

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



BETONARME YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SİSTEM  
TANIMLAMA KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

**Mohammad ALALOU**

Danışman

**Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA**

**SAMSUN**  
**2021**

## TEZ KABUL VE ONAYI

MOHAMMAD ALALOU tarafından, **Doktor Öğretim Üyesi Sertaç TUHTA** danışmanlığında hazırlanan “BETONARME YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SİSTEM TANIMLAMA KULLANILARAK BELİRLENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 22.01.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
<b>Başkan</b>	Doç. Dr. İsa ÇÖMEZ Karadeniz Teknik Üniversitesi Mekanik Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b> (Danışman)	Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mekanik Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Doç. Dr. Varol KOÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yapı Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY  
... / ... / ...  
Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans Tezimin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, yazımda enstitü yazım kılavuzuna uygun davranıldığımı taahhüt ederim.



22 / 12 / 2020

Mohammad ALALOU

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** BETONARME YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SİSTEM TANIMLAMA KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 22 / 12 / 2020 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : 4 % Bir öge seçin.

Tek kaynak oranı : 1 % Bir öge seçin. çıkmıştır.



22 / 12 / 2020

Doktor Öğretim Üyesi Sertac TUHTA

## ÖZET

### BETONARME YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SİSTEM TANIMLAMA KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Mohammad ALALOU

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans, Ocak/2021

Danışman: Doktor Öğretim Üyesi Sertaç TUHTA

Son yıllarda deprem ve deprem etkilerinin araştırma faaliyetleri inşaat mühendisliği alanında önemli bir yer almaktadır. Yapılar deprem etkisinden ciddi şekilde hasarlar görmekte sonucunda ise can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Bu nedenle can ve mal kaybı önlemek için yeni yöntemlerin üzerinde çalışılmaktadır. Deprem öncesi ve sonrası önlemler dikkatle almak gerekmektedir. Yapılar inşa edilirken yapım aşamasında deprem etkisi dikkate alınmalıdır ancak mevcut olan veya hasar gören binalar için yıkım veya güçlendirme seçenekleri dışında herhangi bir önlem bulunmamaktadır. Bu gibi durumlarda yapıların deprem performansının belirlenmesi için birçok yöntem ortaya çıkmıştır. Sistem tanımlama yöntemi ortaya çıkan yöntemlerden birisidir.

Bu çalışmada yöntem olarak sistem tanımlama yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sırasıyla; mevcut olan alıcılardan (Sensör) modal yanıtlar toplandıktan sonra, sistemdeki ayrıştırılmış modların her biri için mod şekil vektörü, elde edilen tüm modal yanıt verilerinden tanımlanmıştır. Betonarme binanın sistem tanımlaması yapılmıştır. A, B, C, D, K matrisleri çıkarılmıştır. Bulunan sayısal algoritmalar ile sistemin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Sistemin matematiksel modeli ile sistemin deprem performansı belirlenmiştir. Sonuç olarak, betonarme binanın sonlu eleman modelinden analitik olarak 1.164258 ile 14.113393 Hz arasında değişen frekans ve 0.070855 ile 0.858916 arasında değişen periyot toplam 15 veri elde edilmiştir. Sistem tanımlama yöntemi ile de 15 adet frekans ve periyot verisi belirlenmiştir. Ortam titreşim testleri, zemin seviyesinde ortam titreşim verileri altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda %99,94 başarı oranında matematiksel model oluşturulmuştur. Sistemin sayısal algoritmaları, modal girdi ve modal çıktı kullanılarak başarıyla elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma da SAP2000 yapı paket programından Matlab paket programından yararlanılarak hesapların güvenilir ve pratik olması sağlanmıştır. Yapılan bu çalışma, sistem tanımlama yönteminin betonarme yapıların modal verilerini belirlemede etkili, pratik ve kullanılabilir olduğunun bir örneğini ortaya koymuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), Betonarme Yapılar, Sistem Tanımlama, Dinamik Sistemler, Kalman filtreleri, Altuzay Durum Uzay Sistem Tanımlaması için Sayısal Algoritmalar (N4SID).

## ABSTRACT

### DETERMINING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF REINFORCED STRUCTURES BY USING SYSTEM IDENTIFICATION

Mohammad ALALOU  
Ondokuz Mayıs University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering  
Master, January/2021  
Supervisor: Assist. Prof. Dr.Sertaç TUHTA

Research activities of earthquake and earthquake effects have taken an important place in civil engineering area in recent years. Structures are seriously damaged by the effects of earthquakes, resulting in loss of life and property. For this reason, new methods are being studied to prevent loss of life and property. Before and after the earthquake, precautions should be taken carefully. While constructing the buildings, earthquake effects should be taken into consideration during construction, but there are no measures other than demolition or reinforcement options for existing or damaged buildings. In such cases, many methods have emerged to determine the earthquake performance of structures. System identification method is one of the emerging methods.

In this study, system identification method is used as a method. Studies conducted are respectively; After collecting the modal responses from the available receivers (Sensor), the mode shape vector for each of the differentiated modes in the system was identified from all the modal response data obtained. The system identification of the reinforced concrete building has been made. Matrices A, B, C, D, K were obtained. The mathematical model of the system was created with the numerical algorithms found. The earthquake performance of the system was determined with the mathematical model of the system. As a result, 15 data were obtained analytically from the finite element model of the reinforced concrete building with a frequency varying between 1.164258 and 14.113393 Hz and a period varying between 0.070855 and 0.858916. With the system identification method, 15 frequency and period data were determined. Ambient vibration tests were conducted under ground level ambient vibration data. As a result of these studies, a mathematical model was created with a success rate of 99.94%. The numerical algorithms of the system have been successfully obtained by using modal input and modal output. In this study, using the SAP2000 structure package program and Matlab package program, it was ensured that the calculations were reliable and practical. This study has provided an example that the system identification method is effective, practical and usable in determining the modal data of reinforced concrete structures.

**Keywords:** Finite Element Method(FEM), Reinforced Concrete, System Identification, Dynamical System, Kalman Filters , Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification (N4SID)

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu derece önemli ve yapılması gerekli bir çalışmayı bana öneren çalışmalarımı adım adım kontrol ederek yardımcı olan, araştırma, disiplin ve sonuca ulaşabilme yöntemlerini öğreten Danışman Hocam Sayın **Doktor Öğretim Üyesi Sertaç TUHTA**' ya ve Araştırma Görevlisi **Furkan Günday**'a minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Öğrenim hayatım süresince desteklerini esirgemeyen başta Annem **Lma** Babam **Khaled** ve Kardeşlerim **Yaser, Ammar, Hia** ve **Alaa** olmak üzere tüm aile fertlerine teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasının **Türkiye**'ye faydalı olmasını temenni ederim.

Mohammad ALALOU

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>TABLolar DIZINI</b> .....	xv
<b>1.GİRİŞ</b> .....	1
<b>2.GENEL BİLGİLER</b> .....	6
2.1. Dinamik Sistem.....	6
2.2. Deprem.....	7
2.3.Sistem Tanımlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	8
2.4. Titreşim Esaslı Sağlık İzleme.....	21
2.5. Tepki Ölçümleri.....	24
2.6. Bir Frekans Alan Adaptif Denetleyicisi.....	25
2.7. Yapay Sinir Ağı.....	26
2.8. Sinir Ağı, Yenilik Algılama ve Genetik Algoritmalara Dayalı Yöntemler.....	29
2.9. Yalnızca Çıktı Titreşim Verilerinden Modal Tanımlama.....	31
<b>3.GEREÇ VE YÖNTEM</b> .....	33
3.1. Sistem Tanımlama.....	33
3.2. Sistem Tanımlama Çalışma Akışı.....	35
3.3. Girdi-Çıktı ve Yalnızca Çıktı.....	37
3.4. Optimal Deney Tasarımı.....	37
3.5. Beyaz Kutu Modeli.....	37
3.6. Gri Kutu Modeli.....	37
3.7. Kara Kutu Modeli.....	38
3.8. Kontrol İçin Tanımlama.....	39
3.9. İleri Model.....	40
3.10. Verilerden Model Oluşturma.....	41
a) Model yapısı.....	41
b) Model parametrelerini tahmin edilmesi.....	42
c) Parametre tahmin algoritmasını yapılandırın.....	42
3.11. Doğrusal Model Tanımlama.....	43
3.12. Doğrusal Olmayan Model Tanımlama.....	43

3.13. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modeller.....	44
A) Frekans tepki modeli.....	44
B) Zaman-alan korelasyon analizi.....	45
C) İşlem modeli.....	46
D) Polinom modelleri.....	47
E) Eigensystem gerçekleştirme algoritması (ERA).....	47
F) Genel gerçekleştirme algoritması (GRA).....	52
3.14. Tanımlanmış Durum Uzay Modelinden Modsal Parametrelerin Çıkarılması.....	57
3.15. Çoklu Kurulum Ölçümlerinden Modüler Alt Uzay Tabanlı Sistem Tanımlama.....	59
3.16. Hızlı Çok Sıralı Alt Uzay Tabanlı Sistem Tanımlama.....	60
3.17. Değişen Uyarma Altında Sağlam Alt Uzay Tabanlı Hata Tespiti.....	60
3.18. Kitle Normalleştirilmiş Mod Şekillerini Kullanarak Sağlam Alt Uzay Tabanlı Hasar Lokalizasyonu.....	61
3.19. Modal Analiz.....	61
3.20. Model Güncellemesi.....	62
3.21. Mod Şekilleri.....	62
3.22. Modal Özelliklerin Çıkarılması.....	63
3.23. Sönüm Oranları.....	64
3.24. Sönümleme Tahmin Hatası.....	65
3.25. Yüksek Seviyede Sönümleme.....	66
3.26. Sonlu Elemanlar Modeli (SEM).....	66
3.26.1. Sonlu Eleman Metodu ile Yapıların Modellemesi.....	68
3.27. Çok Dinamik Serbestlik Dereceli Yapıların Hareket Denklemlerinin Düzenlenmesi....	73
3.28. Deneysel Model (DM).....	75
3.29. Sonlu Eleman Modeli ile Deneysel Modelin Karşılaştırılması.....	76
3.30. Sistem Tanımlamanın Genel İlkeleri.....	76
3.31. Gelişmiş Frekans Alanı Ayrıştırması.....	77
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>80</b>
4.1. Betonarme Binanın Deneysel İnceleme Sistemi ile İncelenmesi.....	80
4.1.1. Binanın Özellikleri.....	80
4.2. Sonlu Elemanların Mod Şekilleri.....	85
4.3. Çevresel Titreşimler.....	94
4.4. Sistem Tanımlama.....	97
4.4.1. Ayrık Zaman Tanımlı Durum-Uzay Modeli.....	97

4.4.2. Periyotların Karşılaştırılması.....	106
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>107</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>109</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>118</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$\mu$	: Poisson oranı
$f_{ck}$	: Çelik çekme dayanımı
$f_{yk}$	: Çelik akma dayanımı
$E_b$	: Beton elastisite modülü
P	: Donatı oranı (pursantaj)
$E_ç$	: Çelik elastisite modülü
$E_{eş}$	: Dönüştürülmüş-eşdeğer elastisite modülü
N	: Kayıt toplam nokta sayısı
$\Delta t$	: Kayıt örnekleme aralığı
$\Delta f$	: Frekans çözünürlüğü
$f_N$	: Nyquist frekansı
$\overline{A}_f$	: Düzleştirilmiş Fourier genliği
$A_f$	: Orijinal Fourier genliği
$W$	: Simetrik düzeltme penceresi
$f_0$	: Modal frekans
$f_1$	: Genliğin 0.707 oranında azaldığı genliğe karşı gelen alt frekans
$f_2$	: Genliğin 0.707 oranında azaldığı genliğe karşı gelen üst frekans
$x(t)$	: Yatay ivmeölçer kaydı
$\theta(t)$	: Hesaplanan burulma titreşimi kaydı
$c$	: Dönme merkezinin yatay ivmeölçerden uzaklığı
$\{u\}$	: Düğüm yerdeğiştirmesi
$[k]$	: Rijitlik matrisi
$\overline{k}_k$	: $k$ sonlu elemanın lokal rijitlik matrisi
$\overline{\overline{k}}_k$	: $k$ sonlu elemanın global rijitlik matrisi
$\overline{\overline{k}}_{+k}$	: $k$ sonlu elemanın ayrıık rijitlik matrisi
$[C_k]$	: $k$ sonlu elemanın lokal koordinat sisteminden (l.k.s.) global koordinat sistemine (g.k.s) dönüşüm matrisi
$[\tau_k]$	: $k$ sonlu elemanın topoloji matrisi
$\overline{F}_k$	: $k$ sonlu elemanın lokal düğüm kuvvetleri vektörü

$\overline{\overline{\mathbf{F}_k}}$	: $k$ sonlu elemanın global düğüm kuvvetleri vektörü
$\overline{\overline{\mathbf{F}_{+k}}}$	: $k$ sonlu elemanın ayrıık düğüm kuvvetleri vektörü
$\overline{\mathbf{R}_{+k}}$	: $k$ sonlu elemanın lokal koordinat sisteminde ( $A$ ) alanına etkileyen sürekli dağılmış $q(A)$ yükünden eşdeğer düğüm yükleri vektörü
$[\mathbf{H}_k]$	: $k$ sonlu elemanın şekil fonksiyonu
$[c]$	: Sönüm matrisi
$[k]$	: Rijitlik matrisi
$[m]$	: Kütle matrisi
$[\overline{\mathbf{m}}_k]$	: $k$ sonlu elemanın l.k.s.' de kütle matrisi
$[\mathbf{m}_{\bullet k}]$	: Her bir $i$ . serbestlik derecesi doğrultusunda verilmiş $\mathbf{m}_{\bullet ki}$ tekil kütlelerden oluşturulmuş eleman köşegen kütle matrisi
$[\mathbf{m}_{*k}]$	: Elemanın kendisinin sürekli dağılmış kütlelerinden oluşturulmuş eleman eşdeğer kütle matrisi
$\rho_k$	: Sonlu elemanın yoğunluğu
$V_k$	: Sonlu elemanın hacmi
$\omega_{oi}$	: Sönümsüz sistemin doğal titreşim modunun serbest titreşim frekansı
$\{\mathbf{a}_i\}$	: Sönümsüz sistemin doğal titreşim modunun mod şekli
$\{\mathbf{F}_e\}$	: Sisteme etkileyen elastik kuvvet
$k_{ij}$	: $j$ k.s.d.' si doğrultusunda birim yerdeğiştirmeden oluşmuş kuvvet
$\{\mathbf{F}_c\}$	: Sisteme etkileyen sönüm kuvveti
$c_{ij}$	: $j$ k.s.d.' si doğrultusunda birim hızdan oluşmuş kuvvet
$\{\mathbf{F}_I\}$	: Sisteme etkileyen atalet kuvveti
$m_{ij}$	: Kütle tesir katsayısı
$\mathbf{e}_0$	: Tesir vektörü
$(\ddot{\Delta})$	: Dış dinamik kuvvetler sistem mesnedinin kinematik uyarılmasından oluşmuş yer ivmesi
$\{\mathbf{e}_*\}$	: Tesir vektörü
$(\varphi(t))$	: Yer hareketinin burulma bileşeni
$\{\mathbf{e}_{**}\}$	: Tesir vektörü
$A$	: Durum matrisi
$B$	: Giriş etki matrisi
$C$	: Çıkış etki matrisi

$D$	: Doğrudan iletme matrisi
$\underline{x}(t)$	: Durum vektörü
$\underline{u}(t)$	: Sistem girdi vektörü
$\underline{y}(t)$	: Sistem çıktı (ya da gözlem) vektörü
$\hat{\underline{x}}_k$	: Gözlemsel durum vektörü
$(\underline{X}_k)$	: Gözlenemeyen rasgele vektörler dizisi
$(\underline{Y}_k)$	: Gözlenebilen rasgele vektörler dizisi
$(\underline{W}_k)$	: Gözlenemeyen rasgele hata vektörleri dizisi
$K(k)$	: Kalman kazanç matrisi
$P_0$	: Başlangıç kovaryans matrisi
$[\bar{A}]$	: Sistem matrisi
$[\bar{B}]$	: Sistem matrisi
$[\bar{C}]$	: Sistem matrisi
$\{\underline{u}_k\}$	: Ayrık zaman durgunlaşmış yerdeğişme vektörü
$[A]$	: Ayrık-zamanda sistem matrisi
$[B]$	: Ayrık-zamanda giriş matrisi
$[I]$	: Birim matris
$\{\underline{w}_k\}$	: Arıza ve modelleme eksikliklerinden dolayı ortaya çıkabilecek sistem oluşum gürültüsü
$\{\underline{v}_k\}$	: Aygıt hatalarından dolayı ölçme gürültüsü
$\{\underline{y}_k\}$	: Çıkış vektörü
$N_{ayg}$	: Aygıt sayısı
$N_{örnek}$	: Örnek (örnekleme) nokta sayısıdır
$r$	: Giriş sayısı
$[I_r]$	: $r$ . derece eşdeğerlik matrisi
$[0_r]$	: $r$ . derece sıfır matrisidir
$C_{Ri}$	: Tepki değerlerinde beklenen rölatif hata
$(C_c Ort.)$	: Rezonans frekansları arasındaki ağırlıklı rölatif fark
$(C_c Mut.)$	: Rezonans frekansları arasındaki ağırlıklı mutlak rölatif fark
$(MGK Ort.)$	: Ortalama MGK değerleri
$(C_c Yer.)$	: Modal yerdeğişirmeler arasındaki ağırlıklı mutlak fark
$N_m$	: Seçilmiş toplam mod sayısı

$N_N$	: Seçilmiş toplam düğüm sayısı
$N_D$	: Seçilmiş toplam serbestlik derecesi sayısı
$(C_c K_{üt.})$	: Tam ve hesaplanmış kütle arasındaki ağırlıklı mutlak fark
$C_R$	: Tepkiler için ağırlık matrisi
$f$	: Rezonans frekansı
$M_a$	: Sayısal kütle matrisi
$\Phi_m$	: Ölçüm özvektör matrisi
$\delta_{ij}$	: Kronecker deltası
$\gamma_{ih}$	: Lagrange çarpanı
$\Delta$	: Ölçüm doğal frekans matrisi
$\gamma_{\Delta ij}$	: Lagrange çarpanı matrisi elemanı
$\gamma_{kij}$	: Lagrange çarpanı matrisi elemanı
$\overline{M}_a$	: Sonlu eleman serbestlik derecesine göre artırılmış ölçüm modları ve analitik kütle matrisinden elde edilmiş genelleştirilmiş kütle matrisidir.
$\Psi$	: Özvektör
$\{p\}$	: Modal koordinat
$\lambda$	: Kompleks özdeğer
$A_c$	: Çelik alanı
$A_b$	: Beton alanı
$\omega$	: Açısal frekans
$\zeta$	: Sönüm oranı
$T$	: Periyot
$K_P$	: Statik kazanç
$T_\omega$	: Zaman sabiti
$T_d$	: Girişten çıkışa gecikme
YSA	: Yapay Sınır Ağı
QNY	: Quasi-Newton yöntemleri
YSİ	: Yapısal Sağlık İzlemesi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Klasik tanımlama ve alt uzay tanımlama ile sistem tanımlama.....	3
Şekil 2.1. Türkiye'nin deprem haritası.....	8
Şekil 2.2. Yalnızca çıkışa dayalı modal tanımlama metotları.....	20
Şekil 2.3. Betonarme bina yapısının sonlu elemanlar modeli.....	23
Şekil 2.4. Uyarlanabilir denetleyicinin blok şeması.....	26
Şekil 2.5. Tipik sinir ağı.....	27
Şekil 3.1. Deneysel tasarım, doğrulama ve sistem tanımlama arasındaki ilişkiler.....	34
Şekil 3.2. Yaygın kullanıma sahip sonlu eleman tipleri.....	68
Şekil 3.3. Çok dinamik serbestlik dereceli.....	75
Şekil 3.4. Sistem tanımlama şeması.....	77
Şekil 4.1. Yapı'nın dış görünüşü.....	81
Şekil 4.2. Yapı'nın iç görünüşü.....	82
Şekil 4.3. Yapı'nın üstten görünüşü.....	83
Şekil 4.4. Yapı'nın önden görünüşü.....	83
Şekil 4.5. Yapı'nın yandan görünüşü.....	84
Şekil 4.6. Yapı'nın üç boyutlu görünüşü.....	84
Şekil 4.7. Sem 1. Mod şekli.....	85
Şekil 4.8. SEM 2. Mod şekli.....	85
Şekil 4.9. SEM 3. Mod şekli.....	86
Şekil 4.10. SEM 4. Mod şekli.....	86
Şekil 4.11. SEM 5. Mod şekli.....	87
Şekil 4.12. SEM 6. Mod şekli.....	87
Şekil 4.13. SEM 7. Mod şekli.....	88
Şekil 4.14. SEM 8. Mod şekli.....	88
Şekil 4.15. SEM 9. Mod şekli.....	89
Şekil 4.16. SEM 10. Mod şekli.....	89
Şekil 4.17. SEM 11. Mod şekli.....	90

Şekil 4.18. SEM 12. Mod şekli.....	90
Şekil 4.19. SEM 13. Mod şekli.....	91
Şekil 4.20. SEM 14. Mod şekli.....	91
Şekil 4.21. SEM 15. Mod şekli.....	92
Şekil 4.22. Mikrotremor ölçüm aleti (İvmeölçer).....	95
Şekil 4.23. İvmeölçerlerin üç boyutlu görünümde binanın konumu.....	96
Şekil 4.24. İvme girdi sinyalı $u_1$ .....	98
Şekil 4.25. İvme girdi sinyalı $u_2$ .....	98
Şekil 4.26. İvme girdi sinyalı $u_3$ .....	99
Şekil 4.27. İvme girdi sinyalı $u_4$ .....	99
Şekil 4.28. İvme çıktı sinyalı $y_1$ .....	100
Şekil 4.29. İvme çıktı sinyalı $y_2$ .....	100
Şekil 4.30. İvme çıktı sinyalı $y_3$ .....	101
Şekil 4.31. İvme çıktı sinyalı $y_4$ .....	101
Şekil 4.32. Modelin çıktıları.....	102
Şekil 4.33. Model kalıntı analizi.....	102
Şekil 4.34. Frekans tepkisi.....	103
Şekil 4.35. Kutuplar ve sıfırlar.....	103
Şekil 4.36. Gürültü spektrumu.....	104
Şekil 4.37. Girdi ve çıktı frekansların diyagramı.....	104
Şekil 4.38. Genlik ve faz diyagramı.....	105

## **TABLolar DİZİNİ**

Tablo 4.1. Kolon ve Kiriş Ebatları.....	80
Tablo 4.2. Sonlu Eleman Modelinin Doğal Titreşim Periyotları ve Frekansları.....	93
Tablo 4.3. Sonlu Eleman Periyotları ve Sistem Tanımlama Periyotları.....	106

## 1.GİRİŞ:

Deprem tehlikesine maruz kalan bölgelerde bulunan yapıların çoğu, deprem yüklerin neden olduğu çeşitli yıkımları önlemek için yapının tasarımı ona göre yapılmaktadır. Meydana gelen bu deprem altında binaların elemanları (özellikle kolonlar) hasar görmektedir. Diğer taraftan bakıldığında, özellikle bu tür binaların deprem altındaki performansları dikkate alındığında, yapı kütlelerini değiştirmeden bile kolonların güçlendirilmesine büyük ihtiyaç vardır; bu, teknik onarım veya güçlendirme prosedürleri ile kolon kapasitesi arasındaki bağlantının araştırılmasına ihtiyaç olduğunu açıkça göstermektedir. Bu anlayışta, farklı bakış açıları ve yönere bakılarak, sismik yük altında yapıların gerekli performansının elde edilmesi için daha fazla araştırma yapılmaktadır.

Son yıllarda yapı mühendisliğinin araştırma yaparak yeni yöntemler bularak yapıların depremlerden sonra ne kadar etkilediğini yapıya herhangi bir zarar vermeden tespit edebilmektedir; Önce hangi hasar tespit edilebilir? Binanın kullanılabilir ömrü ne kadardır? Bu tarz sorulara cevap verecek yöntemler geliştirmeye devam edilmektedir. Yapının doğal ve yapay etkilere karşı sağlığı ve ekonomik ömrü gibi faktörler nedeniyle bu konuya önem verilmektedir. Tüm inşaat sistemlerinde hasar malzemeye bağlıdır. Sistemdeki hasar arttıkça bozulma olarak tanımlanan bir değere ulaşmaktadır. İnşaat mühendisliği yapıları, ömürleri boyunca çeşitli doğal ve yapay etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler, yapının dinamik özelliklerini ve dolayısıyla hizmet ömrünü etkileyebilecek kuvvetlerdir. Sistem tanımlama (SI), bir takım girdi çıktıya dayalı bilinmeyen bir sistem için bir modelleme sürecidir ve çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmaktadır.

Alt uzay sistemi tanımlama, yapılar için güçlü bir kara kutu sistemi tanımlama aracı olarak tanıtılmaktadır. Yönlendirilmiş yapıları desteklemek için yöntemin uygulanması özellikle vurgulanmaktadır. Alt uzay sistemlerinin tanımlanmasından türetilen kara kutu durum uzayı modelleri, yapıların mod özelliklerini (yani modal sönümleme, modal frekans ve mod şekilleri) tahmin etmek için kullanılmaktadır. Sistemin modsal parametrelerini belirlemek için sistem tanımlama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu dinamik parametreler yapısal mühendislik, köprüler, binalar vb. diğer yapıların dinamik davranışını anlamaya yardımcı olmaktadır.

