}$  :İkincil sistemin taşıyıcı sisteme mesnetlendiği serbestlik derecesindeki mod şekli