Modal sistem tanımlama, deprem, fırtına ve patlama gibi ani ve dinamik yükler altında yapısal yapının güvenilirliğini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Doğru model sınıfını seçmek, sistem tanımlamada önemli bir adımdır. Modelin derecesi çok yüksekse, gerçek dışı modlar sonuç üretebilmektedir. Model derecesi çok küçük seçildiğinde mod parametreleri elde edilmeyebilmektedir. Belirleme aşamasında verilerin özelliklerinin incelenmesinden elde edilecek bilgiler esas alınarak genel modellerden uygun olanlar seçilmektedir. Yani sistemden alınan girdi ve çıktılar incelenir ve incelenen sisteme uygun olan model araştırılmaktadır. Uygun modele geçici olarak karar verildiğinde, bu seçilen modelin sırasının belirlenme sırasına ulaşılmaktadır.

Bu sistemlerin girdi ve çıktı büyüklüklerine bağlı olarak, davranışsal bir model elde etmek için, yapıları etkileyen büyüklüklerin belirlenmesi ve ölçülmesi gerekmektedir. Sistemin (giriş büyüklüğü veya giriş sinyali) bu büyüklüklere verdiği yanıtta (çıkış büyüklüğü veya çıkış sinyali) yararlanılmaktadır. Fiziksel yasalar diferansiyel veya cebirsel denklemlerle tanımlanmaktadır. Modelde sadece girdi ve çıktı büyüklükleri arasındaki ilişki değil, aynı zamanda model yapısı belirlenerek ifade edilmektedir, diğer yandan sistem veya sistem hakkında herhangi bir ön bilginin olmaması çok karmaşıktır. Sahip olunması durumunda, sistemin modelinin belirlenmesinde tanımlama yöntemleri (parametrik tanımlama gibi) kullanılmaktadır.

Bu durumda model, girdi ve çıktı boyutları kullanılarak elde edilmektedir. Bu teknik, sistem sınıfı, girdi ve çıktı büyüklüklerinin seçimi ile ilgili bazı ön varsayımlar yapılarak uygulanabilmektedir.

Mühendislik yapılarında, üç tür tanımlama kullanılır: parametrelerin modsal tanımlanması; parametrelerin yapısal tanımlanması; kontrol modeli tanımlama yöntemleri. Frekans alanında tanımlama, spektral yoğunluk matrisinin benzersiz değer ayrışımına dayanır ve Frekans Alanı Ayrıştırması (FDD) ve bunun daha da geliştirilmesi Geliştirilmiş Frekans Alanı Ayrıştırması (EFDD) olarak adlandırılmaktadır.

Zaman alanında Stokastik Alt Uzay Tanımlama (SSI) tekniğinin üç farklı uygulaması vardır: Ağırlıksız Temel Bileşen (UPC); Ana bileşen (PC); Kanonik Çeşitlilik Analizi (CVA) kullanılmaktadır. Klasik Tanımlama ve Altuzay Tanımlama ile Sistem Tanımlaması şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Klasik tanımlama ve alt uzay tanımlama ile sistem tanımlama

İndirgenmiş bir model gerekli olduğunda, önce bazı klasik yaklaşımlarda (sağda) yüksek dereceli bir model belirlenir ve daha sonra düşük dereceli bir model elde etmek için bir model indirgeme tekniği uygulanmaktadır. Sol taraf, alt uzay tanımlama yaklaşımını göstermektedir: ilk önce "indirgenmiş" bir durum dizisi elde ederiz, ardından düşük sıralı bir model doğrudan tanımlanabilmektedir.

Bu yazıda, sınırlı sayıda eleman içermeyen çok dereceli serbest yapısal sistemler problemi araştırılmıştır. Benzer tip sistemler için bilindiği gibi, sistem matrisleri  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$  yalnızca FEM ile oluşturulabilir ve sonlu boyutlu doğrusal bir dinamik sistem için hareket denklemi, bir dizi  $n^2$  ikinci dereceden diferansiyel denklemler şu şekilde düzenlenir:

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [c]\{\dot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = [d]\{f_{\oplus}(t)\} \quad (1.1)$$

Burada sonlu elemanlar yönteminde uygulama için doğrudan sertlik yöntemi kullanıldı ve uygun şekilde sistem kütlesi, sönümleme ve sertlik matrisleri ( $[m]$ ;  $[c]$ ;  $[k]$ ) doğrudan sertlik yöntemi ile aşağıdaki gibi gösterilir:

$$[\bar{k}_r] \rightarrow [\bar{\bar{k}}_r] = [C_r][\bar{k}_r][C_r]^T \rightarrow [\bar{\bar{k}}_{r+}] = [\tau_r]^T [\bar{\bar{k}}_r] [\tau_r] \rightarrow [k_{.}] = \sum_{r=1}^r [\bar{\bar{k}}_{r+}] \rightarrow a. b. c \rightarrow [k] \quad (1.2)$$

Burada,  $[\bar{k}_r]$  r-inci sonlu eleman için yerel koordinat sistemindeki (c.s.) eleman rijitlik matrisidir,  $[\bar{\bar{k}}_r]$  r-inci sonlu eleman için global koordinat sistemindeki eleman sertlik matrisidir,  $[C_r]$ , koordinat dönüşüm matrisidir. r-inci sonlu eleman için,  $[\tau_r]$  r-inci

sonlu elemanlar için topoloji matrisidir, a.b.c. kısaltması “Sınır koşulların uygulanmasından sonra” anlamına gelir,  $r_*$  incelenen sistemdeki özdeş sonlu elemanların bir sayısıdır.

$[k]$ , incelenen sistemin sertlik matrisidir. SEM'nun temel ilişkileri Lagrange varyasyon ilkesine dayanmaktadır.

Hareket denklemi (1), birinci mertebeden denklemlerin oluşturduğu durum uzayına dönüştürülür - yani sistemin sürekli zaman durum uzay modeli şu şekilde değerlendirilir:

$$\{\dot{z}(t) = [A_c]\{z(t)\} + [B_c]\{f_{\oplus}(t)\}$$

$$[A_c] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[m]^{-1}[k] & -[m]^{-1}[c] \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$[B_c] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[m]^{-1} & [d] \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$\{z(t)\} = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Dinamik sistemin yanıtı, denklemler (2) ile temsil edilen sistem modeli için sensörler (ivmeölçerler, hız, yer değiştirmeler vb.) Kullanılarak çıktı vektöründeki çıktı miktarlarıyla ölçülürse (2), uygun ölçüm-çıkı denklemleri:

$$\{y(t)\} = [C_a]\{\ddot{u}\} + [C_v]\{\dot{u}\} + [C_v]\{\dot{u}\} + [C_d]\{u\} = [C]\{z(t)\} + [D]\{f_{\oplus}(t)\} \quad (1.6)$$

$$[C] = [[C_d] - [C_a][m]^{-1}[k], [C_v] - [C_v] - [C_a][m]^{-1}[c]] \quad (1.7)$$

$$[D] = [C_a][m]^{-1}[d] \quad (1.8)$$

$\{u\}$  yer değiştirme vektörüdür;  $[A_c]$ , matrise göre bir  $n_1(n_1 = 2n_2; n_2$ , Bağımsız koordinatların sayısıdır);  $[d]$ , bilinen girişlerin konumlarını ve türünü karakterize eden  $n_2$ 'ye  $r_1$  girişi etki matrisidir.  $\{f_{\oplus}(t)\}; [C_a]; [C_v]; [C_d]$  sırasıyla alıcıları (İvmeölçerler, takometreler, gerinim ölçerler, vb.) kullanmak için ivme, hız, yer değiştirme için çıktı etki matrisidir;  $[C]$ ,  $\{z\}$  durum vektörü ve yalnızca yer değiştirme için bir  $m_1 \times r_1$  çıktı etki matrisidir;  $[D]$ , bir  $m_1 \times r_1$  doğrudan iletim matrisidir;  $r_1$ , girişlerin sayısıdır;  $m_1$ , çıktıların sayısıdır.

Çıktı - yalnızca modal analiz ortamında, ana varsayım,  $\{F(t)\}=[d]\{f_{\oplus}(t)$  giriş kuvvetinin beyaz gürültüden veya zaman dürtü uyarımından geldiğidir. Bu hipotez altında, ayrık zamanlı stokastik durum {uzay modeli şu şekilde yazılabilir:

$$\{z_{k+1}\} = [A]\{z_k\} + [B]\{f_{\oplus k}\} + \{w_k\} \quad (1.9)$$

$$\{y_k\} = [C]\{z_k\} + [D]\{f_{\oplus k}\} + \{v_k\} \quad (1.10)$$

Burada  $\{z_k\} = \{z(k\Delta t)\}$ , ayrık zaman durum vektörüdür; gerginlerin ve modelleme kusurlarından kaynaklanan işlem titreşimleri;  $\{v_k\}$  {sensors} sensörlerin yanlışlığından kaynaklanan ölçüm gürültüsüdür;  $\{w_k\}$ ,  $\{v_k\}$  vektörler ölçülemez, ancak sıfır ortalamalı beyaz gürültü oldukları varsayılmaktadır.

Bu beyaz gürültü varsayımı ihlal edilirse, başka bir deyişle, giriş beyaz gürültüye ek olarak bazı baskın frekans bileşenleri de içeriyorsa, bu frekans bileşenleri sistemin öz frekanslarından ayrılamaz ve sistem matrisinin öz değerleri olarak görünecektir [ A].

Ortam titreşimi ile çıkılan gerçek yapılarda,  $\{f_{\oplus}(t)\}$ ,  $\{f_{\oplus k}\}$  girişi ölçülmeden kalır ve bu nedenle sırasıyla (2) - (5) denklemlerinden kaybolur. Daha sonra bu gerçeği dikkate almak için, girdi dolaylı olarak ortam titreşiminden ölçülebilir hiçbir girdi içermeyen gürültü terimleri  $\{\underline{w}_k\}$  ,  $\{\underline{v}_k\}$  ile örtük olarak modellenmiştir ve bahsedilen ilişki şu şekilde olmuştur:

$$\{z_{k+1}\} = [A]\{z_k\} + \{\underline{w}_k\} \quad (1.11)$$

$$\{y_k\} = [C]\{z_k\} + \{\underline{v}_k\} \quad (1.12)$$

Genellikle yapıların projelendirme aşamasında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanamadığı görülmektedir. Bu nedenle yapılması gereken, inşa edilmiş veya kullanılmakta olan yapıların mevcut durumlarının dikkate alınarak dinamik davranışlarında etkili olan parametrelerin belirlenmesidir.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Dinamik Sistem:

Matematikte dinamik bir sistem, bir fonksiyonun geometrik bir uzaydaki bir noktanın zamana bağıllığını tanımladığı bir sistemdir. Örnekler arasında bir saat sarkacının sallanmasını, bir borudaki suyun akışını ve bir göldeki her ilkbaharda balık sayısını tanımlayan matematiksel modeller yer almaktadır. Herhangi bir zamanda, dinamik bir sistem, uygun bir durum uzayında (bir geometrik manifold) bir nokta ile temsil edilebilen bir gerçek sayılar demeti (bir vektör) tarafından verilen bir duruma sahiptir. Dinamik sistemin evrim kuralı, gelecekteki durumların mevcut durumdan ne takip ettiğini açıklayan bir işlemdir.

Genellikle işlev deterministiktir, yani belirli bir zaman aralığı için mevcut durumdan yalnızca bir gelecek durum izlenmektedir. Bununla birlikte, bazı sistemler stokastiktir, çünkü rastgele olaylar da durum değişkenlerinin gelişimini etkilemektedir. Fizikte dinamik bir sistem, "durumu zaman içinde değişen ve dolayısıyla zaman türevlerini içeren diferansiyel denklemlere uyan bir parçacık veya parçacıklar topluluğu" olarak tanımlanmaktadır. Sistemin gelecekteki davranışı hakkında bir tahmin yapmak için, bu tür denklemlerin analitik bir çözümü veya zaman içinde bilgisayar simülasyonu ile entegrasyonları gerçekleştirilir. Dinamik sistemlerin incelenmesi, matematik, fizik, biyoloji, kimya, mühendislik, ekonomi, tarih ve tıp gibi çok çeşitli alanlarda uygulamaları olan dinamik sistemler teorisinin odak noktasıdır. Dinamik sistemler, kaos teorisinin, lojistik harita dinamiklerinin, çatallanma teorisinin, kendi kendine montaj ve kendi kendine organizasyon süreçlerinin ve kaos kavramının kenarı kavramının temel bir parçasıdır.

Dinamik bir sistemde, çıkış sinyallerinin değerleri hem giriş sinyallerinin anlık değerlerine hem de sistemin geçmiş davranışına bağlıdır. Örneğin, bir araba koltuğu dinamik bir sistemdir - koltuk şekli (oturma konumu) hem yolcunun mevcut ağırlığına (anlık değer) hem de yolcunun otomobilde ne kadar süredir sürdüğüne (geçmişteki davranış) bağlıdır. Model, sistemin girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki matematiksel bir ilişkidir. Dinamik sistem modelleri tipik olarak diferansiyel veya fark denklemleri,

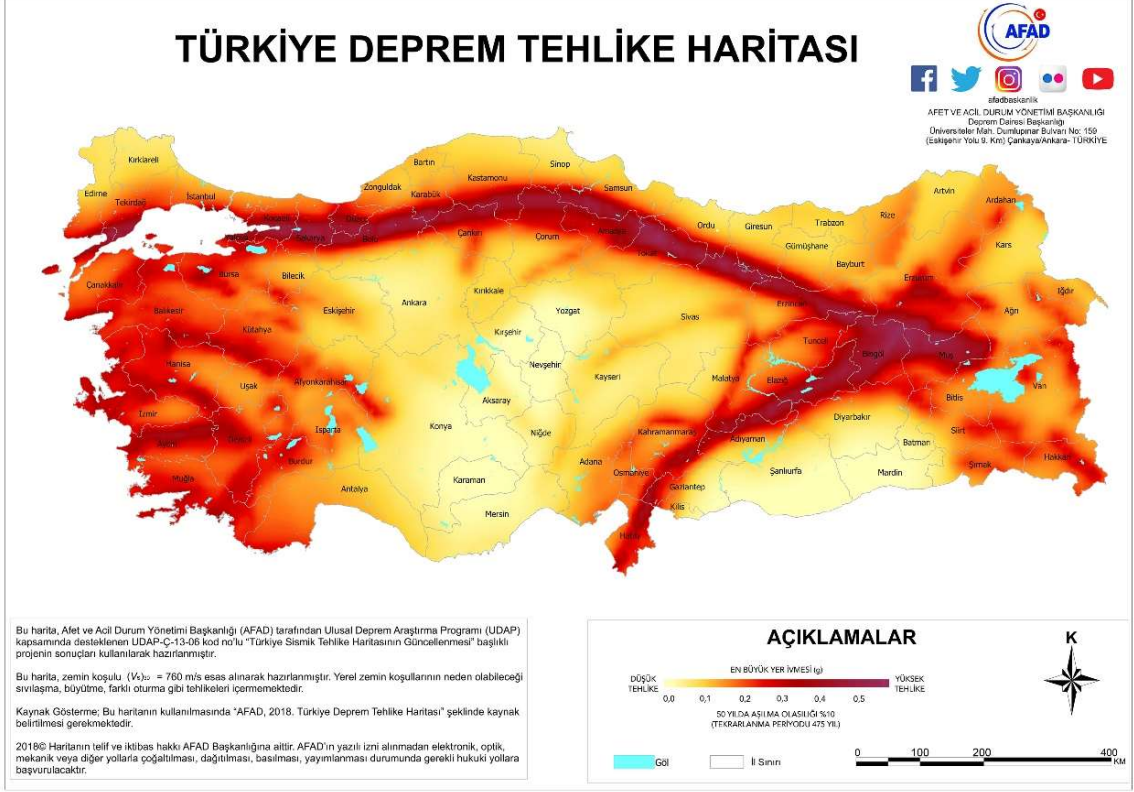
transfer fonksiyonları, durum uzayı denklemleri ve sıfır kutuplu kazanç modelleri ile tanımlanır.

## **2.2. Deprem:**

Dünya'nın litosferinde sismik dalgalar yaratan ani bir enerji salınımından kaynaklanan Dünya yüzeyinin sallanmasıdır. Depremler, nesnelere ve insanları havaya fırlatacak ve tüm şehirlerde yıkıma yol açacak kadar şiddetli olanlara hissedilemeyecek kadar zayıf olanlardan boyut olarak değişebilmektedir. Bir bölgenin sismik aktivitesi, belirli bir süre boyunca yaşanan depremlerin sıklığı, türü ve boyutudur. Tremor kelimesi deprem dışı sismik gürültü için de kullanılmaktadır.

Dünya yüzeyinde depremler, zemini sarsarak ve yer değiştirerek veya bozarak kendini göstermektedir. Büyük bir depremin merkez üssü açık denizde olduğunda, deniz yatağı bir tsunamiye neden olacak kadar yer değiştirebilmektedir. Depremler ayrıca heyelanları ve bazen volkanik aktiviteyi tetikleyebilmektedir.

En genel anlamıyla, deprem kelimesi, sismik dalgalar oluşturan herhangi bir sismik olayı (ister doğal ister insan kaynaklı olsun) tanımlamak için kullanılmaktadır. Depremler çoğunlukla jeolojik fayların kırılmasından değil, aynı zamanda volkanik aktivite, toprak kaymaları, mayın patlamaları ve nükleer testler gibi diğer olaylardan kaynaklanmaktadır. Bir depremin ilk kırılma noktasına onun merkez üssü veya odak noktası denmektedir. Merkez üssü, doğrudan hipo merkezin üzerindeki yer seviyesindeki noktadır.



Şekil 2.1. Türkiye'nin deprem haritası

### 2.3. Sistem Tanımlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar:

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte dijital modellerin tasarım sürecinde kullanım alanı yaygınlaşmış ve dijital modellerden beklentiler artmıştır. Dijital modeller, tasarım, tasarım değişiklikleri için test etme ve geliştirme gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Sayısal modelin sonuçları, yapılan varsayımlara bağlı olarak yapıyı temsil etmektedir. Yanlış varsayımların bir sonucu olarak, sayısal modelin sonuçları gerçeklerden uzak olabilir.

Düzeni bilimsel bir alan olarak tanımlayan kavram ve terim, 1962'de Zadeh (Zadeh, 1962) tarafından tanıtılmış ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Gözlemlenen verileri veya sistemden bir koleksiyon kullanarak bir sistemin dinamik yapısı hakkında bir model (genellikle matematiksel) oluşturma veya yapılandırma,

Sistemi tanımlama olarak adlandırılır. Bir sistemi tanımlamak için üç temel adımdan oluşur:

- 1- Model seçimi ve testi - Sistem tepkileri, sistem modellenmesi ve deney planlaması ile ölçülür.
- 2- Parametre tahmini - Sistem parametreleri, seçilen model ve ölçülen yanıtlar kullanılarak tahmin edilir. Parametre tahmini, bir bina sisteminin davranışını belirlediği için tipik yapısal parametreleri (tipik frekanslar, mod şekilleri, tipik sönümleme, vb.) Tanımlamak için yapısal mekanikte kullanılır.
- 3- Koşullu doğrulama veya model yenileme.

Fagin (1964), Fitzgerald (1971) filtreleme sorunu üzerine birçok çalışma yapmışlardır. Kalman filtresinin aralığını kontrol etmişlerdir.

Magell (1965), çoklu model algoritmalarıyla çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bilinmeyen parametrelere ve bilinen kovaryansa sahip olan bir model için en iyi tahminin koşullu tahminlerin baskın toplamı olduğu gösterilmiştir. Burada ağırlıklar, her parametrenin doğruluğunun koşullu olasılıklarıdır. İlk zamandan bağımsız çoklu model yaklaşımı uygulamaktadır. Bu yaklaşımla hesaplama yükü artmasına rağmen tahmin performansı artırmaktadır. Önceki çalışmalarda, tahminlerde bulunurken sistem modları arasında geçiş olmayacağı varsayılmıştır. Bu yaklaşım, geçişsiz çoklu model algoritmalarının oluşturulmasına yol açmıştır.

Wong ve ark. (1967), doğrusal zamanla, sabit ayrık zamanlı sistemlerin parametrelerini tahmin etmek için ortak değişken yönteminin kullanılıp kullanılmayacağını araştırmışlardır. Bu yöntem için en iyi çözümü veren ve seri hesaplama dayalı çevrimiçi tanımlama yöntemini kullanan tahminlerin olduğunu kanıtlamışlardır. Ortak değişken yönteminin doğrusal diferansiyel sistemlerin parametrelerini tahmin etmek için de kullanılabilirliğini göstermişlerdir.

Wong ve ark. (1967), sistemi tanımlanacak modelle ilişkili olmayan ancak aynı girdiye sahip gürültüsüz bir modelin kombinasyonuna dayanan ortak değişkenler yöntemini tanıtmışlardır ve (Young, 1970)'in Yöntemde bulunan yenileme filtresinin eklenmesi ile istikrarsızlık sorununu ortadan kaldırmıştır.

Ackerson ve ark. (1970), çalışmalarına daha gerçekçi yaklaşımlar olan çoklu model algoritmaları kullanmaya başlamıştır. Bu önerilen algoritmalarda modeller arasında olası dönüşümlere izin verilmiştir. Son çalışmalarında, iyi izleme performansını korurken daha az model kullanmaya daha fazla önem vermişlerdir.

Jazwinski (1970), hem doğrusal hem de doğrusallaşan modellerde durum tahmini için en etkili tahmin algoritmalarından biri olan Kalman filtresini yaygın olarak kullanmıştır. Bu modeller, sistemin durumunu gösteren ancak gözlemlenemeyen rastgele süreçle ilgili durum denklemi ve gözlemlenebilir rastgele süreçle ilgili ölçeklendirme (gözlemlenen) denklemi ile modellenir. Bu denklemlere durum ve uzay modelleri denir. Kalman filtresinin amacı, sistemin uzay durum modeline göre sistemdeki gürültünün etkisini azaltmak ve gözlemlerini kullanarak durum vektörünü tahmin etmektir.

Mehra (1972), modelin hata terminolojisindeki varyansın bilinmemesi durumunda bu matrislerin tahmin durumlarını incelemiş ve kendisini uyarlayan Kalman filtresi için çalışmalar yapmıştır.

Tse ve ark. (1975), çok değişkenli rastgele doğrusal bir sistemin boyutunun, sistem dizilerinin ve gürültü değişkenlerinin bilinmediği durumu tartışmışlardır. Böyle bir sistem için çıktı verilerini kullanarak, sistemi tanımlamak için bir model geliştirmişlerdir. Uygun parametrelerin tahminlerini elde etmek için; Çıktı işlemi için yeni bir temsil kullanılıp bu sistem matrisleri tamamen standart bir şekilde seçilmiştir. İnovasyon katsayılarını ve sistem mimarisini tahmin etmek için sistematik bir yöntem tanımlanmıştır.

Roth (1981), sessiz gözlemlere dayanan kısmi diferansiyel denklemler aracılığıyla belirli bir sistemde sabitlerin tanımlanması sorununu ele almıştır. Bu çalışmada kullanılan teknikler (Berman, 1979) 'un fikirlerinden alınmış ve sanki doğrusallık, türev yaklaşımları ve dinamik programlama uygulamalarını incelenmiştir. Mevcut girdi ve çıktı verilerinin bilindiği göz önüne alındığında, en uygun çıktı verileri için hem başlangıç koşullarını hem de sistem parametrelerini elde etmek için sayısal bir yöntem yarattı. Burada kısmi türev yaklaşımı kullanılmış ve katkının küçük bir kısmı (Berman, 1979) deterministik sistemlerin belirlenmesi alanında uygulanmıştır.

Young (1981) sistemi başlangıçtaki frekansı ve geçici yanıtı kullanarak tanımlamıştır. Bu işlemler için sinüs, birim adım, birim darbe gibi özel girişler kullanılmıştır. Bilgisayarın piyasaya sürülmesiyle, ayrık zaman modellerinin tanımlanması büyük önem kazandı. Alınan verileri kullanarak ayrı bir sistem zamansal modeli tanımlamayı tartışmış ve bu konuda çeşitli yaklaşımlar geliştirmiştir.

Sinha ve Kusza (1983), Feliu ve ark. (1988), Lastman ve Sinha (1989), Sinha ve Lastman (1991), sürekli zaman modellerinin tahmini iki yöntemle yapılabilir: doğrudan ve dolaylı yöntemler. Dolaylı yöntemler kullanılarak, ayrık zaman modeli ilk olarak bilinen herhangi bir algoritma kullanılarak belirlenir ve sürekli zaman modeli, bilinen dönüştürme algoritmalarının yardımıyla değiştirilmiştir. Bu yaklaşımda, ayrık zaman modeli parametrelerini tanımlamak için kullanılan ayrık zaman algoritmalarının kullanımının bir avantaja sahip olduğunu, ancak çevrimiçi gerçek zamanlı uygulamalar için uygulamalarının ek hesaplamalar gerektirdiğini gösterilmiştir.

Juang ve ark. (1985), kronolojik geçmişte, girdi (zemin) ve yapısal çıktının çevresel titreşim kayıtlarının tepkileri, yapısal sistemdeki girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiler olarak alınır, TSDS (tek çıkışlı tek çıkış-TGTC) ve ESDS (çoklu çıkış çoklu giriş-MFF). Otomatik artımlı regresyon (ARX) ve durum uzayının (SS) matematiksel modellerinde çeşitli filtreleme teknikleri için optimizasyon modifikasyonları kullanarak araştırılan parametreler için en güvenilir girdi-çıkıtı ilişkisi ağını oluşturmaya çalışmışlardır. ESDS için girdi ve çıktı arasında WGP'nin çapraz ilişki ağını oluşturacak parametrelerin hesaplanması sürecinde Öz Gerçekleştirme Algoritmasını (ERA) kullanarak Kalman değişken filtresi yardımıyla parametrik değişkenleri hesaplamışlardır.

Ljung (1987), sistemi endüstriyel amaçlarla tanımlamak için geliştirilen teknolojileri kullanmaya başlamış ve sistematik olarak çalışmıştır.

Alengrin ve ark. (1987) ARMA modelinin parametre tahmini için yeni bir yöntem. Çalışmalarında, geçici bir durumda bir sistem tarafından tanımlanan formüllerin (Li, S. ve diğerleri, 1986) tek adımlı tahminci ilişkileriyle de kolayca elde edilebileceğini gösterdiler. Sistemin AR parametrelerini ve MA parametrelerini sistemin kararlı durumu için ayrı ayrı hesaplamışlardır.

Chung ve ark. (1988), çalışmalarında Taylor serisi yaklaşımını kullanarak doğrusal olmayan sistemlerin bilinmeyen parametrelerini tahmin etme ve analiz etme konusunu tartışmışlardır. Dijital programlamaya uygun algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımın temel avantajı, entegrasyon için kullanılan matris yapısının çok basit olmasıdır. Bu yaklaşımın doğruluğunu sayısal örneklerle göstermişlerdir.

Hashemipour ve ark. (1988), Rao ve Durant (1991) çoklu sensör sistemleri için paralel Kalman filtresini incelemişlerdir.

Kay (1988) yaptığı çalışmada, model puanını seçerken sinyalin her zaman en küçük model puanı seçilerek tasarlanması gerektiğini ve Akaike bilgi ölçütü, Schwarz Bayesian model seçim ölçütü ve son modelin kullanılmasının uygun olacağını ortaya koymuştur. uygun model puanını seçmek için tahmin hatası kriterleri. Seçilen modelin puanına bağlı olarak sistem parametrelerini tahmin ederek ve son olarak sinyal performansını test ederek ve performans testi açısından en küçük kareler, spektral eşleştirme ve maksimum olasılık gibi kriterlerin kullanılabilmesini belirleyerek. Belirtilen modelin performansının uygun olmadığı, yani grafikte güven aralığında (%95 güven aralığı) bir veride varsa model puanı artırılarak modelin yeniden yapılandırılması gerektiği belirlenmiştir.

Sagara ve Zhao (1989, 1990, 1991), Yang ve diğerleri. (1994), Johansson (1993, 1994), Kowalczyk ve Kozłowski (2000), çalışmalarında sürekli zaman modellerini belirlemede geçmiş yıllarda değişken durum filtreleri olarak analog önceden ayarlanmış filtreler kullanmışlardır. Dijital bilgisayarların hızla gelişmesiyle birlikte sürekli zaman modelleri tamamen dijital olarak tahmin edilmektedir. Bu nedenle, sinyal işleme uygulamaları için gerekli olan ayrık zaman ölçümlerine dayalı dijital filtreleme teknikleri kullanılmıştır. Son yıllarda sayısal bilgisayarlarda analog ön ayar filtreleri gerçekleştirmek için sayısal entegrasyon, ikili anahtarlama ve ortogonal fonksiyonların kullanımı gibi bazı teknikler kullanılmaktadır. Ayrıştırıcı ile dijital formdaki analog önceden ayarlanmış filtreleri kullanarak, diferansiyel denklemin parametrelerine dayalı olarak ayrı bir zaman modeli elde edilir. Sürekli zaman modelinin parametreleri, ayrık zaman modellerini doğrudan veya modifikasyonla tanımlamak için kullanılan ayrık zaman algoritmalarından biri kullanılarak doğrudan elde edilen bu ayrık modele dayalı olarak bulunabilir.

Sagara ve ark. (1990), geçmiş yıllarda ayrık zamanlı sistem tahmin problemi için veri örneklerine dayalı parametre tahmin algoritmalarında iyi bir performans göstermiştir. Ancak daha sonra, sürekli zaman modellerinin fiziksel yapıyı daha iyi temsil ettiğini göstermişler çünkü istenen hassasiyet artmıştır.

Unbehauen ve Rao (1990, 1998), tahmin algoritmasını uygulamadan önce sistemin diferansiyel denklemini cebirlemek için sinyal işlemenin gerekliliğini inceledi, çünkü zamana göre türevleri her zaman gürültü içeren giriş ve çıkış sinyallerinin ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir. Sürekli zaman modellerini tahmin etmede en önemli yöntemin filtreli sinyallerin kullanılması olduğunu ve bu sinyallerin bir ön filtreden ölçümler geçirilerek elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Dorsch ve ark. (1991) cebirsel kısıtlar altında doğrusal dinamik sistemler için bir dizi durum tahmin algoritması geliştirdi. Durum vektörü için minimum değişim tahmini, ölçülen modele ve dinamik model denklemine bağlı olarak Kalman filtresi tarafından belirlenir. Doğrusal kısıtlamalar, durum tahmin yönteminin uzantısı ile tartışılmıştır. Doğrusal sıralı kestirimin bir önceki durumun kestirimi, yeni ölçümler ve doğrusal cebirsel kısıtlar altında elde edildiği bulunmuştur. Bu sorun enerji sistemlerinde ve ekonomik sistemlerde ortaya çıkmaktadır.

Elramisi ve ark. (1991) Kesikli doğrusal olmayan zaman modelinin parametrelerini tahmin etmek için yeni bir yöntem geliştirmişti. Modelin yapısı, temel Gabor fonksiyonlarının frekans haritalama alanında bir sadeleştirme ile gösterilmiş ve bu fonksiyonların Gauss uzaysal eğrileri birlikte kullanılmıştır. Gabor'un temel işlevlerinde yapılan değişiklikler de gürültü etkilerini önlemek için incelenmiştir. Bu algoritma (düzensiz bir örnekleme aralığı ile), üç katmanlı sinir ağı devrelerinde sistem tanımlama problemini çözmek için kullanılmıştır.

Horvath (1991), doğrusal ayrık zaman modelleri rastgele katsayılarla ifade edildiğinde model parametrelerini tahmin etmekle ilgilenmiştir. Özellikle, belirtilen modele yapışma için maksimum olasılık ve uygunluk tahminlerini araştırmıştır. Bu tahminler, doğrusal ayrık zamanlı sistemler ve sabit parametre sistemleri içindir; ARX modelinin en küçük kare yetenekleri kadar basittir. Bu model, ARX modeliyle aynı

boyutta olduğu için birçok bilinmeyen parametre içerir ve bu model, rastgele çıktılarla gerçek sistemleri modellemek için bir yöntem olarak kullanılabilmiştir.

Chai (1992), bir indüksiyon motoru için İnternet üzerinden parametre tahmini için ekonomik bir algoritma tanımlamıştır. Bu parametreler yalnızca işaretlemedeki bileşenlerden türetilir ve en uygun hesaplanan parametrelerdir. Spektroskopi ile çevrimiçi test yöntemlerinde kullanılabilir olduğu görülmüştür ve bu yöntem standart çevrimdışı yöntemle benzerdir. Bilgisayar uygulaması sonucunda algoritmanın performansının 2KW'lık bir endüksiyon motorundan elde edilen deneysel sonuçlar kadar iyi olduğu görülmüştür.

Drosh (1992) çalışmasında. Tek girişli ve tek çıkışlı ayrı zaman sistemleri. Bu sistem için internet üzerinden durum ve parametre tahminine yönelik sıralı bir algoritma geliştirdi. İncelenen model, gözlemlenebilir bir köşegen olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, genelleştirilmiş Kalman filtrasyonuna dayanmaktadır ve iki adımda geliştirilebilir. İlk adımda, parametreler ardışık en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilir. İkinci bir adımda, bu parametreler genelleştirilmiş bir Kalman filtresi kullanılarak durumu tahmin etmek için kullanılmış ve bu algoritmanın doğruluğu sayısal örneklerle gösterilmiştir.

Liaw (1992), sürücü sistemleri için parametreleri tahmin etmek için dolaylı olarak stokastik bir yöntem kullanmıştır. Bu yöntemde, her bir sürücü sistemi bloğuna zamanla ayrılmış bir ARMA modeli takılır ve sistem, giriş ve çıkış verilerinin örneklerinden belirlenir. Daha sonra, hâkim enerji modları fikrinden, sürekli zaman modeli için uygun indirgeme derecesi belirlenir. Sonuç olarak, sürekli zaman modelinin parametreleri, belirlenen ARMA modelinin frekans yanıt benzerliği kullanılarak bulundu. Sunulan yöntem, pompalanan depolanmış enerji sistemlerinde sürücü sistemi parametrelerini tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntemin en büyük avantajı, sistemin parçalarının genellikle durum uzayını dönüştürmek için birim matris kullanılarak gerçekleştirilmesi, böylece dengeli algılama ve spektroskopi kullanan yöntemler için yansımayı ortadan kaldırmasıdır. Bu algoritma, kararsız sistemler için doğrudan kullanılabilir.

Kamas (1993), güç elektroniği devrelerindeki ölçülebilir olmayan devre değişkenlerinin parametrelerinin ve parametrelerinin tahminini ve devre modellerinin

yapımını araştırmıştır. Kapalı devre kontrol tasarımları için güç elektroniği devrelerinde yaptığı birçok uygulamada Lyapunov'un durum tahmin fonksiyonuna dayalı olarak devre parametrelerinin tam olarak bilinmediği durumlar için uyarlanabilir bir tahmin algoritması geliştirilmiştir ve çok pahalı ve doğrudan elde edilmesi zordur. Bu algoritma, ölçülemeyen devre değişkenleri ile bilinmeyen devre parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Konum tahmininin doğruluğu, ortalama ve tek dağılım analizi kullanılarak gösterilmiştir.

Koh vd. (1994), Tsing vd. (1994), Angelis ve diğerleri. (2003), Phan ve Longman (2004) mekanik sistemlerin yapısal parametrelerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır.

Li ve Bar-Shalom (1993), Monte Carlo simülasyonunu kullanmadan Etkileşimli Çoklu Model (ICD) algoritması için tahmin yönteminin performansını örneklerle tartışmıştır.

Lynn ve Atherton (1993), hedef izleme manevrasında kullanılan etkileşimli çoklu model (IAC) algoritmasının bazı özelliklerinden ve farklı parametrelerin farklı sayıda modellerle kullanılmasının etkilerinden bahsetmişlerdir.

Mazor ve ark. (1993), etkileşimli Çoklu Modelin (ICD) algoritmalarını hedef takibi açısından incelemiş ve algoritmaların varsayımlarını ve farklı durumlarda uygulamalarını sunmuşlardır.

Özbek (1993), ayrık uzay ve zaman modellerinde indirgeyici tahmin yöntemini araştırmış ve Özbek ve Öztürk (1993) Kalman filtresi kullanarak GSMH değerini tahmin etme üzerine bir araştırma yapmıştır.

Subrahmanyam (1993), yaptığı çalışmada; Markov parametrelerini kullanarak sürekli zamanlı sürekli tek girişli sistemin transfer fonksiyonunun parametrelerini tahmin etmek için bir algoritma geliştirmiştir. Markov parametrelerinin tanımını genelleştirmek için Markov - Poisson parametreleri olarak bilinen yeni bir dizi parametre kullanılmıştır. Benzer modelleri tahmin etmek için sürekli zaman sistemlerine transfer fonksiyonları veren bu verimli algoritma detaylı olarak incelenmiştir.

Wan (1993), doğrusal olmayan sistemler için Genişletilmiş Kalman Filtresinin (EKF) maksimum olasılık yaklaşımı sağlayabildiğini, ortalama ve kovaryansın tekrar

tekrar güncellenebileceğini, ancak dinamiklerin doğrusal düzenlemesinde türevin tahmini için alınması gerektiğini belirtmiştir. Doğrusal olmayan dinamikler için, bu türevi kullanarak zamanla değişen doğrusal dinamiklere yaklaşılabilceğini ve bu durumda standart Kalman denklemlerinin uygulanabileceğini göstermiştir.

De Kock (1994), bir çıkış hatası tekniği kullanarak asenkron motorlarda parametre tahmini için bir algoritma geliştirmiştir. Güç sistemleri için asenkron motorların simülasyonu; Genellikle yanlış veya bilinmeyen parametre verileriyle engellenmektedir. Motor parametrelerini tahmin etmek için geliştirilen teknik, uygulanan gerilimin bozulmalarıyla birlikte bir çıkış hatası tekniği kullanmıştır.

Chia ve ark. (1994), yanlış hazırlanmış durum uzay modeli durumunda Kalman filtresinin fark durumunu tartışmışlar ve filtrede bazı iyileştirmelere izin veren unutma faktörünü hesaplamak için farklı algoritmalar önermişlerdir.

Özbek ve ark. (1996) Kalman filtresinde yanlış form ayarından kaynaklanan değişim problemini araştırmışlardır.

Raul (1996), dinamik sistemlerde durum uzayı modelinin parametrelerini tahmin etme problemini çözmek için bir sinir ağı mimarisi kurmuştur. Ağırlık / eğim bilgilerinin önceden hesaplanmasına dayanan mimari, doğrudan (Normalizasyonsuz) gradyan hesaplama ve çıktı hatası yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir.

Farrar vd. (1997) Çevresel titreşim ölçümüne dayalı hasar analizinin, mevcut durumu, binanın tipik özelliklerini ve bazı parametrik değişiklikleri gözlemleyerek hasar değerlendirmesine de olanak tanıdığını gösteren bir çalışma. Yerel hasarın yüksek frekans içeriğine dayalı istatistiksel çalışmalar, düşük frekans içeriğine sahip küresel yapısal hasar, birinci mod frekansının diğer modüler parametrelere kıyasla rastgele hatalardan daha az etkilendiğini göstermiştir.

Özbek (1997), durum-uzay modelinin yanlış hazırlanması durumunda Kalman filtresindeki farkı tartışmış ve filtrede bazı iyileştirmeler yapacak bir algoritma önermiştir.

Weidanabudi ve ark. (1997), çok hedefli ve çok sensörlü hava trafik kontrolü için etkileşimli çoklu model (IAC) algoritmasının uygulanması üzerine durmuşlardır.

Farrell ve Barth (1999), Grewal ve ark. (2001) parametre tahmininde tahmin edilen parametrelerin çoğunun sistematik sapmalardan arındırılması ve en az varyansla elde edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Herring (1999) özyineleme kavramı üzerine araştırmalar yapmıştır. Özyineleme, yeni ölçümlerle ekstrapolasyon yoluyla hesaplanabilen parametrelerin hesaplanmasıdır. Kalman filtre tekniği, boyutları dinamik (kinematik) bir modelle birleştiren örnek bir fazlalık parametre tahmin yöntemi olduğunu da ortaya koymuştur.

Herring (1999), Moore (2001), uyarlanabilir filtre aralığında değerlendirilebilecek kinematik modeldeki sapmaların zamana bağlı modellenmesi üzerinde çalıştı. Yer değiştirme, ani hız ve ivme değişikliklerinden kaynaklanan beklenen modelden sapmaların ilişkilendirildiği göz önüne alındığında, uygun gürültü modelleri aracılığıyla optimum filtre çalışması elde edilebilir ve çözümleri geliştirilebilir.

Merwe ve Nelson (1999, 2001) hafıza problemi ve eski verilerin filtrede tutulması sonrası hesaplama yöntemlerinin çevrim içi ya da çevrim dışı seçilmesi gerekliliği ve öğrenme eğrilerinde olumsuz sonuçlara bağlı olarak hangi model ve durumların kullanılacağını belirlemişlerdir.

Nelson (2000) Önceki çalışmaların aksine, sinyallerin hem durumunu hem de parametrelerini aynı anda iyileştirmeye odaklanmıştır. Bu optimizasyon yöntemi, literatürde ikili filtreleme olarak bilinir. Çalışma sırasında iki filtre kullanıldı. Filtreler birbirine paralel çalışır, biri sinyalin durumunu iyileştirir, diğeri ise sinyal parametrelerini iyileştirir. Bu nedenle, ikili filtre yöntemi, sinyal geliştirmede tekli filtrelerden daha uygun sonuçlar sağlar. Çünkü bireysel filtreler ya sadece yüksek sinyallerin durumunu iyileştirir ya da parametrelerini iyileştirir.

Heunecke ve Welsch (2001), zaman serilerini modelleyerek sistemin beklenen değeri ve sistemlerin tanımlanmasındaki otokorelasyon fonksiyonunu ve ayrıca sistemin gelecekteki tahminlerinin olasılığını incelemişlerdir. Yanıt ve etki hacimleri arasında yapılması gereken karşılıklı korelasyon süreci sayesinde, sistem yanıtının etkiye göre geciktirilip geciktirilmediği belirlenebilir. Yani efektif hacim bir reaksiyona sebep oluyorsa sistemde gecikme olmaz. Değişiklik yoksa sistemde gecikme olmaktadır.

Moore (2001, 2002) 1960 yılında uyarlanabilir filtreler seçerek ve yenilik sırasını kontrol ederek navigasyon, deprem tahmini ve nesnelerdeki dinamik ve kinetik hareketlerin belirlenmesi gibi birçok mühendislik alanında kullanılan Rudolf Emil Kalman'ın teorisini tanıtmıştır. Her adımda ve buna göre kinematik modelin bir revizyonunu ifade edebilmiştir.

Nelson (2001), doğrusal olmayan sinyallerde daha iyi performans elde etmek için ikinci dereceden EKF parçacık filtresi kullanmanın özelliklerini incelemiştir.

Merwe ve Wan (2002) bir başka öngörücü olan yerleşik Kalman filtresini taramışlardır. Doğrusal olmayan ortamlarda genişletilmiş Kalman filtresini tahmin ederken, bu filtrenin varyasyon probleminin filtreden türetilmiş bir versiyonu olduğu için, doğrusal olmayan sinyallerde daha olumlu sonuçlar sağlayabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Labarre ve Grivel (2003), ses sinyallerini iyileştirmek için ikili Kalman filtresinin kullanım amacını araştırmışlar ve bunun sonucunda genişletilmiş Kalman filtresine bir alternatif olduğunu, genişletilmiş Kalman filtresinde boşluk sorunu olmadığını ve doğrusal olmayan sistemlerde yeterli sonuçlar sağlayabilir. İkili yaklaşımda genişletilmiş Kalman filtresinin varyasyon problemi dikkate alınarak doğrusal olmayan sinyaller hesaplanır ve ikili hesaplamada genişletilmiş Kalman filtresine göre daha uygun sonuçlar elde edilir. İkili yaklaşımdaki diğer bir mantık, model ve parametrelerin aynı anda tekrar tekrar tahmin edilebilmesidir. Doğrusal olmayan sistemlerde, genişletilmiş Kalman filtresi, sistemin dinamiklerini belirleyebilir ve standart Kalman filtresini kullanarak normal bir tekrarlı tahmin gerçekleştirebilir. Bununla birlikte, doğrusallık sırasında, bazı durumlarda kovaryans ve ortalama sinyalde bir sapma gözlemlendi. Çalışmalarında bu sorunu çift Kalman filtresi yaklaşımıyla ele aldılar. Sinyal durumu, belirli bir ses sinyali üzerinden paralel olarak hesaplanırken, diğer yandan, sinyal parametreleri hesaplanarak genişletilmiş bir Kalman filtresinden daha iyi performans elde edilir. Öte yandan fark sorunu da ortadan kalktı. Çift filtreli iş modeli sıralı olarak yapılır yani hesaplamalar nokta şeklinde yapılır. Doğrusal olmayan dinamik sistemlerde, genişletilmiş Kalman filtresi, ayrık zaman durumunun olasılığını hesaplamak için uygun çözümler üretebilir. Filtre,

dinamik modelden uygun sonuç için beğeni ve gürültüyü birleştirir ve bu çalışmaya defalarca devam eder.

Sethi ve Song (2006), üç katmanlı bir multimedya modelinin titreşim kontrolünü inceleyerek, alt uzayda sistem tanıma yöntemini kullanarak modelin ilk üç modunu belirlemiş ve %90 uyum sağladığını belirlemiştir. Tam durum denetimi sağlamak için bu sonuçları Sütun Denetleyicisi'nde kullanmışlardır.

Giraldo (2006), referans topoloji üzerine temel tanımlama yöntemlerini değerlendirerek, SSI yönteminin cihazlarda gürültü için daha sağlam sonuçlar verdiğini belirtmiştir; Ardından, model güncelleme yoluyla yapısal sağlamlığı değerlendiren çalışmalara dayanan CGP yönteminin (eşlenik gradyanlar sağlar) daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Elbette bu sonuçlar çalışmada belirtilen kriterlere bağlıdır ve karşılaşılabilecek tüm durumları içermemektedir.

Kasımzade ve Tuhta (2005, 2006, 2007, 2008, 2009), herhangi bir sistemin tipik parametrelerinin, sistemin doğal ve yapay tepkilerinin yanı sıra fiziksel olarak tahmin edilmesini sağlayacak şekilde sistematik bir tanımlama yöntemleri çalışması yürütmüştür sistemin parametreleri. Bir yapının morfometrik veya fiziksel parametrelerini tahmin etmenin doğruluğu, sistemin durum  $A$ -, girdi-etki-  $B$ , çıktı-etki- $C$  ve doğrudan iletim matrislerinin mümkün olan en az hata ile belirlenmesidir. Bu hedefe ulaşmak için, rastgele etkilerin tahmini durum vektörü  $\hat{x}(k)$ ,  $x(k)$  'nin gerçek durum vektöründen farkı  $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$  en azından bu fark  $P=cov(e(k))$  Riccati denkleminin çözümünü  $P$  olarak bulun ve Kalman  $K(k)$  kazancını elde edin (bu mümkün olmadığında, doğrudan girdi ve çıktıya dayalı gözlem kazancı  $G$  kullanılır) sistemin karakteristik durum matrislerini ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ) Optimizasyon olarak (en verimli) Yeni bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir.

Yukarıdaki çalışmaları özetlemek gerekirse, inşaat mühendisliği yapılarında girdi-çıkıtı tabanlı ortam tanımlama yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir, Maia (1997), Cunha, Caetano (2005):

- A) Frekans alanındaki araçları belirleme yöntemleri. Dinamik çoklu serbestlik dereceli sistemler için RFP (Rational Fraction Polinomial), CEFD (Compound Exponential Frequency Domain), PRFD (Multiple Reference Frequency Field) yöntemleri.

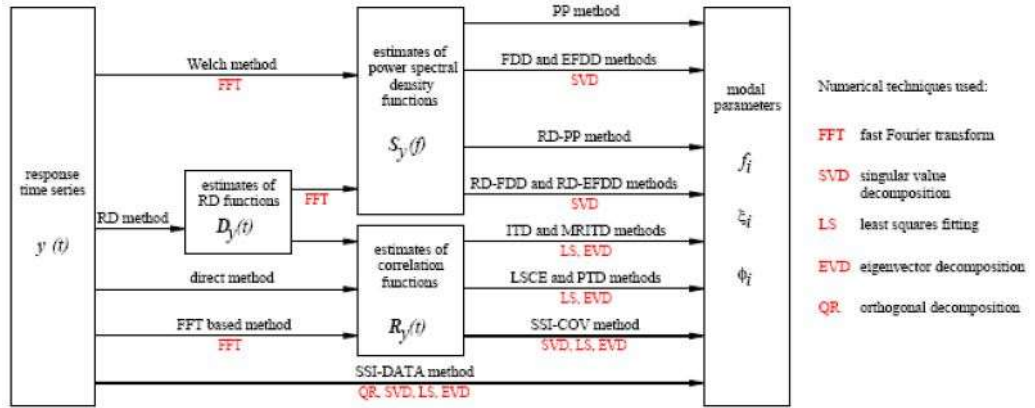
B) Zaman alanında koşullu tanımlama yöntemleri. Dolaylı CE (karmaşık üstel), LSCE (en küçük kareler üstel karmaşık), PRCE (üstel karmaşık çoklu referans), ITD (Abraham (1977) zaman alanı), ERA (Eigensystem algoritması) ve doğrudan ARMA (otomatik regresyon) ortalama alma yöntemleri kullanılabilir.

İnşaat mühendisliği yapılarında, yalnızca çıktıya dayalı ortam belirleme yöntemleri, esas olarak Rodrigues (2004) frekans alanında geliştirilen parametrik olmayan ve geçici alana özgü yöntemler olarak sınıflandırılabilir:

- 1) Frekans alanında, yalnızca çıktı temelinde tanımlama yöntemleri. PP (pik seçimi), FDD (frekans alanı analizi), EFDD (gelişmiş frekans alanı analizi).
- 2) Yalnızca zaman alanındaki çıktılara dayalı tanımlama yöntemleri. Bu yöntemlerde, sakin bir durumda dinamik yapısal davranış ilk olarak ARMAV veya ARV modelleri şeklinde ayrı olarak modellenir.

FFT algoritması veya RD yöntemi (Stokastik Azaltma yöntemi), ITD (Abraham Temporal Domain), MRITD (Multiple-reference Abraham Time Domain, Fuzukono (1986)), LSCE (Leastares Complex Exponential), PRCE (Exponential Multiple Reference Complex), SSI- COV (Co-varyans güdümlü rasgele uzay belirleme), SSI-DATA (veriye dayalı rasgele uzay belirleme), PolyMAX (Polymax parametre tahmin yöntemi).

Bu yöntemler aşağıdaki şekilde şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yalnızca çıkışa dayalı modal tanımlama metotları

## 2.4. Titreşim Esaslı Sağlık İzleme:

Yapısal sağlık izleme (YSİ), yapıların sağlığını ve performansını güvenilir bir şekilde izleyebilen inşaat, mekanik ve havacılık mühendisliği yapıları için bir hasar tanımlama sistemi uygulama sürecidir. YSİ, yerel veya global olarak sınıflandırılabilir. Yerel yöntemler, akustik, girdap akımı, emisyon spektroskopisi, manyetik yöntemler, radyografi, ultrasonik, röntgen ve görsel inceleme gibi tahribatsız inceleme yöntemlerini kullanarak yapısal bileşenlerin hasarlarını tespit eder.

Tüm yapıya verilen hasarı tespit etmek için global yöntemler kullanılır. Sensör sistemi ve titreşim analizine dayalı küresel yöntemler üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Titreşime dayalı hasar tespiti, mekanik ve havacılık mühendisliği yapıları için rutin bir yöntem olmuştur. Enstrümantasyonun yükseltilmesi ve sivil yapıların dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasıyla, titreşim temelli YSİ son yirmi yılda daha fazla ilgi gördü ve hızlı bir gelişme gösterdi.

Doebing vd. yapıların titreşim temelli hasar tanımlamasına ilişkin kapsamlı bir teknik literatür incelemesi yapmıştır. Sohn vd. literatür taramasını daha yeni gelişmelerle güncellemişti. Chang vd. sivil altyapıların sağlığının izlenmesine ilişkin araştırma çalışmalarının bir incelemesini sunmuştu.

YSİ sistemlerinin, yapıların hasar kapsamını belirlemek için faydalı bilgiler sağlayabilmesi beklenmektedir. Rytter tarafından açıklandığı gibi, hasar tespiti dört seviyede karakterize edilebilir:

1. Yapıda herhangi bir hasar olup olmadığını belirleme,
2. Hasarların yerini belirleme,
3. Hasar derecesini belirleme,
4. Kalan hizmet ömrünü tahmin etme.

Yapısal sağlık izlemesi, fiziksel ölçümlere ve bilgisayar analizlerine dayalı objektif tahribatsız değerlendirme araçlarıyla öznel görsel denetim yöntemlerini tamamlama ihtiyacından kaynaklanan aktif bir araştırma alanıdır. Sağlık izleme teknikleri küresel veya yerel olarak sınıflandırılabilir. Birkaç küresel izleme yönteminden biri titreşim ölçümlerine dayanmaktadır. Titreşime dayalı hasar tespiti, yerel bir sertlik değişikliğinin

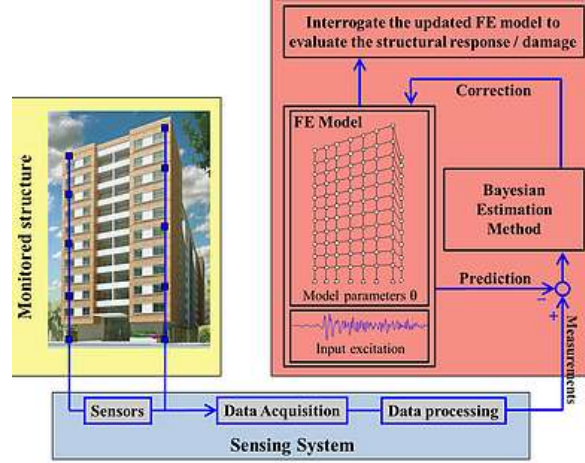
yapının global dinamik özelliklerini etkilediği gerçeğine dayanır. "0 Hz varyantında", yapıya statik bir yük uygulanırken yer değiştirmeler ölçülür.

YSİ, yapıları izlemek için müdahaleci olmayan hasar tespit tekniklerinin kullanıldığı, gelişmekte olan önemli bir alan haline gelmiştir. Bu nedenle, YSİ teknolojileri büyük bir ticari ve ekonomik potansiyele sahiptir. Bozulma veya hasar büyük eylemlerin gerekli olduğu bir duruma gelmeden önce yapıda nispeten küçük düzeltici eylemlerin gerçekleştirilebildiği erken bir aşamada hasarların belirlenmesine yardımcı olabilmektedir. Genel olarak, insan gücü gerektiren ve tehlikeli veya uzak ortamlarda gerçekleştirilmesi zor olan, görsel denetimlere ihtiyaç duyulmadan otomatik bir şekilde hasar tespiti arzu edilmektedir. YSİ sistemlerin ayrıca mühendislerin gelecekteki yapıların performansını iyileştirmek için önceki tasarımlardan öğrenmelerine olanak tanır.

Global bir yöntemin temel avantajı, tek bir konumdaki ölçümlerin tüm yapının durumunu değerlendirmek için yeterli olmasıdır. Ölçüm konumu, hasarın bulunduğu yerden farklı olabilir. Titreşime dayalı yöntemler aralıklı olarak uygulanabilir ve sensörlerin ve edinim sisteminin geçici olarak konuşlandırılmasını ima eder ve veya sürekli olarak ve sensörlerin yapıya gömülmesini ima eder. Sürekli ortamda, önleyici zaman tabanlı bir öngörücü koşul tabanlı bakım stratejisine geçiş sağlanır. Bu değişim, gereksiz denetim faaliyetlerini ortadan kaldırarak hem yapının ciddi şekilde arızalanması riskini hem de genel bakım maliyetlerini azaltır.

Titreşime dayalı sağlık izlemenin gelecek vaat eden perspektifi, dünyanın her yerindeki birçok araştırmacıya ilham verdi. Hasar tanımlama adımları aşağıda sayılmıştır:

- Adım 1 - algılama: Yapı hasarlı mı, değil mi?
- Adım 2 - yerelleştirme: Hasarlı alan nerede bulunur?
- Adım 3 - miktar belirleme: Hasarın boyutu nedir?
- Adım 4- tahmin: Yapının kalan hizmet ömrü ne kadardır?



Şekil 2.3. Betonarme bina yapısının sonlu elemanlar modeli

Hasar tespit problemi (Adım 1) temelde yapının öz frekanslar gibi dinamik özelliklerindeki bir değişikliği tespit etmeye eşdeğerdir. Titreşime dayalı yöntemleri seviye 1'in ötesine genişletmek için iki yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda, yerel mod şekil değişikliğini tespit etmeye dayalı hasarın yerini tespit etmek için çok sayıda sensör kullanılmaktadır. Lokalizasyon doğruluğu tipik olarak ölçüm ağının uzamsal çözünürlüğü ile sınırlıdır. İkinci bir yaklaşım daha az sensör gerektirir, ancak yapının analitik bir modeline ihtiyaç duyurmaktadır. Modelin hasarla ilgili parametreleri güncellenerek modelin dinamik özellikleri ölçümlere karşılık gelir.

Titreşime dayalı yapısal sağlık izleme çok çeşitli yapılara uygulanabilmektedir. Titreşime dayalı izleme, yapıların durumunun değerlendirilmesinde ve bakım programlarının hazırlanmasında kesinlikle yardımcı bir araçtır. Titreşime dayalı sağlık izlemede, çok sayıda ölçüm verisi üretilir. Orijinal titreşim verileriyle aynı bilgileri içeren yapının deneysel bir modelini tahmin ederek veri miktarını sıkıştırmaya ihtiyaç vardır.

Verilerden bir model bulma sürecine sistem tanımlama denir. Genel sistem tanımlama, elektrik mühendisliğinin bir araştırma dalıdır. Alandaki son gelişmeler, alt uzay yöntemlerinin [VANO96] ve maksimum olabilirlik frekans alanı yöntemlerinin [SCHO91] geliştirilmesidir.

Sistem tanımlamasının titreşimli yapılara uygulanması, makine mühendisliğinde deneysel modal analiz olarak bilinen yeni bir araştırma alanı sağlamıştır. Tanımlanan model bu durumda, özfrenkanslar, sönümlenme oranları, mod şekilleri ve modal katılım faktörlerinden oluşan modal bir modeldir. Genellikle, hasarın tanımlanması modal modeldeki değişikliklere dayanmaktadır. Hasar tespitine alternatif bir yaklaşım, yalnızca sağlıklı yapının bir modelini belirlemekten oluşmaktadır. Daha sonra, yeni verilerin hala başlangıç modeliyle açıklanıp açıklanamayacağına karar vermek için istatistiksel hipotez testleri yapılır. Yöntemin temel avantajı, yeni veriler elde edildikçe hiçbir yeni modelin tahmin edilmesine gerek olmamasıdır, bu bazen otomatikleştirilmesi zor olan bir prosedürdür.

## **2.5. Tepki Ölçümleri:**

Yapının titreşim davranışını belirlemek için yapılan ölçümlerin amacı, yapının belirli sınır koşulları altında frekansa bağlı tepkilerini ölçmektir. FTF'lerin etki noktası ile ölçüm noktası arasındaki ilişki üç şekilde belirlenmiştir. Tek Çıkışlı Ölçümlerde (TGTC) darbe noktaları ve ölçüm noktaları değişkendir. Varyasyon, ölçülen her bir FTF'nin modüler bir analizini gerektirir. Çoklu giriş ölçümlerinde (TGÇ), FTF'ler aynı noktadan aynı etkiye sahip farklı ölçüm noktalarından alınır. Aynı etki gücüne karşı FTF'ler arasında bir tepki ilişkisi olduğu için, FTF'lerin model analizi toplu olarak gerçekleştirilir. Çoklu giriş ölçümlerinde (WGP), ölçümler birden fazla noktadan darbe yoluyla farklı ölçüm noktalarından alınır. Bu ölçümle alınan FTF'ler arasında birden fazla etki gücüne karşı anti-cevap ilişkisi olduğu için, model analizi FTF'ler üzerinde toplu olarak yapılmaktadır. Bununla birlikte, koşullu analiz yöntemi, TGÇ ölçümlerine uygulanandan farklıdır. TGTC, TGÇ ve CGÇÇ ölçümleri yapı hakkında farklı miktarlarda bilgi içerir. Bu ölçümlerde, bina tepki modeli için FTF matrisinin farklı konumları ölçülür. FTF matrisinde, satır göstergesi ölçü noktalarını gösterir ve sütun göstergesi etki noktalarını

gösterir. TGTD ölçümünde etki ve ölçeklendirme noktaları değişken olduğundan, FTF matrisinin yalnızca bir ögesi ölçülür.

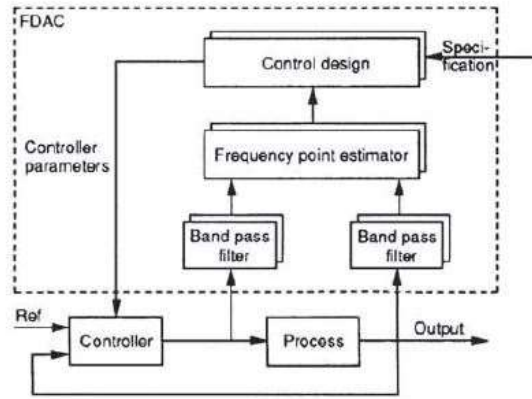
FTF matrisinin bir sütunu, TGÇD ölçümlerinde etki noktası sabit ölçüm noktaları olduğundan ölçülür. HSE ölçümlerinde ise çarpma noktası birden fazla nokta ve ölçüm noktaları değişken olduğu için FTF matrisinin birden fazla sütunu ölçülür. Görünüşe göre, MWL ölçümleri bir şasi hakkında en bilgilendirici ölçümlerdir. Bu ölçümlerin daha fazla veri içermesi, tipik değerlerin çok daha kaliteli olmasını sağlar ve simetrik yapılarda çok yakın frekanslara sahip modların belirlenmesini ve mod şekillerinin çıkarılmasını kolaylaştırır. Herhangi bir yapının deneysel model analizi sırasında birden fazla yöntem kullanılabilir. Tipik bir analiz için seçilen yöntem, elde edilen verilerin kalitesine ve miktarına bağlıdır. Tipik analiz sonuçlarının kalitesi, büyük ölçüde ölçümlerin kalitesiyle ilgilidir. Elektronik ve hesaplama teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, binalara kurulan izleme sistemleri ile mevcut ve deprem altı durumlarındaki dinamik davranışlarının incelenmesini sağlayarak, onları laboratuvar ve dijital yöntemlere göre daha ekonomik ve daha doğru bir alternatif haline getiriyor. Bu alandaki en etkili gelişme deprem mühendisliği alanındadır. Günümüzde deprem bölgelerinde bulunan iyi donanımlı yüzlerce bina gerçek bir saha laboratuvarı oluşturuyor ve her depremde binlerce benzersiz veri sağlıyor. Deprem mühendisliğinde kullanılan bina izleme sistemlerinin amacı ve yöntemleri kısaca açıklanmıştır.

## **2.6. Bir Frekans Alan Adaptif Denetleyicisi:**

Frekans Alanı Uyarlamalı Denetleyici (FDAC). Uyarlanabilir şema, frekans etki alanı tahminini frekans etki alanı denetleyicisi tasarımıyla birleştirir. Buradaki fikir, sistemin Nyquist eğrisi üzerinde ayrı bir nokta kümesini tahmin etmektir. Bu set, kontrolör tasarımında kullanılır. Şema öncelikle düşük dereceli kontrolörlerin tasarlanması için tasarlanmıştır. Çoğu geleneksel uyarlanabilir kontrol şeması, prosesin veya kontrolörün bir parametrik modelinin tahminine dayanır. Bkz. Astrom ve Wittenmark (1989). Yeterli uyarma garanti edilmezse, bu şemalar bazı uyarma testlerini içermelidir. Bunun üstesinden gelmek için bu çalışmada bant geçiren filtrelemeye dayalı bir frekans etki alanı tahmin yöntemi kullanılmıştır. Frekans tepkisi tahmini Hagglund ve Astrom (1991) tarafından yapılan çalışmanın bir uzantısı olarak kabul edilebilir. Frekans tepkisi

tahminini kullanarak Levy (1959) ve Lilja (1989) 'ya dayalı bir tasarım yöntemi kullanılmıştır. FDAC, diğer uyarlanabilir şemalara benzer bir yapıya sahiptir, bkz.

Şekil 1. Bununla birlikte, yapı bloklarının içerikleri, diğer birçok uyarlanabilir denetleyicinininkinden farklıdır. Denetleyicinin parametreleri, frekans alanında en küçük kareler problemi çözülerek elde edilir. Tam sipariş parametreleştirilmiş bir süreç modelini tahmin etmek gerekli değildir. Süreç tahmini, bir frekans noktası tahmin edicilerine bölünmüştür. Her tahminci, sürecin Nyquist eğrisi üzerinde bir nokta verir. Her tahmin edicinin girdileri, bant geçiren filtrelili işlem girdileri ve çıktılarıdır. Yaklaşımımız, LaMaire ve ark. (1991) ve Parker ve Bitmead (1987) frekansların ve hesaplamaların seçimi ile ilgili olarak. Frekans alanına dayalı diğer uyarlanabilir yöntemler Kosut (1988) ve Goodwin ve Salgado (1989) 'da verilmiştir.

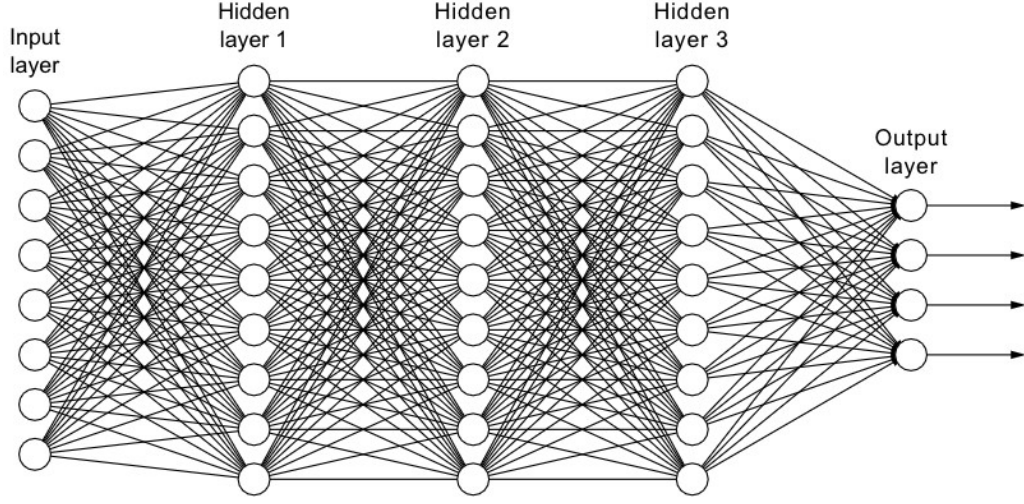


Şekil 2.4. Uyarlanabilir denetleyicinin blok şeması

## 2.7. Yapay Sinir Ağı:

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin en temel özelliği olan öğrenme işlevini yerine getiren bilgisayar tabanlı sistemlerdir. Öğrenme sürecini mevcut örnekler yardımıyla gerçekleştirmektedir. Daha sonra bu ağları bağlantılı işlem öğelerinden (yapay sinir hücreleri) oluşturmaktadır. Her bağlantının kendi ağırlık değeri vardır. Bu, yapay sinir ağının ağırlık değerlerine sahip olduğu ve ağa yayıldığı bilgisidir. Yapay sinir ağları, bilinen diğer hesaplama yöntemlerinden farklıdır. Çevresine uyum sağlayabilir, uyum sağlayabilir, eksik bilgilerle çalışabilir, belirsizlikler altında kararlar alabilir ve hataları

tolere edebilmektedir. Hayatın hemen hemen her alanında bu hesaplama yönteminin başarılı uygulamalarını görmek mümkündür. Tipik sinir ağı şeması şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Tipik Sinir Ağı

Yapay sinir ağlarını birbirine bağlayan bağlantıların değerlerine ağırlık değerleri denir. Proses elemanları birbirine paralel 3 kat halinde monte edilir ve bir ağ oluşturur. Bunlar;

- A) Giriş katmanı
- B) Gizli katmanlar
- C) Çıktı katmanı

Bilgi, giriş katmanından ağa iletilir. Ara katmanlarda işlenir ve oradan çıktı katmanına gönderilir. Çıktı kullanılarak bilgi işlem yapılmadan ağa gelen bilgilerin ağırlık değerleridir. Ağ, girdiler için doğru çıktıları üretebilir. Ağırlıklar doğru değerlere sahip olmalıdır. Doğru ağırlıkları bulma sürecine ağ eğitimi denmektedir. Bu değerler başlangıçta rastgele atanmaktadır. Daha sonra eğitim sırasında her bir numune ağa gösterildiğinde ağırlıklar değiştirilir. Daha sonra ağa başka bir numune sunulur ve tekrar ağırlıklar değiştirilerek en doğru değerler bulunmaya çalışılır. Ağ eğitim setindeki tüm örnekler için doğru çıktıyı üretene kadar bu işlemler tekrarlanır. Bu sağlandıktan sonra test setindeki numuneler ağa gösterilir. Ağ test seti ağındaki örneklere doğru cevaplar eğitilmiş olarak kabul edilir. Ağın ağırlıkları belirlendikten sonra, her birinin ağırlığının ne anlama geldiği bilinmemektedir. Bu nedenle yapay sinir ağları “kara kutu”.

Bireysel ağırlıkların ne anlama geldiği bilinmemekle birlikte, ağ bu ağırlıkları kullanarak girdiler hakkında bir karar vermektedir. Zekanın bu ağırlıklarda depolandığı söylenebilmektedir. Ağ için, doğru yapay sinir ağı modelini seçerek o olay için bir olay öğrenmektedir. Pek çok yapay sinir ağı modeli geliştirilmektedir. Tek ve çok katmanlı olan Sensörler tarafından geliştirilen en yaygın kullanılan modeller LVQ, ART ağları, SOM, Elman ağıdır. Yapay Sinir Ağı (YSA), dinamik süreci modellemek için iyi bir yetenek göstermektedir. Bazılar çalışmalar Levenberg-Marquardt en iyi modeldir. Karmaşık sorunları çözmek için yararlı ve güçlü araçlardır. Karmaşık sorunları çözmek için yararlı ve güçlü araçlardır.

Elde edilen sonuç, yapay sinir ağlarının, gösterge seviyesinin düzensiz olduğu bölgede aşama deşarj ilişkisini modelleyebildiğini, dolayısıyla diğer birçok inşaat mühendisliği alanında yapay sinir ağı kullanılarak elde edilen genel iyileştirmeyi doğruladığını açıkça göstermektedir. Sonuçlar, yapay sinir ağının, evre boşalma ilişkisini tahmin etmek için diğer geleneksel yöntemlerden daha uygun olduğunu göstermektedir. YSA yaklaşımı, modsal tanımlama çalışmalarında problemi çözmek için çok kullanışlı ve doğru bir araç sağlayabilir. Levenberg-Marquardt Algoritması; Quasi-Newton yöntemleri (QNM) gibi, Levenberg-Marquardt algoritması, Hessian matrisini hesaplamak zorunda kalmadan ikinci dereceden eğitim hızına yaklaşmak için tasarlanmıştır. Performans işlevi bir kareler toplamı biçimine sahipse (ileri beslemeli ağların eğitiminde tipik olduğu gibi), bu durumda Hessian matrisi, yaklaşık olarak:

$$H = J^T J \quad (2.1)$$

ve gradyan olarak hesaplanabilir:

$$g = J^T e \quad (2.2)$$

Ağırlıklara ve önyargılara göre ağ hatalarının ilk türevlerini içeren Jacob matrisi ve ağ hatalarının bir vektörüdür. Jacobian matrisi, standart bir geri yayılma tekniği ile hesaplanabilir, bkz. Bu, Hessian matrisini hesaplamaktan çok daha az karmaşıktır. Levenberg-Marquardt algoritması, bu yaklaşımı aşağıdaki Newton benzeri güncellemede Hessian matrisine kullanır.

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (2.3)$$

Skaler  $\mu$  sıfır olduğunda, bu yaklaşık Hessian matrisini kullanan sadece Newton'un yöntemi. Büyük olduğunda, bu küçük adım boyutu ile gradyan inişi haline gelir. Newton'un yöntemi daha hızlı ve minimum hataya yakın daha doğrudur, bu nedenle amaç, Newton'un yöntemine olabildiğince çabuk geçmektir. Böylece,  $\mu$  her başarılı adımdan sonra (performans işlevinde azalma) azaltılır ve yalnızca geçici bir adım performans işlevini artıracaksa artırılır. Bu şekilde, performans işlevi, algoritmanın her yinelemesinde her zaman azaltılmaktadır.

## **2.8. Sinir Ağı, Yenilik Algılama ve Genetik Algoritmalara Dayalı Yöntemler:**

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin biyolojisini taklit etmek için bir metodoloji olarak geliştirildi ve bu da deneyimle öğrenen sistemlerle sonuçlandı. Son zamanlarda, yapısal hasarı tanımlamak için YSA kullanımını genişletilmişti. Masri vd. (2000) sinir ağı yaklaşımına dayalı parametrik olmayan bir yapısal hasar tanımlama yöntemi sunmuştur. Yaklaşım, tanımlama amacıyla bir sinir ağını eğitmek için "sağlıklı" bir sistemden titreşim ölçümlerinin kullanımına dayanmıştı. Daha sonra, yapının sağlığını izlemek ve böylece yapıdaki nispeten hassas bir hasar göstergesi sağlamak için eğitilmiş ağı aynı yapıdan karşılaştırılabilir titreşim ölçümleri verilmişti. Yazarlar, önerilen sinir ağları gibi parametrik olmayan tanımlama yaklaşımlarının etkinliğini savunsa da durumlar ve ilgili titreşim imzaları hakkında önceden bir bilgi olmadığı sürece, bu tür yaklaşımların hasarın yerini belirlemedeki sınırlamalarına da işaret etmişlerdir. Xu vd. (2003), sinir ağı yöntemini kullanarak hasarı tanımlamak için dört aşamalı bir prosedür sunmuştu. Önce sağlıklı yapıdan dinamik yanıt kullanılarak bir sinir ağı öykünücüsü eğitilmişti, ardından yazarların tarafından tahmin edilen dinamik yanıt ile ölçülen karşılıkları arasındaki hatadan hasar tespit edilmiştir. Üçüncü bir adım, değerlendirme indeksinin doğru seçimi için parametrik bir sinir ağı oluşturur ve sonunda bu, hasarı ölçmek için dördüncü adımda kullanılmıştır.

Yenilik tespitine dayalı hasarı tanımlamak için çok çeşitli disiplinlerden teknikler için birleştirici bir çerçeve geliştirilmiştir (Bishop 1994; Worden 1997; Worden ve diğerleri 2002). Yaklaşımın felsefesi, yapının hasarsız durumunu temsil eden özellikleri kullanarak bir "normallik" tanımı oluşturmak ve daha sonra yeni veriler elde edildiğinde "anormallik" veya "yenilik" için test etmişti. Olasılık yoğunluğu tahmini, yapay sinir

ağları, aykırı değer analizi dahil olmak üzere çok sayıda farklı yenilik saptama yöntemi vardır (Worden ve diğerleri, 2000). Yenilik yöntemlerinin geçerliliği Worden ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Manson ve ark. (2003). Worden vd. (2003), metalik bir uçak kanat kutusunun basitleştirilmiş bir modelinden ölçülen iletilebilirlik FRF'lerine dayanan yenilik algılama algoritmalarının deneysel doğrulamasını sunmuştu. Aykırı değer analizi, yoğunluk tahmini ve otomatik ilişkilendirmeli sinir ağı tekniği olmak üzere üç farklı yenilik algılama algoritması dikkate alınmıştır. Kritik bir karşılaştırma, seyrek veri setlerinde kullanıldığında yoğunluk tahmini yaklaşımı hakkında çekinceler göstermesine rağmen, üç yöntemin bir dereceye kadar başarılı olduğu gösterilmiştir.

Manson vd. (2003'a) daha önce incelenen laboratuvar yapısının aksine daha gerçekçi bir yapıya, yani bir Gnat uçağının kanadına aykırı değer analizi yöntemini uyguladı, ardından Manson ve ark. (2003 b) yenilik tespit yöntemini hasar tespitinden hasar lokalizasyonuna genişletmiştir. Sinir ağı yöntemlerinin uygulanmasında, amaç işlevi en aza indirilecek şekilde ağ ağırlıklarının optimum değerlerini bulmak için optimizasyon tekniklerine ihtiyaç vardır. Gradyan tabanlı yöntemle, genetik algoritmalar ve rastgele pertürbasyon yöntemleri gibi bu amaç için kullanılabilen birçok optimizasyon tekniği vardır. Hong ve Xia (2002), hasar öncesi ve sonrası ölçümlerdeki değişiklikleri doğrudan karşılaştıran objektif işlevi en aza indirerek yapısal hasarı tanımlamak için gerçek sayı kodlamalı bir genetik algoritma (GA) uygulamıştır. Frekans değişiklikleri, mod şekil değişiklikleri ve ikisinin kombinasyonu olmak üzere üç farklı kriter dikkate alındı. Önerilen tekniği göstermek için laboratuvarda test edilmiş bir konsol giriş ve bir çerçeve kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, analitik model doğru olmasa bile, hasarlı elemanların genetik algoritma ile tespit edilebileceğini gösterdi. Ayrıca, gerçek kodlu bir GA ile önerilen yöntemin, geleneksel optimizasyon yöntemine göre ışın için daha iyi hasar tespit sonuçları verdiği de gösterilmiştir.

Moslem ve Nafaspour (2002), giriş üyelerindeki hasarın boyutunu belirlemek için bir optimizasyon aracı olarak Steady-State Genetic Algorithms (SSGA) uygulamıştır. Bu yazıda önerilen hasar tanımlama prosedürünü doğrulamak için biri küçük, diğeri nispeten büyük iki kafes giriş yapısı incelenmiştir. Önerilen algoritmanın sistematik olma avantajına sahip olmasına rağmen, ölçüm gürültüsü, model genişletme ve özellikle model

azaltma hataları gibi kaçınılmaz hatalar, olası hasarlı alanların bulunmasında zorluklar ortaya çıkarmıştır.

### **2.9. Yalnızca Çıktı Titreşim Verilerinden Modal Tanımlama:**

Betonundaki donatıyı delaminasyon neden ile, betonu çevresindeki donatıdan ayırır, bu da yapısal mukavemet kaybına neden olur ve yapının hızlı bir şekilde bozulmasını kolaylaştırır. Delaminasyon, yapının hem görünümünü hem de servis edilebilirliğini bozar ve onarımlar çok maliyetli olabilir. Beton altyapı için yıllık korozyonla ilgili bakım ve onarım maliyetlerinin dünya çapında 100 milyar dolara yaklaştığı tahmin edilmektedir. Korozyon ve delaminasyon yapılar için büyük önem taşır ve rutin inceleme gereklidir. Beton delaminasyonunu tespit etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Halihazırda mevcut teknikleri genişletmek, iyileştirmek ve birleştirmek için çabalar sarf edilmiştir. Bu inceleme ve tespit yöntemleri, cihazlarla birlikte profesyonel kişilerin saha sahalarına yerleştirilmesini gerektirir ve çok maliyetli olabilmektedir. Yapısal sağlık izleme sistemlerinin genişletilmesiyle, gerçek köprülere ve binalara artan sayıda gerçek zamanlı izleme sistemi yerleştirilmektedir. Kalıcı olarak monte edilmiş sensörlerden yararlanmak, delaminasyon tespitinde faydalı olabilir. Titreşim sensörleri, delaminasyon algılamasını içeren uzun vadeli izleme uygulamaları için esnek bir şekilde ve yerinde yerleştirilebilir. Çeşitli analitik, sayısal ve deneysel çalışmalar, kompozit yapılarda delaminasyon tespitini titreşim sensörleri ile titreşim tabanlı tanımlama yöntemleriyle yapılan ölçümlerden ele almıştır. Zhou vd. kompozit yapılar için titreşime dayalı modele bağlı delaminasyon tanımlamasının bir incelemesini sağlamıştır.

Valdes ve Soutis, lamine kirişlerde delaminasyonun modal frekanslardaki değişiklikler üzerindeki etkilerini incelemek için deneyler yapmıştır. Ratcliffe ve Bagaria, kompozit bir kirişteki delaminasyonları bulmak için eğrilik modu şekillerini kullanmıştır. Wei vd. model tabanlı sinir ağları kullanılarak çok katmanlı kompozit plakaların delaminasyonunu değerlendirmiştir. Modal özelliklerdeki delamine nedenli değişiklikler tanımlanamayacak kadar küçük olduğunda, küçük hasarları tespit etmek için etkili bir şekilde kullanılan dalgacık yöntemleri dikkate alınmıştır.

Yan ve Yam, kompozit plakalardaki delaminasyonları tespit etmek için dalgacık analizi ile ayrıştırılan dinamik yanıtların enerji dağılımını kullanmıştır ve bu yöntemin

lokalize hasarı tespit edebildiğini bildirmişti. Bu çalışmaların çoğu kirişler gibi basit kompozit yapılar üzerinedir ve plakalar üzerinde çok az çalışma yapılmıştır.

İnşaat mühendisliği beton yapıları için, titreşim sensörleri kullanılarak delaminasyon tespiti üzerine çalışmalar çok nadirdir. Xing vd. inşaat mühendisliği beton plakaları için titreşim ölçümleri kullanarak delaminasyon tespitini sayısal çalışmalarla araştırmıştı. Bu sayısal çalışmada, beton plakaların sonlu eleman modelleri ANSYS kullanılarak modellenmiştir. Modellerin mod karakteristikleri üzerindeki delaminasyon parametrelerinin incelenmesi için modal analizler ve dinamik analizler yapılmıştır. Delaminasyonun hasar göstergeleri olarak modal frekanslardaki ve mod şekillerindeki değişiklikleri kullanmanın etkinliği incelenmiştir.

### **3. GEREÇ VE YÖNTEM:**

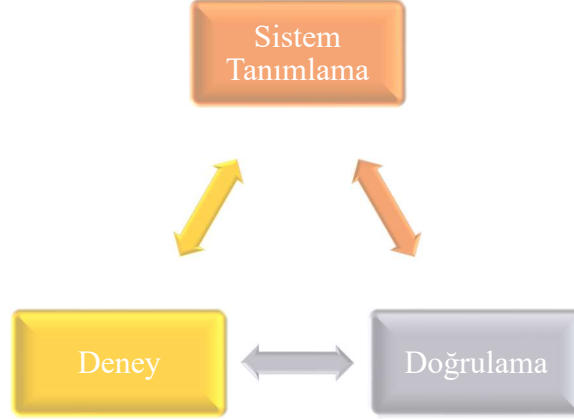
#### **3.1. Sistem Tanımlama:**

System Identification Toolbox, MATLAB fonksiyonları, Simulink blokları ve ölçülen girdi-çıkı verilerinden dinamik sistemlerin matematiksel modellerini oluşturmak için bir uygulama sağlamaktadır. İlk prensiplerden veya spesifikasyonlardan kolayca modellenmeyen dinamik sistem modellerini oluşturmanıza ve kullanmanıza olanak tanır. Sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı aktarım işlevlerini, işlem modellerini ve durum uzay modellerini tanımlamak için zaman etki alanı ve frekans etki alanı girdi-çıkı verilerini kullanabilir. Araç kutusu ayrıca gömülü çevrimiçi parametre tahmini için algoritmalar sağlamaktadır.

Araç kutusu, maksimum olasılık, Tahmin-Hata Minimizasyonu (THM) ve alt uzay sistemi tanımlama gibi tanımlama teknikleri sağlar. Doğrusal olmayan sistem dinamiklerini temsil etmek için, dalgacık ağı, ağaç bölümü ve sigmoid ağ doğrusal olmayanlıklarıyla Hammerstein-Weiner modellerini ve doğrusal olmayan ARX modellerini tahmin edebilirsiniz. Araç kutusu, kullanıcı tanımlı bir modelin parametrelerini tahmin etmek için gri kutu sistem tanımlaması gerçekleştirir. Simulink'te sistem yanıt tahmini ve tesis modellemesi için tanımlanan modeli kullanabilirsiniz. Araç kutusu ayrıca zaman serisi veri modellemeyi ve zaman serisi tahminini de destekler.

Sistem tanımlama genellikle karmaşık bir sorunun bir yönüdür. Sistem tanımlama bağlamının genel bir görünümü Şekil 4 'te gösterilmektedir. Sistem tanımlamanın amacı, verilen verileri tanımlayan bir model veya model seti bulmaktır. Bu genellikle bir modelin parametre değerlerinin tahmin edilmesi anlamına gelmektedir.

Doğrulama, belirlenen modelin eldeki göreve yararlılığını ve uygulanabilirliğini değerlendirme süreci ve kalıntıların sistem tanımlama yönteminin varsayımlarını karşıladığının doğrulanması ve modelin tanımlamada kullanılmayan verilere genellemesinin kontrol edilmesi (çapraz doğrulama) gibi görevleri içermektedir.



Şekil 3.1. Deneysel tasarım, doğrulama ve sistem tanımlama arasındaki ilişkiler

Doğrulama ve tanımlama adımları genellikle yinelemeli etkileşim halindedir. Örneğin, tanımlama tespiti, ölçümlerdeki bozulma ile ilgili ön bilgilere dayalı bir model sağlayabilmektedir. Artık analiz, bu varsayımların yanlış olduğunu ortaya çıkarıp sistemin farklı bir modelle tanımlanmasını motive edebilmektedir. Pratik bir örnek, sözde doğrusal regresyondur. Benzer şekilde, tanımlama ve doğrulama, ölçümler veya deneysel sistemle yinelemeli olarak etkileşime girebilmektedir. Örneğin, tanımlamanın amacı belirli bir model yapısının parametrelerini bulmaksa, bu hedef ölçümlerin seçimine bağlı olarak imkânsız olup farklı bir deney gerektirebilmektedir.

Sistem tanımlama alanı, ölçülen verilerden dinamik sistemlerin matematiksel modellerini oluşturmak için istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Sistem tanımlama ayrıca, bu tür modellerin uydurulması için bilgilendirici verilerin verimli bir şekilde üretilmesi için optimum deney tasarımını ve model azaltmayı da içermektedir. Yaygın bir yaklaşım, sistemin davranışının ve dış etkilerin (sisteme girdiler) ölçümlerinden başlamak ve sistemin içinde gerçekte neler olup bittiğine dair birçok ayrıntıya girmeden aralarındaki matematiksel bir ilişkiyi belirlemeye çalışmaktır; bu yaklaşıma sistem tanımlama denmektedir.

Bu bağlamdaki dinamik bir matematiksel model, bir sistemin veya sürecin zaman veya frekans alanındaki dinamik davranışının matematiksel bir açıklamasıdır. Örnekler şunları içerir:

- Düşen bir cismin yerçekimi etkisi altında hareketi gibi fiziksel süreçler;
- Dış etkilere tepki veren borsalar gibi ekonomik süreçler.

Sistem tanımlamasının birçok olası uygulamasından biri kontrol sistemlerindedir. Örneğin, sistem tanımlama kavramlarının kontrolör tasarımına entegre edildiği ve resmi kontrolör optimallik kanıtlarının temellerini attığı modern veriye dayalı kontrol sistemlerinin temelidir.

### 3.2. Sistem Tanımlama Çalışma Akışı:

i. Sistem tanımlaması için işlem verileri:

- a) Verileri MATLAB çalışma alanına aktarılır.
- b) Verileri Sistem Kimliği uygulamasında veya MATLAB çalışma alanında *iddata* veya *idfrd* nesnesi olarak temsil edilir. Sabit ofsetler ve trendler, gecikme, geri bildirim ve sinyal uyarma seviyelerinin varlığı için verileri analiz etmek için *advic* komutunu da kullanabilir.
- c) Hem zaman hem de frekans alanı davranışını incelemek için verilerin grafiğini çizilir.
- d) Ofsetleri ve doğrusal eğilimleri kaldırarak, eksik değerleri enterpolasyonla, belirli bir frekans aralığını vurgulamak için filtreleyerek veya farklı bir zaman aralığı kullanarak yeniden örnekleme (enterpolasyon veya ondalık) yoluyla verileri ön olarak işlenir.

ii. Doğrusal veya doğrusal olmayan modelleri tanımlanması:

- a) Frekans tepkisi modelleri
- b) Dürtü tepki modelleri
- c) Düşük dereceli transfer fonksiyonları (süreç modelleri)

- d) Giriş-çıkış polinom modelleri
- e) Durum uzayı modelleri
- f) Transfer fonksiyonu modelleri
- g) Doğrusal olmayan kara kutu modelleri
- h) Sıradan fark veya diferansiyel denklemler (gri kutu modelleri)

iii. Modelleri doğrulanması:

İstenen model elde edilmezse, başka bir tanımlama algoritması seçilir. Bazı durumlarda, bir gürültü modeli ekleyerek sonuçları iyileştirilebilir. Daha fazla tahmin yapmadan önce veriler önceden işlenmesi gerekebilir. Örneğin, verilerde çok fazla yüksek frekanslı parazit varsa, modellemeden önce verileri filtrelenmesi veya yeniden yapılması gerekebilir.

iv. İşlem sonrası modeller:

- a) Sürekli ve ayrık zamanlı alanlar arasında dönüşüm yapılır.
- b) Model gösterimleri arasında değiştirilir.
- c) Sayısal model verilerini çıkarılır.
- d) Subreference, modelleri birleştirilir.
- e) Doğrusal olmayan modelleri doğrusallaştırılır.

v. Tanımlanan modelleri için aşağıdakiler kullanılır:

- a) Simülasyon ve Tahmin.
- b) Diğer MathWorks araçları kullanarak tahmini tesis için kontrol tasarımı yapılır.
- c) Tahmini doğrusal modeli Control System Toolbox, Model Predictive Control Toolbox, Robust Control Toolbox veya Simulink yazılımına aktarabilir.

### **3.3. Girdi-Çıktı ve Yalnızca Çıktı:**

Sistem tanımlama teknikleri hem girdi hem de çıktı verilerini kullanabilir (örneğin, öz sistem gerçekleştirme algoritması) veya yalnızca çıktı verilerini (örneğin, frekans alanı ayrışımı) içerebilmektedir. Tipik olarak bir girdi-çıkıtı tekniği daha doğru olur, ancak girdi verileri her zaman mevcut değildir.

### **3.4. Optimal Deney Tasarımı:**

Sistem tanımlamasının kalitesi, sistem mühendisinin kontrolü altındaki girdilerin kalitesine bağlıdır. Bu nedenle, sistem mühendisleri uzun süredir deney tasarımının ilkelerini kullanmaktadır. Son yıllarda mühendisler, maksimum kesinlikte tahmin ediciler sağlayan girdileri belirlemek için optimal deneysel tasarım teorisini giderek daha fazla kullandılar.

### **3.5. Beyaz Kutu Modeli:**

İlk prensiplere dayalı bir beyaz kutu modeli oluşturulabilir, örn. Newton denklemlerinden fiziksel bir süreç için bir model, ancak birçok durumda bu tür modeller aşırı derecede karmaşık olacak ve hatta birçok sistem ve sürecin karmaşık doğası nedeniyle makul sürede elde edilmesi muhtemelen imkânsız olacaktır.

Bu nedenle çok daha yaygın bir yaklaşım, sistemin davranışının ve dış etkilerin (sisteme girdiler) ölçümlerinden başlamak ve sistemin içinde gerçekte neler olup bittiğinin ayrıntılarına girmeden aralarındaki matematiksel bir ilişkiyi belirlemeye çalışmaktır. Bu yaklaşıma sistem tanımlama denir. Sistem tanımlama alanında iki tür model yaygındır:

### **3.6. Gri Kutu Modeli:**

Sistemin içinde olup bitenlerin özellikleri tam olarak bilinmemekle birlikte hem sistem içgörüsüne hem de deneysel verilere dayalı belirli bir model oluşturulmuştur. Ancak bu model, sistem tanımlaması kullanılarak tahmin edilebilen bir dizi bilinmeyen serbest parametreye sahiptir. Bir örnek, mikrobiyal büyüme için Monod doygunluk modelini kullanır. Model, substrat konsantrasyonu ve büyüme hızı arasında basit bir hiperbolik ilişki içerir, ancak bu, molekül türleri veya bağlanma türleri hakkında ayrıntıya girmeden bir substrata bağlanan moleküllerle doğrulanabilir. Gri kutu modelleme, yarı fiziksel modelleme olarak da bilinir.

### 3.7. Kara Kutu Modeli:

Kara kutu modelleme, en önemli ilgisi, modelin belirli bir matematiksel yapısına bakılmaksızın verileri uydurmak olduğunda yararlıdır. Araç kutusu, dinamik sistemleri temsil etmek için geleneksel olarak yararlı olan birkaç doğrusal ve doğrusal olmayan kara kutu modeli yapısı sağlamaktadır. Bu model yapıları, sisteminizdeki dinamikleri ve gürültüyü hesaba katmanız gereken esnekliğe bağlı olarak karmaşıklık açısından farklılık göstermektedir. Kara kutu modelleme kullanıldığında, bu yapılardan birini seçebilir ve ölçülen yanıt verilerine uyacak şekilde parametrelerini hesaplayabilmektedir. Kara kutu modelleme, genellikle çeşitli yapıların parametrelerini tahmin edip sonuçları karşılaştırdığı bir deneme yanılma sürecidir. Genellikle basit bir doğrusal model yapısıyla başlayıp daha karmaşık yapılara doğru ilerlemektedir. En basit doğrusal kara kutu yapıları, yapılandırmak için :

- ❖ Verilen sayıda kutup ve sıfır ile transfer fonksiyonu.
- ❖ En basit girdi-çıkı polinom modeli olan doğrusal ARX modeli
- ❖ Model durumlarının sayısını belirterek tahmin edebileceğiniz durum uzayı modeli

Bu yapılardan bazılarının tahmininde, karmaşıklığı daha da azaltan, açıklamasız tahmin algoritmaları da kullanılır. Model sırasını kullanarak bir model yapısı yapılandırıp model sırasının tanımı, seçildiği model türüne göre değişmektedir. Örneğin, bir transfer fonksiyonu temsili seçildiğinde model sırası kutupların ve sıfırların sayısı ile ilgilidir. Durum uzayı gösterimi için, model sırası durumların sayısına karşılık gelmektedir. Doğrusal ARX ve durum uzay modeli yapıları gibi bazı durumlarda, verilerden model sırasını tahmin edilebilmektedir.

Doğrusal olmayan sistem tanımlama bağlamında Jin ve ark. Önsel bir model yapısını varsayarak ve ardından model parametrelerini tahmin ederek gri kutu modellemeyi tanımlar. Model formu biliniyorsa parametre tahmini nispeten kolaydır, ancak bu nadiren böyledir. Alternatif olarak hem doğrusal hem de oldukça karmaşık doğrusal olmayan modeller için yapı veya model terimleri, NARMAX yöntemleri kullanılarak tanımlanabilir. Bu yaklaşım tamamen esnektir ve algoritmaların bilinen terimlerle hazırlandığı gri kutu modellerinde veya tanımlama prosedürünün bir parçası

olarak model terimlerinin seçildiği tamamen kara kutu modellerinde kullanılabilir. Bu yaklaşımın bir başka avantajı, çalışılan sistem doğrusal ise algoritmaların sadece doğrusal terimleri ve sistem doğrusal değilse doğrusal olmayan terimleri seçecek olmasıdır, bu da tanımlamada büyük bir esneklik sağlar.

### 3.8. Kontrol için Tanımlama:

Kontrol sistemleri uygulamalarında mühendislerin amacı, fiziksel sistemi, geri besleme döngüsünü ve kontrolörü içeren kapalı döngü sistemin iyi bir performansını elde etmektir. Bu performans tipik olarak, deneysel verilerden başlayarak tanımlanması gereken bir sistem modeline dayanarak kontrol yasasının tasarlanmasıyla elde edilir. Model tanımlama prosedürü kontrol amaçlarını hedefliyorsa, asıl önemli olan klasik sistem tanımlama yaklaşımında olduğu gibi verilere uyan mümkün olan en iyi modeli elde etmek değil, kapalı döngü performansı için yeterince tatmin edici bir model elde etmektir. Bu daha yeni yaklaşım, kontrol için tanımlama veya kısaca I4C olarak adlandırılır.

I4C'nin arkasındaki fikir, aşağıdaki basit örnek dikkate alınarak daha iyi anlaşılabilir. Gerçek transfer fonksiyonu  $G_0(s)$  olan bir sistem düşünün:

$$G_0(s) = \frac{1}{s+1} \quad (3.1)$$

ve Tanımlanmış bir Model  $\hat{G}(s)$  :

$$\hat{G}(s) = \frac{1}{s} \quad (3.2)$$

Klasik bir sistem tanımlama perspektifinden,  $\hat{G}(s)$  genel olarak  $G_0$  (lar) için iyi bir model değildir. Aslında,  $\hat{G}(s)$  'nin modülü ve fazı, düşük frekanstaki  $G_0$  (lar) ınkinden farklıdır. Dahası,  $G_0$  (s) asimptotik olarak kararlı bir sistem iken,  $\hat{G}(s)$  basitçe kararlı bir sistemdir. Bununla birlikte,  $\hat{G}(s)$  yine de kontrol amaçları için yeterince iyi bir model olabilir. Aslında, yüksek kazanç K ile tamamen orantılı bir negatif geri besleme kontrolörü uygulamak istendiğinde, referanstan çıkışa kapalı döngü transfer fonksiyonu  $G_0(s)$  içindir.

$$\frac{KG_0(s)}{1+KG_0(s)} = \frac{K}{s+1+K} \quad (3.3)$$

ve  $\hat{G}(s)$  için:

$$\frac{K\hat{G}(s)}{1+K\hat{G}(s)} = \frac{K}{s+K} \quad (3.4)$$

K çok büyük olduğu için,  $1 + K \approx K$ 'ye sahiptir. Bu nedenle, iki kapalı döngü transfer fonksiyonu birbirinden ayırt edilemez. Sonuç olarak,  $\hat{G}(s)$ , eğer böyle bir geribildirim kontrol yasasının uygulanması gerekiyorsa, gerçek sistem için mükemmel şekilde kabul edilebilir bir modeldir. Bir modelin kontrol tasarımı için uygun olup olmadığı sadece tesis / model uyumsuzluğuna değil, aynı zamanda uygulanacak kontrolöre de bağlıdır.

Bu nedenle, I4C çerçevesinde, bir kontrol performansı hedefi göz önüne alındığında, kontrol mühendisi tanımlama aşamasını, model tabanlı kontrolör tarafından gerçek sistemde elde edilen performansın mümkün olduğu kadar yüksek olacak şekilde tasarlaması gerekmektedir. Bazen, sistemin bir modelini açıkça tanımlamadan, ancak doğrudan deneysel veriler üzerinde çalışarak bir kontrolör tasarlamak bile uygundur. Bu, doğrudan veriye dayalı kontrol sistemleri durumudur.

### 3.9. İleri Model:

Yapay Zekada ortak bir anlayış, kontrolörün bir robot için bir sonraki hareketi oluşturması gerektiğidir. Örneğin, robot labirentte başlar ve ardından robotlar ilerlemeye karar verir. Model tahmin kontrolü, bir sonraki eylemi dolaylı olarak belirler. "Model" terimi, doğru eylemi sağlamayan ancak bir senaryoyu simüle eden bir ileri modele atıfta bulunur. İleri model, oyun programlamada kullanılan bir fizik motoruna eşittir. Model bir girdi alır ve sistemin gelecekteki durumunu hesaplar.

Özel ileri modellerin oluşturulmasının nedeni, genel kontrol sürecini bölmeye izin vermesidir. İlk soru, sistemin gelecekteki durumlarının nasıl tahmin edileceğidir. Bu, farklı girdi değerleri için bir zaman aralığı boyunca bir tesisi simüle etmek anlamına gelir. Ve ikinci görev, tesisi hedef duruma getiren bir dizi girdi değeri aramaktır. Buna tahmine dayalı kontrol denir.

İleri model, bir MPC (Model Tahmin Kontrolü) denetleyicisinin en önemli yönüdür. Çözücünün gerçekleştirilebilmesi için önce oluşturulması gerekir. Bir sistemin davranışının ne olduğu belirsizse, anlamlı eylemler aramak mümkün değildir. İleri model

oluşturma iş akışına sistem tanımlama adı verilir. Buradaki fikir, bir sistemi orijinal sistem gibi davranacak bir dizi denklemde resmileştirmektir. Gerçek sistem ile ileri model arasındaki hata ölçülebilmektedir.

İleri model oluşturmak için birçok teknik mevcuttur: adi diferansiyel denklemler Box2d gibi fizik motorlarında kullanılan klasik denklemdir. Daha yeni bir teknik, ileri modeli oluşturmak için bir sinir ağıdır.

### 3.10. Verilerden Model Oluşturma:

#### a) Model yapısı:

Model yapısı, bilinmeyen parametreler içeren girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki matematiksel bir ilişkidir. Model yapılarının örnekleri, ayarlanabilir kutuplu ve sıfırlı transfer fonksiyonları, bilinmeyen sistem matrislerine sahip durum uzayı denklemleri ve doğrusal olmayan parametreleştirilmiş fonksiyonlardır. Aşağıdaki fark denklemi, basit bir model yapısını temsil eder:

$$y(k) + ay(k-1) = bu(k) \quad (3.5)$$

Burada a ve b ayarlanabilir parametrelerdir.

Sistem tanımlama süreci, bir model yapısı seçilmesi ve model parametrelerinin sayısal değerlerini belirlemek için tahmin yöntemlerini uygulanmalıdır. Model yapısını seçmek için aşağıdaki yaklaşımlardan birini kullanabilirsiniz:

- Ölçülen verileri yeniden üretebilen ve olabildiğince basit bir model istenmektedir. Araç kutusunda bulunan çeşitli matematiksel yapıları deneyebilir. Bu modelleme yaklaşımına kara kutu modelleme denir.
- Modelleme için, ilk ilkelerden türetmiş olabileceği, ancak parametrelerinin sayısal değerlerini bilinmediği belirli bir yapı istenmektedir. Model yapısını MATLAB'da bir dizi denklem veya durum-uzay sistemi olarak temsil edebilir ve verilerden parametrelerinin değerlerini tahmin edebilir. Bu yaklaşım gri kutu modelleme olarak bilinmektedir.

**b) Model parametrelerini tahmin edilmesi:**

Sistem Tanımlama yazılımı, model çıktısı ile ölçülen yanıt arasındaki hatayı en aza indirerek model parametrelerini tahmin edilebilir. Doğrusal modelin çıktı ( $y$ ) modeli şu şekilde verilmiştir:

$$y_{model}(t) = Gu(t) \quad (3.6)$$

Burada  $G$ , transfer fonksiyonudur.  $G$ 'yi belirlemek için, araç kutusu model çıktısı  $y_{model}(t)$  ile ölçülen çıktı  $y_{meas}(t)$  arasındaki farkı en aza indir. Minimizasyon kriteri, hatanın ağırlıklı bir normudur,  $v(t)$ , burada:

$$v(t) = y_{meas}(t) - y_{model}(t) \quad (3.7)$$

$y_{model}(t)$  aşağıdakilerden biridir:

- ✓ Modelin benzetilmiş yanıtı  $Gu(t)$  belirli bir girdi için  $u(t)$ .
- ✓ Belirli bir girdi  $u(t)$  için modelin tahmin edilen yanıtı ve çıktının geçmiş ölçümleri ( $y_{meas}(t-1), y_{meas}(t-2), \dots$ )

Buna göre,  $v(t)$  hatası simülasyon hatası veya tahmin hatası olarak adlandırılır. Tahmin algoritmaları, bu hatanın normu mümkün olduğu kadar küçük olacak şekilde  $G$  model yapısındaki parametreleri ayarlar.

**c) Parametre tahmin algoritmasını yapılandırın:**

Tahmin algoritmasını şu şekilde yapılandırabilir:

▪ Küçültme kriterini, örneğin, daha düşük frekanslara daha fazla vurgu yapmak ve daha yüksek frekanslı gürültü katkılarının önemini azaltmak için tahmini bir frekans aralığında odaklayacak şekilde yapılandırılır. Kriteri, model için simülasyon veya tahmin gibi amaçlanan uygulama ihtiyaçlarını hedefleyecek şekilde de yapılandırabilir.

▪ Yinelemeli tahmin algoritmaları için optimizasyon seçeneklerinin belirtilmesi.

Bu araç kutusundaki tahmin algoritmalarının çoğu yinelemelidir. Optimizasyon yöntemi ve maksimum yineleme sayısı gibi seçenekleri belirterek yinelemeli bir tahmin algoritması yapılandırabilir.

### **3.11. Doğrusal Model Tanımlama:**

Doğrusal model, sistem dinamikleri tamamen yakalamak için yeterli doğrusal model tanımlamasını kullanılmaktadır. Doğrusal modelleri Sistem Tanımlama uygulamasında veya komut satırında tanımlayabilmektedir. Sistem Tanımlama Araç Kutusu, dört genel doğrusal model türü oluşturmaya ve tahmin etmeye olanak sağlamaktadır:

- a) Parametrik modeller - Transfer fonksiyonu modelleri, durum uzayı modelleri, polinom modelleri ve süreç modelleri gibi yapılarda parametreleri tahmin edebilmektedir.
- b) Frekans yanıt modelleri - Spektral analizi kullanarak spektral modelleri tahmin edebilmektedir.
- c) Korelasyon modelleri - Korelasyon analizini kullanarak dürtü yanıt modellerinin parametrik olmayan tahminlerini gerçekleştirmektedir.
- d) Doğrusal gri kutu modelleri - Önceden edindiği veya fiziksel ilkelerden çıkarabileceği sistem bilgilerini dahil ederek rastgele sıradan diferansiyel veya fark denklemlerinin katsayılarını tahmin edebilmektedir.

### **3.12. Doğrusal Olmayan Model Tanımlama:**

Doğrusal bir model sistem dinamikleri tam olarak elde edilmediğinde doğrusal olmayan model tanımlamasını kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan modelleri Sistem Tanımlama uygulamasında veya komut satırında tanımlayabilmektedir.

Sistem Tanımlama Araç Kutusu, doğrusal olmayan üç model yapısının oluşturulmasını ve tahmin edilmesini sağlamaktadır:

- a) Doğrusal olmayan ARX modelleri - Dalgacık ağları, ağaç bölümlene ve sigmoid ağlar gibi dinamik doğrusal olmayan tahmin edicileri kullanarak sistemdeki doğrusal olmayanlıkları temsil etmektedir.
- b) Hammerstein-Wiener modelleri - Doğrusal olmayan bir sistemde statik doğrusal olmayanlıkları tahmin etmektedir.

- c) Doğrusal olmayan gri kutu modelleri - Doğrusal olmayan sistemi, bilinmeyen parametrelerle sıradan diferansiyel veya fark denklemleri (ODE'ler) kullanarak temsil edebilmektedir.

Doğrusal olmayan model tanımlama, tekdüze örneklenmiş zaman etki alanı verilerini gerektirmektedir. Verilerin bir veya daha fazla giriş ve çıkış kanalı olabilmektedir. Doğrusal olmayan ARX ve doğrusal olmayan gri kutu modellerini kullanarak zaman serisi verilerini de modelleyebilmektedir. Model çıktısını komut satırında, uygulamada veya Simulink'te simüle etmek ve tahmin etmek için tanımlanan modelleri kullanabilmektedir. Control System Toolbox'u kullanarak, modeli doğrusallaştırıp onu kontrol sistemi tasarımı için kullanabilmektedir.

### 3.13. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Modeller:

#### A. Frekans tepki modeli:

Bir frekans tepkisi modeli, bir dizi frekans değeri üzerinden değerlendirilen doğrusal bir sistemin frekans tepkisidir. Model, frekans yanıtını, örnekleme süresini ve giriş-çıkış kanalı bilgilerini depolayan bir *idfrd* model nesnesiyle temsil edilmektedir. Frekans yanıtı işlevi, bir sistemin sinüzoidal girişlere kararlı durum yanıtını tanımlanmaktadır. Doğrusal bir sistem için, belirli bir frekansın sinüzoidal girişi, aynı frekansta ancak farklı bir genlik ve faza sahip bir sinüzoid olan bir çıktıyla sonuçlanmaktadır.

Frekans tepkisi işlevi, genlik değişimini ve faz kaymasını frekansın bir işlevi olarak tanımlanmaktadır. Frekans yanıtı modellerini tahmin edebilir ve yanıtları, genlik değişimini ve faz kaymasını sinüzoid frekansın bir işlevi olarak gösteren bir **Bode** grafiği üzerinde görselleştirebilmektedir. T zaman aralığı ile örneklenen ayrık zamanlı bir sistem için, transfer fonksiyonu  $G(z)$ ,  $U(z)$  girişinin ve  $Y(z)$  çıkışının Z-dönüşümlerini ilişkilendirilir:

$$Y(z) = G(z)U(z) + H(z)E(z) \quad (3.8)$$

Frekans tepkisi, bir frekans vektörü,  $w$  için birim çember ( $z = \exp^{iwT}$ ) üzerinde değerlendirilen transfer fonksiyonunun,  $G(z)$  değeridir.  $H(z)$ , gürültü aktarım fonksiyonunu temsil eder ve  $E(z)$ ,  $\lambda$  varyansına sahip toplamsal bozulma  $e(t)$  'nin Z-

dönüşümüdür. G değerleri, *idfrd* nesnesinin ResponseData özelliğinde saklanıp gürültü spektrumu, *SpectrumData* özelliğinde depolanmaktadır.

Gürültü spektrumu şu şekilde tanımlanır:

$$\Phi_v(\omega) = \lambda T |H(\exp^{i\omega T})|^2 \quad (3.9)$$

Bir MIMO frekans yanıt modeli, sistemdeki her bir giriş-çıkış çiftine karşılık gelen frekans yanıtlarını içerir. Örneğin, iki girişli, iki çıkışlı bir model için:

$$Y_1(z) = G_{11}(z)U_1(z) + G_{12}(z)U_2(z) + H_1(z)E_1(z) \quad (3.10)$$

$$Y_2(z) = G_{21}(z)U_1(z) + G_{22}(z)U_2(z) + H_2(z)E_2(z) \quad (3.11)$$

Nerede,  $G_{ij}$ ,  $i^{th}$  çıktı ile  $j^{th}$  girdi arasındaki transfer fonksiyonudur.  $H_1(z)$  ve  $H_2(z)$ , iki çıkış için gürültü aktarım fonksiyonlarını temsil eder.  $E_1(z)$  ve  $E_2(z)$ , iki model çıktısında sırasıyla  $e_1(t)$  ve  $e_2(t)$  toplamsal bozuklukların Z-dönüşümleridir. Sürekli zamanlı frekans tepkisi için benzer ifadeler geçerlidir. Denklemler Laplace alanında temsil edilmektedir.

### B. Zaman-alan korelasyon analizi:

Zaman alanı korelasyon analizi, verilerden bir sonlu dürtü yanıtı (FIR) modeli olarak dinamik sistemlerin dürtü yanıtının parametrik olmayan tahminini ifade eder. Tahmini model, transfer fonksiyonu modeli nesnesi (*idtf*) olarak saklanır. Korelasyon analizi doğrusal bir sistemi varsayar ve belirli bir model yapısı gerektirmez.

Darbe tepkisi, giriş bir dürtü olduğunda ortaya çıkan ve ayırık bir model için aşağıdaki tanıma sahip olan çıkış sinyalidir:

$$u(t) = 0 \quad t > 0 \quad (3.12)$$

$$u(t) = 1 \quad t = 0 \quad (3.13)$$

Bir  $u(t)$  girişine verilen yanıt, aşağıdaki gibi, dürtü yanıtının evrişimine eşittir:

$$y(t) = \int_0^t h(t-z).u(z)dz \quad (3.14)$$

➤ Korelasyon analizi tarafından desteklenen veriler:

Aşağıdaki özelliklere sahip verilerden dürtü tepki modellerini tahmin edebilirsiniz:

- a) Gerçek veya karmaşık veriler.
- b) Tek veya çoklu çıkış verileri.
- c) Sıfır olmayan örnekleme süreli zaman veya frekans etki alanı verileri.

Zaman alanı verileri düzenli olarak örneklenmelidir. Korelasyon analizi için zaman serisi verilerini kullanmamaktadır.

### C. İşlem modeli:

Süreç modelleri, birçok endüstride sistem dinamiklerini tanımlamak için popülerdir ve çeşitli üretim ortamları için geçerlidir. Bu modellerin avantajları basit olmaları, taşıma gecikme tahminini desteklemeleri ve model katsayılarının kutuplar ve sıfırlar olarak kolay bir şekilde yorumlanmasıdır. Kutup sayısını değiştirerek, bir entegratör ekleyerek veya bir zaman gecikmesi veya sıfır ekleyerek veya kaldırarak farklı model yapıları oluşturabilmektedir.

Birinci, ikinci veya üçüncü dereceden bir model belirleyip kutuplar gerçek veya karmaşık (düşük sönümlü modlar) olabilmektedir. Örneğin, aşağıdaki model yapısı, K'nın statik kazanç,  $T_{p1}$ 'in bir zaman sabiti ve  $T_d$ 'nin girdi-çıkış gecikmesi olduğu birinci dereceden sürekli zamanlı bir süreç modelidir:

$$G(s) = \frac{K_p}{1+sT_{p1}} e^{-sT_d} \quad (3.15)$$

#### D. Polinom modelleri:

Bir polinom modeli, aşağıdaki denklemi kullanarak girdi,  $u(t)$ , çıktı  $y(t)$  ve gürültü  $e(t)$  arasındaki ilişkiyi ifade etmek için genelleştirilmiş bir transfer fonksiyonları kavramı kullanır:

$$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{nu} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (3.16)$$

$A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  ve  $F$  değişkenleri,  $q^{-1}$  zaman kaydırma operatörü ile ifade edilen polinomlardır.  $u_i$   $i^{th}$  giriş,  $nu$  toplam giriş sayısı ve  $nk_i$ , taşıma gecikmesini karakterize eden  $i^{th}$  giriş gecikmesidir. Beyaz gürültü  $e(t)$  varyansının  $\lambda$  olduğu varsayılmaktadır.

Pratikte, tüm polinomlar aynı anda aktif değildir. Çoğunlukla ARX, ARMAX, Output-Error ve Box-Jenkins gibi daha basit formlar kullanılır. Genel modelin şu biçimi alması için gürültü kaynağına bir entegratör ekleme seçeneğiniz de vardır:

$$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{nu} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} \frac{1}{1-q^{-1}} e(t) \quad (3.17)$$

Tahmin için, model sırasını, seçildiği yapıya dahil edildiği her polinom için katsayıların sayısını temsil eden bir tamsayılar kümesi olarak gösterilmektedir -  $A$  için  $na$ ,  $B$  için  $nb$ ,  $C$  için  $nc$ ,  $D$  için  $nd$  ve  $F$  için  $nf$ . Ayrıca, çıkış girdiye yanıt vermeden önce örnek sayısı ile verilen giriş gecikmesine karşılık gelen örnek sayısını - ölü zaman - belirlenmelidir. Payda polinomlarındaki katsayıların sayısı kutup sayısına eşit ve pay polinomlarındaki katsayıların sayısı sıfırların sayısı artı 1'e eşittir.  $u(t)$  ile  $y(t)$  arasındaki dinamikler bir gecikme içerdiğinde  $nk$  örnekleri, sonra  $B$ 'nin ilk  $nk$  katsayıları sıfırdır.

#### E. Eigensystem gerçekleştirme algoritması (ERA):

Rasgele giriş sinyalleri için Genel Gerçekleştirme Algoritmasının (GRA) arkasındaki ana kavramları daha iyi sunmak için, önce darbe giriş sinyali için Eigensystem Gerçekleştirme Algoritması (ERA) bu bölümde kısaca gözden geçirilmiştir. ERA, genellikle gerçek dinamik sistemlerin giriş uyarımını karakterize eden keyfi giriş sinyalleri için genelleştirilmiştir (örneğin, bir köprünün veya bina yapısının sismik uyarımı). Notasyonları basitleştirmek için, ayrık zamanlı dürtü yanıtı ölçümlerinin  $g(k\Delta T)$  (birim darbe girişi için Markov parametreleri olarak da adlandırılır) vektör değerli olduğu varsayılır (yani, tek giriş, çoklu çıkış sistemi). ERA'nın formülasyonu, ana kavramlara

odaklanmak için burada kaçımılan çoklu girdi - çoklu çıktı sistemlerine genelleştirilebilmiştir.

$$x((k + 1)\Delta t) = Ax(k\Delta T) + Bu(k\Delta T) \quad (3.18)$$

$$y(k\Delta T) = Cx(k\Delta T) + Du(k\Delta T)$$

Denklem. (3.18) , giriş sinyalinin kaynaklanan çıkış açıkça şu şekilde yazılabilir:

$$y(k) = Du(k) + \sum_{i=1}^{\infty} G(i)u(k - i), \quad G(i) = CA^{i-1}B \quad (3.19)$$

Burada  $G(i)$  Markov parametrelerini ifade ettiğinde,  $(T)$  notasyonel kısalık uğruna  $(\Delta T = 1)$  olarak normalize edilmiştir ve  $k, t = k (k = 0, 1, \dots, 2N)$ .  $K = 0, 1, 2, \dots, 2N$  için ayrık çıkış ölçümleri  $y(k)$  ve muhtemelen giriş ölçümleri  $u(k)$  göz önüne alındığında, amaç uygun boyutu  $n$  ( Denklemdeki  $x(k)$  durum vektörünün McMillan derecesi). (3.18) (yani, modelin gerçekleştirilme sırası) ve dikkate alınan dinamik sistemin ayrık bir zaman durum-uzay gerçekleşmesini  $(A, B, C, D)$  tahmin edilir. Şu şekilde tanımlanan birim darbe girişinin özel durumu için:

$$u(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Çıktı  $y(k)$ , ayrık zaman sisteminin Markov parametrelerine,  $G(k)$  karşılık gelir. Çıktı  $y(k)$ , ayrık zaman sisteminin Markov parametrelerine,  $G(k)$  karşılık gelir. Gerçekleştirme algoritmasını dürtü yanıtı ölçümleri temelinde kurmak için,  $g(k) = y(k) (k = 0, 1, 2, \dots, 2N)$ , önce bir  $(m \times N) \times N$  Hankel matrisi  $H$  aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

$$H = \begin{bmatrix} (1) & g(2) & \dots & g(N) \\ g(2) & g(3) & \dots & g(N+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(N) & g(N+1) & \dots & g(2N-1) \end{bmatrix}_{(m \times N) \times N} \quad (3.21)$$

Ve aynı boyutta  $H$ 'ye karşılık gelen kaydırılmış bir Hankel matrisi şu şekilde tanımlanır:

$$H = \begin{bmatrix} g(2) & g(3) & \dots & g(N+1) \\ g(3) & g(4) & \dots & g(N+2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(N+1) & g(N+2) & \dots & g(2N) \end{bmatrix}_{(m \times N) \times N} \quad (3.22)$$

Denklem  $g(k)$ 'nin tarafından üretilen gürültüsüz dürtü yanıt ölçümleri olması durumunda. (3.18) , aşağıdaki gibidir:

$$g(k) = G(k) = \begin{cases} D, & \text{için } k = 0 \\ CA^{k-1}B, & \text{için } k \geq 1 \end{cases} \quad (3.23)$$

Denklem 'deki B, durum uzayı modelinin girdi matrisidir. (3.18). Hankel matrisi H, Denklem. (3.22) şu şekilde ifade edilebilir:

$$H = H_1 H_2 \quad (3.24)$$

H1 ve H2'nin sırasıyla gözlenebilirlik ve kontrol edilebilirlik matrisleri olduğu,

$$H_1 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad H_2 = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{N-1}B]_{n \times N} \quad (3.25)$$

Ayrık zaman durum uzayı modeli için, Denk. (3.18), sıra (veya McMillan derecesi)  $n$ , Cayley Hamilton teoremi aracılığıyla hem  $H1$  hem de  $H2$ 'nin sırasıyla tam sütun rank  $n$  ve tam satır rank  $n$ 'ye sahip olduğu gösterilebilmektedir. Sonuç olarak, Hankel matrisi  $H$ ,  $n$  derecesine sahiptir. Ayrıca, tanımından, kaydırılmış Hankel matrisinin ( $\bar{H}$ ) aşağıdaki kaydırma özelliğine sahip olduğu gösterilebilir:

$$\bar{H} = H_1 A H_2 \quad (3.26)$$

$H_1$  ve  $H_2$ , Denklem (3.21) 'de tanımlandığı gibidir. Hem  $H_1$  hem de  $H_2$  sırasıyla tam sütun ve satır sırası  $n$ 'ye sahip olduğundan, bir sol ters ( $H_1^{++}$ ) ve bir sağ ters ( $H_2^{++}$ ) vardır, öyle ki:

$$H_1^{++} H_1 = I_{n \times n} \quad \text{ve} \quad H_2 H_2^{++} = I_{n \times n} \quad (3.27)$$

Böylece (3.26) Denklemden,

$$A = H_1^{++} \bar{H} H_2^{++} \quad (3.28)$$

(3.28) denklemdaki sol ve sağ tersler şu şekilde elde edilir:

$$H_1^{++} = [H_1^T H_1]^{-1} H_1^T \quad (3.29)$$

$$H_2^{++} = H_2^T [H_2 H_2^T]^{-1}$$

Tanımlama işlemi sırasında,  $(H)$  'nun  $(H_1)$  ve  $(H_2)$ ' ye ayrışması Denklem. (3.26) tekil değer ayrışımı (SVD) yoluyla gerçekleştirilebilir,  $H = U\Sigma V^T$ , burada hem  $U$  hem de  $V$  ortonormal matrislerdir ve  $(\Sigma)$  ana köşegende azalan büyüklükte sıralanan (negatif olmayan) tekil değerlere sahip diyagonal bir matristir. SVD, gürültüsüz ölçümler için  $(\Sigma)$  cinsinden sıfır olmayan diyagonal elemanların (tekil değerler) sayısı ile  $H$ 'nin sıralaması verildiğinden,  $H$ 'nin sıralaması (Vandewalle ve de Moor 1991) hakkında bilgi sağlamaktadır.  $H$ 'nin derecesinin  $n$ 'den önemli ölçüde daha büyük olması durumunda (ölçüm gürültüsünün varlığı nedeniyle), sistemin  $n$  sırasına (veya Hankel matrisi  $H$ 'nin etkin derecesine) ilişkin bir karar verilebilmektedir. Bu durumda, SVD,  $H$  matrisinin büyük ve küçük tekil değerlerinin ayrılması yoluyla, yüksek dereceli Hankel matrisi  $H$ 'yi daha düşük sıralı ( $n$ ) bir matrise yaklaştırmaya izin vermektedir. Hankel matrisinin düşük sıralı bir ayrışımını hesaplamak için SVD kullanımı Gerçekleştirme yönteminde esastır ve klasik Kung'un gerçekleştirme algoritmasında (Kung 1978) ve ERA'da (Juang ve Pappa 1985) kullanılmıştır.

Hankel matrisi  $H$ 'nin SVD'si şu şekilde ifade edilebilir:

$$H = U\Sigma V^T = [U_n \quad U_s] \begin{bmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & \Sigma_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^T \\ V_s^T \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$(\Sigma)$  'nun iki köşegen matrisine  $(\Sigma_n)$  ve  $(\Sigma_s)$  bölündüğü, burada  $(\Sigma_s)$  ve  $(\Sigma_n)$   $(\Sigma)$  'nun  $s$  küçük olan kısmını (gürültüsüz ölçümler durumunda sıfır) gösterir. Sırasıyla tekil değerler ve  $(\Sigma)$  'nun  $n$  büyük (gürültüsüz ölçümler durumunda sıfır olmayan) tekil değerleri olan kısmıdır. Yukarıda daha önce bahsedildiği gibi, indirgenmiş dereceli Hankel matrisinin  $n$  düzeyinin uygun bir değeri hakkında bir karar, tekil değerlerin grafiğini çizerek yapılabilmektedir.

Denklem (3.30) 'daki bölümlenmiş SVD kullanılarak, yüksek dereceli Hankel matrisi  $H$ , aşağıdakilerle aynı boyutta bir indirgenmiş  $n$  aşama matrisi  $H_n$  ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir:

$$H_n = U_n \Sigma_n V_n^T \quad (3.31)$$

Bu,  $\|\dots\|_2$  bir matrisin indüklenmiş iki normlu veya maksimum tekil değerini belirtirken  $\|H - H_n\|_2$ 'yi minimize ettiği gösterilebilir. Yukarıdaki  $n$  derece ayrışımına dayanarak, Denklemdeki  $H_1$  ve  $H_2$  matrisleri. (3.20) şu şekilde tahmin edilebilir:

$$H_1 = U_n \Sigma_n^{1/2} \quad (3.32)$$

$$H_2 = \Sigma_n^{1/2} V_n^T$$

sol ters ( $H_1^{++}$ ) ve sağ ters ( $H_2^{++}$ ) ifadeleri aşağıdakileri basitleştirir:

$$H_1^{++} = \Sigma_n^{-1/2} U_n^T \quad (3.33)$$

$$H_2^{++} = V_n \Sigma_n^{-1/2}$$

Denklemlerdeki sonuçlardan. (3.31) ila (3.33) ve Denklemler kullanarak. (3.23), (3.25) ve (3.28) , Denklem 'deki ayrık zaman modelinin durum uzay matrislerini izler. (3.18) tarafından verilir:

$$D = g(0), C = H_1(1:m, :), B = H_2(:, 1) \text{ ve } A = H_1^{++} \bar{H} H_2^{++} \quad (3.34)$$

Burada,  $(1:m, :)$  ve  $(:, 1)$  sırasıyla bir matrisin ilk  $m$  satırlarını ve ilk sütununu belirtir. ERA'nın serbest titreşim yanıt verilerine de kolayca uygulanabileceği unutulmamalıdır. Bu durumda, Hankel matrisi, serbest titreşim verileri [yani, Hankel matrisinin ilk ögesi olarak  $y(0)$ ] kullanılarak oluşturulur ve tanımlanan girdi matrisi (B), ilgili sıfır olmayan başlangıç durumunu ( $x_0$ ) temsil eder. Doğrusal dönüşüm yoluyla fiziksel durumdaki ( $\bar{x}_0$ ) ilk düğüm yer değiştirmeleri ve hızlarına ( $\bar{x}_0 = T x_0$ ).

## F. Genel gerçekleştirme algoritması (GRA):

Önceki bölümde tartışıldığı gibi ERA, Hankel matrisini oluşturmak için bir darbe giriş sinyalini veya serbest titreşim yanıtını varsayılmaktadır. Birçok pratik durumda, dinamik uyarma, sınırlı bir süre boyunca veya sürekli olarak hareket eder ve yapının zorunlu titreşim sırasında dinamik yanıtı, sistem dinamikleri hakkında değerli bilgiler içermektedir. Maalesef ERA bu bilgileri doğrudan birleştiremez. Bu bölümün amacı, ERA'yı rastgele uyarma sinyallerini barındıracak şekilde genişletmektir.

ERA, genel uyarma sinyallerine doğrudan uygulanamasa da Markov parametrelerinin tahminleri ayrı olarak elde edilebilir ve ERA'ya beslenebilir. Böyle bir tahmin, (i) korelasyon analizi gibi parametrik olmayan tahmin yöntemleri, örneğin James ve ark. (1993), (ii) bir Sonlu Dürtü Tepkisi (FIR) modelinin tahmini, örneğin, Oppenheim ve Schafer (1989), (iii) bir ampirik transfer fonksiyonu tahmininin ters Fourier dönüşümü, örneğin, Ljung (1999) veya (iv) dalgacık dönüşümü, örneğin, Alvin et al. (2003). Ne yazık ki, Markov parametrelerinin doğru tahmini için, bu yöntemler bir geniş bant uyarma sinyali  $u(k)$  gerektirir. Dar bantlı bir uyarma, Markov parametrelerinin yanlı ve gürültülü (büyük varyans) tahminine yol açacak ve bu da daha sonraki ERA uygulamasının sonuçlarını doğru olarak elde edilmemiştir. Phan ve diğ. (1992). Bu güçlü bir yöntem olmasına rağmen, Markov parametrelerini hesaplamak için kullanılan en küçük kareler prosedüründe nispeten uzun girdi-çıkı verisi gerektirir (Lus ve diğerleri 2002). Aşağıda sunulan yöntem, mevcut (kısa süreli) bir girdi-çıkı veri dizisine dayalı olarak yapının dinamik özelliklerini tahmin etmeyi amaçlamaktadır.

GRA'nın arkasındaki ana fikri göstermek için, Denklemden verilen ayrık zamanlı girdi-çıkı ilişkisini düşünün. (3.19) aşağıdaki Hankel matris tabanlı gösterimde yeniden yazılabilir:

$$Y = HU + E \quad (3.35)$$

Burada  $H$ , kesiktir ( $i < N$  olan ilk  $i$  blok satırları) Hankel matrisi Denklem. (3.26) ve:

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(N) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(N+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y(i) & y(i+1) & \dots & y(i+N-1) \end{bmatrix}_{(m \times i) \times N}$$

$$U = \begin{bmatrix} u(0) & u(1) & \dots & u(N-1) \\ 0 & u(0) & \dots & u(N-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & u(0) \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (3.36)$$

$$E = \begin{bmatrix} g(0)u(1) & g(0)u(2) & \dots & g(0)u(N) \\ g(0)u(2) + g(1)u(1) & g(0)u(3) + g(1)u(2) & \dots & g(0)u(N+1) + g(1)u(N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{l=0}^{i-1} g(l)u(i-l) & \sum_{l=0}^{i-1} g(l)u(i-l+1) & \dots & \sum_{l=0}^{i-1} g(l)u(i+N-l-1) \end{bmatrix}_{(m \times i) \times N}$$

Yukarıdaki denklemde,  $H$ ,  $g(k)$  dürtü yanıt katsayılarının geleneksel Hankel matrisidir ve  $Y$ , giriş  $u(k)$  nedeniyle ölçülen çıktı verilerinden oluşan bir Hankel matrisidir. Giriş verileri,  $u(0) \neq 0$  olması koşuluyla tekil olmayan  $N \times N$  kare matrisinde  $U$  saklanmaktadır. Denklemlerden gözlemlenir. (3.35) ve (3.36) bu matris  $E$ , giriş-çıkış verilerinden tahmin edilebilen karşılık gelen Markov parametreleri tarafından ağırlıklandırılan giriş sinyallerinin toplamı olarak tanımlanan terimler içermektedir. Bunu göstermek için, deney sırasında sıfır olmayan giriş sinyalinin başlangıcına karşılık gelen girdi ölçümünün  $u(0)$ , genellik kaybı olmaksızın  $u(0) = 1$ 'e normalleştirileceğini düşünüp bu, formülasyonu büyük ölçüde basitleştirir ve  $k < 0$  için  $u(k) = 0$  ile,  $g(l)$  aşağıdaki gibi girdi-çıkış verilerinden özyinelemeli olarak hesaplanabilir:

$$g(l) = y(l) - \sum_{k=0}^{l-1} g(k)u(l-k), \quad g(0) = y(0) \quad (3.37)$$

eşdeğer olan:

$$G_N = Y_N U^{-1} \quad (3.38)$$

Denklemde  $U$  verildiğinde. (3.36),  $u(0) = 1$  ve:

$$Y_N = [y(0) \ y(1) \ \dots \ y(N-1)]_{m \times N} \quad \text{ve} \quad G_N = [g(0) \ g(1) \ \dots \ g(N-1)]_{m \times N} \quad (3.39)$$

Matris  $U$ , bir determinanı olan bir üst üçgen matris olmasına rağmen, bu matris, özellikle çok sayıda  $N$  veri noktası için kötü koşullandırılabilir.

Sayısal olarak, Denklem. (3.38) aşağıdaki gibi yazılırsa:

$$G_N = Y_N U^{++} \quad (3.40)$$

Burada ( $U^{++}$ ), bu matrisin hesaplanmasında dikkate alınan tekil değerlere toleransla  $U$ 'nun Moore-Penrose sözde tersidir (Noble ve Daniel, 1988). Dürtü yanıtı tahmininin (veya Markov parametre tahminlerinin), Denk. (3.40). Observer / Kalman filtre tanımlama (Phan ve diğerleri 1991) gibi bu yöntemlerden bazıları, başlangıç koşullarının bilinmesine gerek kalmadan Markov parametrelerini tahmin etmek için kullanılabilir. Dürtü tepkisi tahminleri daha sonra şu şekilde hesaplanabilen matris  $E$ 'nin elemanlarını hesaplamak için kullanılır:

$$E(i, k) = \sum_{l=0}^{i-1} G_N(l+1)u(k+i-l-1) \quad (3.41)$$

Burada  $E(i, k)$   $E$  matrisinin ( $i^{th}$ ) Blok satırının ( $k^{th}$ ) Sütununu ve  $G_N(l+1)$ , Denklemde verilen  $G_N$  matrisinin ( $l+1$ )<sup>th</sup> sütunu (3.40). Gürültülü ölçümler durumunda  $Y_N, G_N(l)$ 'nin varyansı  $l$  ile artmaktadır. Denklemden görülebilir. (3.41) matris  $E$ 'nin ardışık blok satırlarını hesaplamak için  $G_N(l)$ 'deki  $l$ 'nin artan değerlerine ihtiyaç vardır.  $G_N(l)$  dürtü yanıtı tahminlerinin artan varyansının ( $l$ 'nin bir fonksiyonu olarak) etkilerini azaltmak için,  $(m \times i) \times N$  boyutundaki  $E$  matrisinin blok satırlarının sınırlı sayıda  $i$  ( $n \leq i < N$ ) kullanılır. Öyle ki  $G_N(i)$  oldukça küçük bir varyansa sahiptir. Önceki açıklamada,  $N$ , toplam veri noktası sayısını eksi  $i$  olarak ifade ediyordu ve  $n$ , tahmin edilecek modelin beklenen sırasını ifade ediyordu.  $R = Y - E = HU$ 'nun ağırlıklı Hankel matrisi olarak tanımlanması,  $U$ 'nun tam sıra özelliğinden,  $\text{sıra}(H) = \text{sıra}(R)$  şeklindedir. Gürültüsüz ölçümler durumunda,  $\text{rank}(R)$ , belirlenecek sistemin tam sırasına eşittir.

GRA, sistemin modal parametrelerinin elde edilebildiği ağırlıklı Hankel matrisine ( $R$ ) dayalı olarak sistemin durum-uzayı gerçekleştirilmesine izin vermektedir. Yukarıdakine alternatif olarak,  $H$  matrisi ( $H = RU^{-1}$  veya  $H = RU^{++}$ ) aracılığıyla hesaplanabilir, ancak bu, muhtemelen kötü koşullu  $U$  matrisinin ek bir tersini (veya sözde tersini) gerektirir ve bu, yüksek sütun girişlerinin büyük varyanslarına neden olmaktadır. GRA'nın geliştirilmesine devam etmek için, SVD aracılığıyla daha düşük bir ayrıştırma  $R'$ 'ye şu şekilde uygulanır:

$$R = U\Sigma V^T = [U_n \quad U_s] \begin{bmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & \Sigma_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^T \\ V_s^T \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Eşitlik benzer (3.30) Hankel matrisi  $H$  için Bu SVD ayrışımını kullanarak, matris  $R$ , aşağıdakilerle aynı boyutlara sahip bir sıra  $n$  matrisi  $R_n$  ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir:

$$R_n = U_n \Sigma_n V_n^T \quad (3.43)$$

En aza indirmek için gösterilebilir  $\|R - R_n\|_2$ . Bu nedenle,  $R_n$  şu şekilde çarpanlara ayrılabilir:

$$R_n = R_1 R_2 \quad (3.44)$$

içinde:

$$R_1 = U_n \Sigma_n^{1/2} \quad (3.45)$$

$$R_2 = \Sigma_n^{1/2} V_n^T$$

Denklemdaki Hankel matrisi  $H$ 'ye benzer. (3.26) matris  $R$  kaydırma özelliğine sahiptir:

$$\bar{R} = R_1 A R_2 \quad (3.46)$$

Burada  $\bar{R} = \bar{Y} - \bar{E}$  kaydırılmış matris  $\bar{Y}$ , Denklem. (3.22) ve  $\bar{H}$  yerine  $\bar{E}$  şu şekilde verilir:

$$\bar{E} = \begin{bmatrix} g(0)u(2) + g(1)u(1) & g(0)u(3) + g(1)u(2) & \dots & g(0)u(N+1) + g(1)u(N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{l=0}^i g(l)u(i+1-l) & \sum_{l=0}^i g(l)u(i-l+2) & \dots & \sum_{l=0}^i g(l)u(i+N-l-1) \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki matris özelliklerinden, girdi-çıkıktı veri matrislerine  $R$  ve  $\bar{R}$  dayalı ERA'ya benzer bir gerçekleştirme tabanlı algoritmanın, Denklem. (3.18) gelişigüzel giriş  $u(k)$  durumunda. Bu, Denklemde  $H$ 'yi  $R$  ile değiştirerek elde edilir. (3.34).

GRA'nın arkasındaki ana fikir, ilk önce çok sayıda Markov parametresini temel olarak tahmin ederek (ağırlıksız) bir Hankel matrisi  $H$  oluşturmak yerine, ağırlıklı bir Hankel matrisi  $R = Y - E = HU$  oluşturmak için girdi sinyalinin bilgilerini kullanmaktadır. Kısa süreli ve / veya beyaz olmayan bir giriş takımıdır. GRA uygulamasında, Markov parametre tahminleri  $E$  hata matrisini oluşturmak için kullanılır, bu da bir durum-uzay modelini hesaplamak için üzerinde bir gerçekleştirme algoritmasının gerçekleştirildiği ağırlıklı Hankel matrisini  $R$  yaratmak için kullanılmaktadır. Ancak,  $E$  matrisinin formülü ve boyutu dikkatlice incelendiğinde, bir "Büyük Yağ" (blok satır sayısına kıyasla çok yüksek sütun sayısı) matrisi oluşturmak için yalnızca az sayıda Markov parametre tahminine ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir.  $E$  ve sonuç olarak matris  $R = Y - E$ . Bu nedenle, çok sayıda Markov parametresinin gerekli olacağı "büyük yağlı" ağırlıksız Hankel matrisi  $H$ 'nin kullanımından kaçınılır. Diğer bir deyişle, ERA ile karşılaştırıldığında, önerilen GRA, doğru sistem tanımlama sonuçları elde etmek için Markov parametre dizisinin gerekli uzunluğunu azaltmaktadır.

GRA'nın ERA'nın bir genellemesi olduğunu göstermek için, Denklem 1'de tanımlandığı gibi bir birim darbe girişi  $u(k)$  için görülebilir. (3.20),  $U$  matrisi  $N \times N$  birim matrisi olurken,  $E$  matrisi a  $(m \times i) \times N$  sıfır matrisi olur, çünkü ( $U$ ) için  $u(k) = 0$ . Giriş sinyalinin  $u(k)$  aşağıdaki gibi tanımlanan birim adımı olduğu başka bir özel durumda:

$$u(k) = \begin{cases} 1, & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases} \quad (3.47)$$

Geçici dinamik davranışlarını incelemek için tipik olarak esnek mekanik (servo) sistemlere uygulanan, matris  $U$  bir üst üçgen matristir ve matris  $E$ , aşağıdaki gibi çıkış sinyallerinin satırsal bir listesidir:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N \times N}, \quad E = \begin{bmatrix} y(0) & y(0) & \dots & y(0) \\ y(1) & y(1) & \dots & y(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y(i-1) & y(i-1) & \dots & y(i-1) \end{bmatrix}_{(m \times i) \times N} \quad (3.48)$$

daha önce de Callafon (2003) tarafından gösterildiği gibi. İkinci durumda, GRA'nın yalnızca adım yanıt verilerine bağlı olan matris  $R$ 'ye uygulanması, adım yanıt ölçümlerinin farklılaştırılmasıyla elde edilen dürtü yanıt verilerine dayalı ERA uygulamasına kıyasla sistem gerçekleştirme açısından önemli ölçüde daha iyi sonuçlar verir (de Callafon 2003).

### 3.14. Tanımlanmış Durum Uzay Modelinden Modsal Parametrelerin Çıkarılması:

Ayrık zaman sistem matrislerini  $[A]$  elde ettikten sonra;  $[B]$ ;  $[C]$ ;  $[D]$  ERA / OKID tabanlı yaklaşım tarafından yapıldı ve bu matrisler sürekli zaman sayaç parçalarına dönüştürüldü,

$$[A_c], [B_c], [C_c], [D] \quad (3.49)$$

Sürekli zaman sistem matrisinin  $[A_c]$  özdeğerleri  $[\Lambda]$  ve özvektörleri  $[\underline{\psi}]$  şu şekilde hesaplanır:

$$([\underline{\psi}], [\Lambda]) = eig([A_c]) \quad (3.50)$$

Ortogonalite koşulları kullanılarak dönüşüm matrisi  $[T]$  şu şekilde elde edilir:

$$[T] = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & & & \\ & \Gamma_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \Gamma_i \\ & & & & \dots \end{bmatrix}, \quad \Gamma_i = \sqrt{\left([\underline{\psi}]^{-1} [B_c^E(:, i)]\right)^T \left([C_c^E(i, :)] [\underline{\psi}]\right)^{-1}} \quad (3.51)$$

Sensör konumlarındaki  $[\underline{\psi}(:, r)]$ ,  $r$ 'ninci Modun mod şekli  $[\underline{\psi}(:, r)]$ , biçimsel denklemlerle verilen sistem özvektörlerinin  $[\underline{\psi}]$  gözlenen kısımlarıdır:

$$[\psi(:, r)] = [C_c] [\underline{\psi}(:, r)] \quad (3.52)$$

Mod şekli  $[\psi]$  daha ayrıntılı olarak aşağıda gibi hesaplanır:

- i.  $k$ 'ninci DOF'ta bir sensör varsa:

$$[\psi(k, :)] = [C_c^E(k, :)] [\underline{\psi}] [T] \quad (3.53)$$

- ii.  $k$ 'ninci DOF bir sensör veya aktüatör ile donatılmışsa:

$$[\psi(k, :)] = \left( [I]^{-1} [\underline{\psi}]^{-1} [B_c^E(:, k)] \right)^T \quad (3.54)$$

- iii. Tam bir sensör takımı varsa:

$$[\psi] = [C_a]^{-1} [C_c] [\underline{\psi}] [I] \quad (3.55)$$

- iv. Tam bir aktüatör seti varsa:

$$[\psi]^T = ([I]^{-1} [\underline{\psi}]^{-1} [B_c] [d])^{-1} \quad (3.56)$$

Burada  $[C_c^E], [B_c^E]$  sürekli zaman sistemi matrislerinin tüm serbestlik derecelerini dahil etmek için,  $[C_c], [B_c]; [d]$  bilinen girdilerin yerlerini ve türünü karakterize eden bir girdi etki matrisidir.  $\{f(t)\}; [C_a], [C_v], [C_d]$  sırasıyla ivme, hız, sensör kullanmak için yer değiştirme için çıktı etki matrisleridir (ivmeölçerler, takometreler, gerinim ölçerler vb.);

özdeğerleri kullanma  $[A]$  sürekli zaman sistemi için denklem (3.50), (3.52):

$$[A] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \lambda_2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \lambda_r & \\ & & & & \dots \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$c_r = Re(\lambda_r)$  sönümlenme faktörüdür,

$\omega_r = Im(\lambda_r)$ , sönümlü doğal frekanstır.

Sönümlenme oranı  $\xi_r$ ,  $r$ 'ninici modü aşığıdaki denklem tarafından verilir:

$$\xi_r = -\frac{c_r}{\sqrt{c_r^2 + \omega_k^2}} \quad (3.58)$$

Yukarıda girdi-çıkı ölçümlerinden elde edilen sistem modal parametreleri  $[\psi]$ ,  $[A]$ , teorik olarak bilinen fiziksel parametrelerle  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$  karmaşık özdeğer

$$(\lambda_r^2[m] + \lambda_r[c] + [k]\{\psi_r\}) = 0 \quad (3.59)$$

Burda:

$$[A] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_r \\ & & & & \dots \end{bmatrix},$$

$$\lambda_r = c_r + i\omega_r; i = \sqrt{-1},$$

$$[\psi] = [\{\psi_1\} \{\psi_2\} \dots \{\psi_r\} \dots]$$

### 3.15. Çoklu Kurulum Ölçümlerinden Modüler Alt Uzay Tabanlı Sistem Tanımlama:

OMA'daki bir problem, büyük yapıların köprüler veya binalar olarak özyapı tanımlanmasıdır. Genellikle, yalnızca sınırlı sayıda sensör mevcuttur. Sensör mevcudiyetinin olmamasına rağmen ayrıntılı mod şekil bilgisi elde etmek için, mevcut sensörlerin bazılarının sabitlendiği, diğerlerinin farklı ölçüm kurulumları arasında hareket ettirildiği çoklu ölçümler yapmak yaygın bir uygulamadır. Her ölçüm kurulumunda, ortam titreşim verileri kaydedilir. Karşılık gelen verileri bir şekilde birleştirerek, bu, birkaç yüz veya binlerce aralığında bile çok büyük sayıda sensör varmış gibi sistem tanımlamasının yapılmasına izin vermektedir. Farklı ölçümler arasında muhtemelen farklı (ölçülmemiş) bir uyarı dikkate alınmalıdır. Buna dayanarak, küresel bir birleştirme yaklaşımı

önerilmektedir, burada birinci adımda farklı kurulumlardan gelen veriler normalleştirilir ve birleştirilir, ikinci adımda küresel sistem tanımlaması yapılır. Bu yaklaşım tamamen otomatiktir ve tüm alt uzay yöntemleri için uygundur. Tüm kurulumların verilerinin sırayla işlenmesi anlamında modülerdir ve çok sayıda kurulumu ve sensörü bellek sorunlarıyla karşılaşmadan idare edebilir. Teorik özellikleri ile ilgili olarak, sabit olmayan tutarlılık ve yanlış tanımlanmış model sırasına karşı sağlamlık kanıtlanmıştır, bu da gerçek yapılarda sistem tanımlaması için birleştirme yaklaşımının kullanımını doğrulamaktadır. Birkaç inşaat yapısına başarıyla uygulanmaktadır.

### **3.16. Hızlı Çok Sıralı Alt Uzay Tabanlı Sistem Tanımlama:**

OMA bağlamında özyapı tanımlamasındaki genel bir problem, sistemin gerçek fiziksel modlarının, tanımlanan modellerde görünen sahte modlardan ayırt edilmesidir, örn. renkli gürültü, doğrusal olmayan özellikler, sabit olmayan uyarma veya sistem sırasının aşırı spesifikasyonu nedeniyle. Öte yandan, gürültü kontamine verilerden dolayı tüm modları almak için sistem sırasının fazla belirtilmesi gerekir. Fiziksel modların farklı aşırı belirlenmiş model siparişlerinde tahmin edildiğinde oldukça sabit kaldığı gözlemine dayanarak, sahte modlar değişiklik gösterirken, farklı model sıralarından sistem tanımlama sonuçları kullanılarak ayırt edilebilirler. Elde edilen doğal frekansların model sırasına göre çizildiği sözde stabilizasyon diyagramlarında, son model seçilir. Bununla birlikte, bu çok sıralı sistem tanımlaması, özellikle birçok sensör ve yüksek model siparişleri olan büyük yapılar için hesaplama açısından oldukça pahalıdır. Sistem tanımlama adımının hesaplama maliyetini  $O(n_{maks}^4)$  'dan  $O(n_{maks}^3)$  'a düşürür, burada  $n_{maks}$  maksimum varsayılan model sırasıdır. Örneğin, hesaplama süresinin 200 faktörü kadar azaltılması sağlanabilmektedir.

### **3.17. Değişen Uyarma Altında Sağlam Alt Uzay Tabanlı Hata Tespiti:**

İstatistiksel alt uzay tabanlı bir hata algılama testiyle, olası hatalı bir durumdan elde edilen veriler, bir kalıntı fonksiyona ilişkin  $X^2$  testi istatistiği kullanılarak ve bir eşikle karşılaştırılarak referans durumdaki bir modelle karşılaştırılır. Bu nedenle, yeni elde edilen verilere karşılık gelen bir sistemin öz yapısının hala referans duruma karşılık gelip gelmediğine veya özyapıyı olası hatalı durumda fiilen tanımlamadan referans durumdan sapıp saptığına karar verilebilir. Bu, yapısal titreşim verilerini kullanırken hasar

tespitine karşılık gelir. Bir OMA bağlamında, ortam uyarımı ölçülmez ve değişebilir, örn. farklı trafik, rüzgâr, deprem vb. nedeniyle meydana gelmektedir. Ancak, uyarmadaki bir değişiklik  $X^2$  - test istatistiklerini de etkiler ve hasar durumunda yanlış alarm veya alarm yol açabilmektedir. Eksitasyondaki değişikliklere dayanıklı bir kalıntıya dayalı yeni bir hata algılama testi önerilmektedir.

### **3.18. Kitle Normalleştirilmiş Mod Şekillerini Kullanarak Sağlam Alt Uzak Tabanlı Hasar Lokalizasyonu:**

Hasar yerelleştirme yaklaşımı, bir  $X^2$  testi istatistikleri kullanılarak yapısal parametrelerdeki değişikliklerin tespitine dayanır. Bu yaklaşım için, genellikle Sonlu Elemanlar Modelinden (SEM) elde edilen bu yapısal parametrelere ilişkin hassasiyetler gereklidir. Yapıların üzerinde bilinen bir kütle pertürbasyonunun tanıtıldığı ölçümler kullanılarak OMA verilerinden gerekli hassasiyetlerin elde edilir (SE) modelsiz bir yaklaşım önerilmektedir. Ayrıca,  $X^2$  - testlerinde yapısal parametrelerin karşılıklı etkisi araştırılır ve bir ret şeması önerilir. Bu, güvenli ve hasarlı elemanlar arasında daha zıt hasar lokalizasyonu sonuçları sağlar ve bu nedenle yanlış alarmları azaltmaktadır.

### **3.19. Modal Analiz:**

Modal analiz, bir yapıyı inşaat mühendisliği perspektifinden frekans, sönümlenme ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerini kullanarak tanımladığımız bir süreçtir. Mühendisler yapıları incelendiğinde, sürekli olarak çeşitli titreşimlere maruz kaldıkları görülmektedir. Bu titreşimler, kulaklarımızı rahatsız eden akustik olarak rahatsız edici titreşimler olabilir ya da yapılara zarar verebilecek hatta onları tahrip edebilecek titreşimler de olabilir. Son yıllarda yapıların doğal frekanslar, sönüm oranları, mod şekilleri gibi dinamik davranışları üzerine yapılan çalışmalar ivme kazanmıştır. Bu nedenle bir yapının doğal özelliklerini oluşturan bu dinamik özellikler açısından tanımlanması ve bu alandaki çalışmalara modal analiz denir. (David, 2000) Modal analiz iki varsayıma dayanmaktadır; bunlardan ilki yapının doğrusal, diğeri yapının zamandan bağımsız olmasıdır.

### **3.20. Model Güncellemesi:**

Deneysel model ile sayısal olarak üretilen model arasındaki farkı azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Çünkü binaların tasarımı sırasında oluşturulan model yapıyı tam olarak karşılamıyorsa yapılan dinamik ve statik analizlerin yanlış olduğu söylenebilir. Bu nedenle binanın dijital ortamda deprem, rüzgâr, kar, operasyonel yük ve benzeri etkiler altında nasıl davrandığının doğru analiz edilmesi isteniyorsa sayısal modelin güncellenmesi ve gerçek yapının davranışının simüle edilmesi gerekmektedir.

Elbette model güncellemenin de birçok zorluğu vardır. Sonuç olarak modelin güncellenmesi yapılarak yapıdan elde edilen veriler yardımıyla sayısal modelin güncellenmesi olduğu için bu aşamada yapının doğru analiz edilmesi gerekmektedir. Yapıyı doğru temsil edebilmek için doğru sayıda sensörün doğru noktalara yerleştirilmesi gerekir. Sınırlı sayıda sensörle çalışılıyorsa, yapının özellikleri veriler aracılığıyla tam olarak elde edilemeyebilir. Bir sonraki aşamada, yapıdan elde edilen yoğun bir veri kitlesinin doğru şekilde işlenmesi ve analiz edilmesi gerekir, bu aşamada bilgisayar işlemcileri aşırı miktarda hesaplama süresi gerektirir.

### **3.21. Mod Şekilleri:**

Esnek bir yapının çoklu serbestlik dereceleri ve dinamik hareketi, yapının hizmetlilik derecesine eşit tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik hareketinin toplamı olarak ifade edilebilir. Verilerin Fourier genlik spektrumunda bulunan baskın frekanslar, yapıyı oluşturan tek serbestlik dereceli sistemlerin, yani yapının modal frekanslarının frekanslarıdır. Modal şekiller, her bir modal frekansta yapının hangi geometrik konumda titreştiğini gösterir. Yapıdaki sönümlenme, yapının kütlesi ve / veya sertliği ile doğrusal orantılı ise, yapının modal frekansları ve mod şekilleri sayısal olarak gerçek değerlerde bulunabilir. Aksi takdirde, modal frekanslar ve mod şekilleri yalnızca karmaşık değerler cinsinden ifade edilebilir.

Orantılı sönümlü bir yapıda, ilk deplasman olarak herhangi bir mod şekli verilirse yapı, bu şekli bozmadan ve tüm noktalarda aynı oranda azalmadan durana kadar titrer. Yapının kayıtları, belirli bir moda karşılık gelen modun profilini bulmak için bu modu tanımlayan frekans etrafında dar bantlı bir filtreyle filtrelenir. Filtrenin bir sonucu olarak elde edilen sinyal frekansı, koşullu frekansa eşit olan ve genliği zamanla değişen

sinüzoidal bir eğridir. Filtreleme yaparken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, kayıta sahne özelliklerini değiştirmemektir.

Bunun için sıfır faz filtreleri kullanmak veya faz sıfır değilse, kaydı biri normal diğeri tersi ayarlayarak iki kez filtrelemek gerekir. Sistemde göreceli sönümlenme varsa, filtrelenmiş veriler alt üste çizildiğinde maksimum ve minimum tüm noktalarda aynı anda gerçekleşmelidir. Aksi takdirde, sönümlenmenin orantılı olmadığı ortaya çıkar. Genel olarak, oldukça esnek yapılarda (gökdelenler, asma köprü tabliyeleri gibi) nispi sönümlenme görülmez. Filtrelenen verilerin yarı sinüs genliği, ölçüm noktalarındaki model şeklinin genliğini verir.

### 3.22. Modal Özelliklerin Çıkarılması:

Modal özellikler, modal frekansları ve sönümlenme oranlarını, mod şekillerini ve modal katılım faktörlerini içerir. Yalnızca çıktı sistem tanımlamasında, son terim tanımlanamazken, diğer tüm parametreler ayrık durum matrisleri A ve C'den belirlenebilir.

A matrisi şu şekilde ayrıştırılabilir:

$$A = \Psi D \Psi^{-1} \quad (3.60)$$

Burda  $D = \text{diag}(\lambda_r) \in C^{n \times n}$ ,  $r = 1, 2, \dots, n$  ayrık zamanlı karmaşık özdeğerleri içeren köşegen bir matristir, ( $\Psi \in C^{n \times n}$ ) 'nun sütunları karşılık gelen özvektörleri içerir. Sürekli zaman sistemi için, sürekli durum matrisi  $A_c$  şu şekilde ayrıştırılabilir:

$$A_c = \Psi_c D_c \Psi_c^{-1} \quad (3.61)$$

Burda,  $D_c = \text{diag}(\lambda_{c,r}) \in C^{n \times n}$ ,  $r = 1, 2, \dots, n$  sürekli zaman karmaşık özdeğerlerini içeren köşegen bir matristir, ( $\Psi_c \in C^{n \times n}$ ) 'nun sütunları karşılık gelen özvektörleri içermektedir. Sürekli zaman durum matrisi için bu özdeğerler ve özvektörler, yapının hareket denklemi için olanlarla aynıdır.

$$A = e^{A_c \Delta t}; C = C_c \quad (3.62)$$

Bunu türetmek kolaydır:

$$\lambda_{c,r} = \frac{\ln(\lambda_r)}{\Delta t}; \Psi_c = \Psi \quad (3.63)$$

$(A_c)$  'nin özdeğerleri aşağıdaki çiftlerle ifade edilebilir:

$$\lambda_{c,r}, \lambda_{c,r}^* = -\xi_r \omega_r \pm j \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} \quad (3.64)$$

Burada  $(\omega_r)$ ,  $(r)$  modunun dairesel modal frekansıdır ve  $(\xi_r)$ , modal sönümleme oranıdır mod  $r$ .

Mod şekilleri özvektörlerden ve gözlem matrisinden hesaplanabilir:

$$\Phi = C_c \Psi_c = C \Psi \quad (3.65)$$

Gerçek ölçümleri analiz etmek genellikle karmaşık modlarla sonuçlanırken, ışık sönümleme sistemi için, bunları gerçek mod şekilleri olarak çizmek için karşılık gelen gerçek parçaların işaretleriyle birlikte karmaşık mod şeklinin genliklerini kullanırız.

### 3.23. Sönüm Oranları:

Koşullu sönümleme oranları, her mod için karşılık gelen filtrelenmiş kayıtlar kullanılarak belirlenebilir. Genel olarak, sönümleme çok doğrusal olmayan bir parametredir ve deprem yükü frekansı ve yapı deplasmanının özelliklerine göre değişir. Bu nedenle, kaydın güçlü titreşim kısmını kullanarak modüler sönümlemeyi hesaplamak uygun değildir ve sabit bir değer elde etmek zordur.

Kararlı sönümleme elde etmek için verilerin kuyruk kısmının yani deprem bittikten sonra serbest titreşim gösteren kısmının kullanılması daha uygundur. Bu bölümdeki maksimum azaltma oranını kullanarak tipik sönümlemeyi hesaplayabiliriz. İki bitişik maksimum ( $n = 1$ , Denklem I) kullanarak veya maksimum uzakta  $n$ 'deki maksimum değerleri kullanarak, koşullu sönümleme aşağıdaki denklemlerden biriyle hesaplanabilir:

$$\frac{1}{2\pi} \ln_e \left( \frac{P_k}{P_{k+1}} \right) = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \approx \xi \quad (3.66)$$

$$\frac{1}{2\pi n} \ln_e \left( \frac{P_k}{P_{k+1}} \right) = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \approx \xi$$

Diğer bir yöntem, modal davranışı gösteren filtrelenmiş verilerin Fourier spektrumundaki maksimum genliğin genişliğini kullanmaktadır.  $f_0$ , modal frekansı ve  $f_1$

ve  $f_2$ 'nin genliğinin 0.707 azaldığı genliğe karşılık gelen  $f_0$  'nın altındaki frekansları gösteriyorsa, modal sönümleme aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (3.67)$$

Deprem veya Rüzgâr sönümleme hesaplamaları yapılırken, orijinal kayıtlar yerine kayıtların oto-korelasyon fonksiyonlarının kullanılması daha sağlam sonuçlar verebilmektedir.

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) - x(t - \tau) \quad (3.68)$$

### 3.24. Sönümleme Tahmin Hatası:

Tanımlama prosedürü adımlardan oluşur ve ana tahmin hataları, işaret işlemiyle belirtilen adımda tanıtılır. Bu adım, korelasyon fonksiyonunun (CF) bir tahminini ve spektral yoğunluğun (SD) tahminini içerir. Sinyal işlemedeki hatalar, zaman adımı, frekans çözünürlüğü, zaman serilerinin uzunluğu, veri segmentlerinin nokta sayısı, sivriltme (pencereleme), SD ortalamasından ve örneklemeyle ilişkili takma addan büyük ölçüde etkilenir. Frekans alanında, modal sönümleme her zaman fazla tahmin edilir ve bu da gerçekçi olmayan şekilde daha büyük sönümleme oranı tahminlerine yol açabilir. Bu durum, spektral sızıntı olarak bilinen komşu frekanslara "sızan" sinyalin gücünden kaynaklanır ve SD fonksiyonlarının modal zirvelerinin daha geniş hale gelmesine neden olur.

Her modsal tepe sönümlemeye karşılık gelir; dolayısıyla sönümleme fazla hesaplanacaktır. Bu, FFT'nin sinyalin bir takım örneğiyle sonlu ölçüm süresi içinde varsayılan periyodikliği ve modal sönümleme oranının fazla tahmin edilmesine katkıda bulunan yanlış sivriltme (pencereleme) seçimi nedeniyle ortaya çıkar. Bu sorun, doğru sivriltme (pencereleme) seçimi veya yine SD'ye bağlı olan OMA dışındaki yaklaşımlar kullanılarak çözülebilir. Ancak, modal sönümlemenin bu fazla tahmini nihai bir karar olarak değerlendirilemez. Prensipte olarak, frekans alanındaki modal parametrelerin tarafsız bir tahmini yalnızca sonsuz kayıtlar aracılığıyla elde edilebilir. Güvenilir modal sönümleme tahminleri için kaydın uzunluğu önemlidir.

### 3.25. Yüksek Seviyede Sönümleme:

Yüksek seviyede sönümleme içeren özel bir durumda, sönümleme daha yüksek modlar için hafife alınacaktır ve sinyal gürültüsü varlığında eksik tahminin daha fazla amplifikasyonu meydana gelir. Yüksek sönümleme sistemi, bir sistem olarak tanımlanabilir %1'den fazla sönüm oranı. Çelik yapı gibi gerçek inşaat yapılarında, modal sönümleme oranı her zaman %1'den yüksektir ve bu nedenle modal sönümlemenin tanımlanması, özellikle yakın aralıklı mod durumunda muhtemelen daha zayıf olacaktır. Yüksek sönümleme oranları sadece yakın aralıklı modları etkilemekle kalmaz, aynı zamanda iyi ayrılmış modları da etkiler, bunun nedeni tepe düzleşmesi ve çok gürültülü tekil değerlerin (SV'ler) varlığıdır. Genel olarak %2'nin altındaki modal sönüm oranları, farklı yapı özelliklerinden bağımsız olarak her zaman başa çıkmak için kullanılır. Ancak bu etki, ek gürültü modları eklenerek azaltılabilir. Ağır sönümlü yapıların bir başka sorunu, gürültüden gelen fiziksel olmayan bilgi daha baskın hale geldikçe ve korelasyon işlevi daha hızlı bozuldukça uyumun kötüleşmesidir. Bu problem, hatanın ortalamasını ve standart sapmasını en aza indirebilecek ve modal sönümlemenin tanımlanmasını iyileştirebilecek ekstra ölçüm kanalları eklenerek çözülebilir.

Yeni modal parametre tahmini, yüksek sönümleme sistemi için geliştirilmiş bir FDD algoritması ile tanıtıldı; bu algoritma, bir SD matrisinin işlenmesinde ve bunun yanı sıra frekans çözünürlüğü etkisi, spektral çan genişliği, tekil değeri ve tepe seçimi, anti-dönüştürülmüş sinyalin uygulanan-gerileme zaman penceresi ile birlikte. Bunun yanında Chang ve ark. bağımsız bileşen analizini (ICA) ters sönümleme transferiyle (IDT) birleştiren bağımsız bileşen analizini geliştirerek daha yüksek sönümleme yapıları için yeni bir modal tahmin yöntemi sundu.

### 3.26. Sonlu Elemanlar Modeli (SEM):

Sonlu eleman yöntemi (SEM), mühendislik ve matematiksel modellerin problemlerini çözmek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Tipik sorun alanları, geleneksel yapısal analiz, ısı transferi, sıvı akışı, kütle taşıma ve elektromanyetik potansiyel alanlarıdır. SEM, iki veya üç uzay değişkenindeki kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için özel bir sayısal yöntemdir (yani, bazı sınır değeri problemleri). Bir sorunu çözmek için, SEM, büyük bir sistemi sonlu elemanlar adı verilen daha küçük,

daha basit parçalara böler. Bu, nesnenin bir ağının (sınırlı sayıda noktaya sahip olan çözüm için sayısal alan) oluşturulmasıyla uygulanan uzay boyutlarında belirli bir alan ayırıklaştırmasıyla elde edilmektedir.

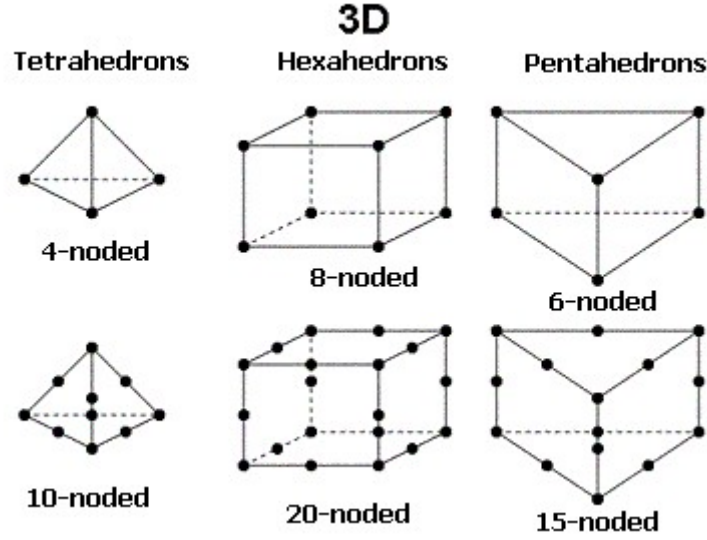
Bir sınır değer probleminin sonlu eleman yöntemi formülasyonu, sonunda bir cebirsel denklem sistemi ile sonuçlanmaktadır. Yöntem, bilinmeyen işlevi etki alanı üzerinden yaklaştırır. Bu sonlu elemanları modelleyen basit denklemler daha sonra tüm problemi modelleyen daha büyük bir denklem sistemine birleştirilmektedir. Daha sonra FEM, ilişkili bir hata fonksiyonunu en aza indirerek bir çözüme yaklaşmak için varyasyonlar hesabından varyasyonel yöntemler kullanmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin buluş tarihini aktarmak zor olsa da yöntem inşaat ve havacılık mühendisliğinde karmaşık esneklik ve yapısal analiz problemlerini çözme ihtiyacından kaynaklanmıştır.

Gelişimi A. Hrennikoff ve R. Courant'ın 1940'ların başındaki çalışmalarına kadar izlenebilir. Bir başka öncü de Ioannis Argyris'ti. SSCB'de, yöntemin pratik uygulamasının tanıtımı genellikle Leonard Oganesyanyan'ın adıyla bağlantılıdır. Çin'de, 1950'lerin sonunda ve 1960'ların başında, baraj inşaatlarının hesaplamalarına dayanarak, K. Feng, kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için sistematik bir sayısal yöntem önermiştir. Yöntem, sonlu eleman yönteminin bir başka bağımsız buluşu olan varyasyon ilkesine dayalı sonlu fark yöntemi olarak adlandırılmıştır.

Bu öncüler tarafından kullanılan yaklaşımlar farklı olsa da temel bir özelliği paylaşırlar: sürekli bir alanın, genellikle öğeler adı verilen bir dizi ayrı alt alanlara bölünmesidir. Hrennikoff'un çalışması, bir kafes analogjisi kullanarak alanı ayırıklaştırırken, Courant'ın yaklaşımı, bir silindirin burulma probleminden kaynaklanan ikinci dereceden eliptik Kısmi Diferansiyel Denklemleri (KDD'ler) çözmek için alanı sonlu üçgen alt bölgelere böler. Courant'ın katkısı evrimseldi ve Rayleigh, Ritz ve Galerkin tarafından geliştirilen KDD'ler için daha önceki sonuçların büyük bir kısmına dayanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi 1960'larda ve 1970'lerde gerçek ivmesini JH Argyris'in Stuttgart Üniversitesi'ndeki meslektaşlarıyla, RW Clough'un UC Berkeley'deki iş arkadaşlarıyla, OC Zienkiewicz'in meslektaşları Ernest Hinton, Bruce Irons ile

geliştirmesiyle elde etti. ve Swansea Üniversitesi'ndeki diğerleri, Paris 6 Üniversitesi'nden Philippe G. Ciarlet ve Cornell Üniversitesi'ndeki meslektaşları ile Richard Gallagher. Bu yıllarda mevcut açık kaynak sonlu eleman yazılım programları tarafından daha fazla ivme sağlandı. NASA, NASTRAN'ın orijinal versiyonuna sponsor oldu ve UC Berkeley, sonlu elemanlar programı SAP IV'ü yaygın olarak kullanılabilir hale getirdi. Norveç'te gemi sınıflandırma kurumu Det Norske Veritas (şimdi DNV GL), 1969'da gemilerin analizinde kullanılmak üzere Sesam'ı geliştirdi. Sonlu elemanlar yöntemine sıkı bir matematiksel temel 1973'te Strang ve Fix tarafından yayımlanarak sağlandı. Yöntem, o zamandan beri çok çeşitli mühendislik disiplinlerinde, örneğin elektromanyetizma, ısı transferi ve akışkan dinamiği gibi fiziksel sistemlerin sayısal modellemesi için genelleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Yaygın kullanıma sahip sonlu eleman tipleri

### 3.26.1. Sonlu Eleman Metodu ile Yapıların Modellemesi:

Yapının geometrisine göre birleştirilen sonlu elemanların şekline sonlu eleman modeli (SEM) denir. Yapının rijitlik matrisi, blok matrisi ve sönümlenme matrisi, oluşturulan sonlu eleman modeline bağlı olarak oluşturulmuştur. Bu matrisler, sonlu eleman modelinin sonucudur ve gerçek yapının yay ve kütle özelliklerini temsil etmek için kullanılır. Oluşturulan diziler, boyutu sonlu eleman modelini oluşturmak için kullanılan düğümlerin serbestlik derecelerinin toplamına eşit olan kare matrislerdir. Sertlik, kütle ve sönümlenme matrisleri kullanılarak oluşturulan hareket denklemi aşağıda

sunulmuştur (Kasımzade, 2005). Özdeğerler, doğal frekansların karelerini göstermektedir. Özdeğer matrisinin her sütununa özvektör adı verilip sütun numarasına karşılık gelen doğal frekans titreşim modelini göstermektedir. Birçok ticari sonlu eleman yazılımı, özdeğerleri ve özvektörleri yinelemeli çözüm yöntemlerini kullanarak hesaplanmaktadır.

Sonlu eleman modelinin FTF'leri özdeğerler ve özvektörler kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu nedenle, topoloji modeli frekans yanıt fonksiyonları açısından tanımlanabilmektedir. Diğer bir deyişle sayısal modelin doğruluğu, sonlu eleman modeli oluşturulurken yapılan varsayımların doğruluğuna eşittir. Yukarıda belirtilen şekilde sistemleri incelemek için, bilindiği gibi, sonsuz sayıda serbestlik derecesi içeren bir sistem, sonlu sayıda elemana (çubuk, membran, levha, zarf, çelik vb.) bölünür ve bu elemanlar birbirine sadece düğümlerle bağlıdır. Bu nedenle, sonsuz serbestlik derecesine sahip bir sistemin yerini, her biri maksimum altı serbestlik derecesine sahip sınırlı sayıda birleşme noktasına bağlı  $k_*$  sonlu elemanlar almaktadır.

Genellikle bu sırayla inşa edilmiş ayrı bir sistemin denklemlerini çözülmektedir;  $k_{**}=k_*$  . (Toplam serbestlik derecesi eleman sayısı) - (sınır koşulları sayısı) bir dizi bilinmeyen içermektedir. Bu bilinmeyenler, sistemin ayrık modelinin belirtilen sisteme eşdeğer olması koşuluyla oluşturulan denklemlerin çözülmesiyle bulunmaktadır. Ayrık sistemin düğüm yer değiştirmelerinin  $\{u\}$  bilinmediğini varsayarsak, statik yüklerin etkileri için denklemlerin çözümü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$[k]\{u\}=\{F\} \quad (3.69)$$

Burada rijitlik matrisi  $[k]$  ve sistemin dış kuvvet vektörü aşağıdaki bilinen sırada hazırlanmaktadır:

*i.* Sınır Koşulunun Uygulanması

$$[k]=[k_{+i}] \quad (3.70)$$

$$[k_{+}] = \sum_{k=1}^{k_*} [\bar{k}_{+k}] \quad (3.71)$$

$$[\bar{k}_{k+}] = [\tau_k]^T [\bar{k}_k] [\tau_k] \quad (3.72)$$

$$[\bar{k}_k] = [C_k] [\bar{k}_k] [C_k]^T \quad (3.73)$$

*i.Sınır Koşlunun Uygulanması*

$$\{F\}=\{F_{+i}\} \quad (3.74)$$

$$\{F_{+}\} = \sum_{k=1}^{k_*} \{\bar{\bar{F}}_{+k}\} \quad (3.75)$$

$$\{\bar{\bar{F}}_{+k}\} = [\tau_k]^T \{\bar{\bar{F}}_k\} \quad (3.76)$$

$$\{\bar{\bar{F}}_k\} = [C_k] \{\bar{F}_k\} \quad (3.77)$$

$$\{\bar{F}_k\} = \{\bar{F}_{*k}\} + \{\bar{R}_{*k}\} \quad (3.78)$$

$$\{\bar{R}_{*k}\} = - \int_{A_k} [H_k]^T q_k(A) dA \quad (3.79)$$

Burda  $\bar{k}_k, \bar{\bar{k}}_k, \bar{\bar{k}}_{+k}$   $-k$ .sonlu elemanın Lokal, Global ve Ayrık sistemin bütün serbestlik derecesine ( $k_{**}$ ) kadar genişletilmiş rijitlik matrisi  $[C_k]$   $-k$ .sonlu elemanın lokal koordinat sisteminden (l.k.s) global koordinat sistemine (g.k.s) dönüşüm matrisi;  $[\tau_k]$   $-k$ .sonlu elemanın Topolji matrisi;  $\bar{\bar{F}}_k, \bar{\bar{F}}_{+k}$   $-k$ .sonlu elemanın Lokal, Global ve Ayrık sistemin bütün serbestlik derecesine ( $k_{**}$ ) kadar genişletilmiş düğüm kuvvetleri vektörü;  $\bar{R}_{*k}$   $-k$ .sonlu elemanın Lokal koordinat sisteminde ( $A$ ) alanına etkiyen sürekli dağılmış  $q(A)$  yükünden eşdeğer düğüm yükleri vektörü;  $[H_k]$   $-k$ .sonlu elemanlar ile ifade edilmiş ayrık sisteme eşdeğerlik (W. R. Hamilton varyasyon prensibi) koşulundan sistemin dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade olunur (Kasımzade, 2005):

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [c]\{\dot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (3.80)$$

Sönüm matrisi  $[c]$ , rijitlik matrisi  $[k]$  ve kütle matrisi  $[m]$  orantılı olduğu için, buna göre yapılandırılırlar. Bu nedenle, sonlu elemanın blok matrisi yerel koordinat sisteminde düzenlenmişse, (3.80) denklemde yer alan diğer matrisler geleneksel sonlu eleman yöntemi ve (3.70-3.75), (3.74-3.79) bağılıkları ile kurulabilmektedir.  $k$ .sonlu elemanın l.k.s. –de kütle matrisi  $[\bar{m}_k]$  eleman düğümlerinde her bir  $i$ .serbestlik derecesi doğrultusunda verilmiş  $m_{*kii}$  tekil kütlelerden oluşturulmuş eleman köşegen kütle  $[m_{*k}]$  matrisinden ve elemanın kendisinin sürekli dağılmış kütlelerinden oluşturulmuş eleman eşdeğer kütle  $[m_{*k}]$  matrisinden oluşmaktadır:

$$[\bar{m}_k] = [\bar{m}_{*k}] + [m_{*k}] \quad (3.81)$$

$$[\bar{m}_{\bullet k}] = \begin{bmatrix} m_{\bullet k11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\bullet k1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{\bullet k11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{\bullet k1} \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$p$  (Düğüm tanımlanan eleman sayısı).(Düğümün serbestlik derecesi sayısı)

$$[\bar{m}_{\bullet k}] = \int_{V_k} \rho_k [H_k]^T [H_k] dV \quad (3.83)$$

Burda  $[H_k]$ ,  $\rho_k$ ,  $V_k$  Sonlu elemanın şekil fonksiyonu, yoğunluğu ve hacmidir.

Çoğu durumda, elemanın dağıtılmış kütlesi eleman düğümleri (3.82) üzerine dağıtılır, böylece  $[m_{*k}]$  ihmal edilebilmektedir. Ondan dolayı:

$$[\bar{m}_k] \approx [\bar{m}_{\bullet k}] \quad (3.84)$$

Bu durumda, sistem daha sınırlı unsurlara ne kadar çok bölünürse, (3.84) yaklaşımında o kadar az hata olmaktadır.

Sistemin kütle matrisi, yerel koordinat sisteminde (3.81) formülüyle tanımlanan element kütle matrisine göre aşağıdaki gibi hazırlanır:

$$[m] = [m_{+i}] \quad (3.85)$$

$$[m_{+}] = \sum_{k=1}^{k_*} [\bar{m}_{+k}] \quad (3.86)$$

$$[\bar{m}_{+k}] = [\tau_k]^T [\bar{m}_k] [\tau_k] \quad (3.87)$$

$$[\bar{m}_k] = [C_k] [\bar{m}_k] [C_k]^T \quad (3.88)$$

$$[\bar{m}_k] = [\bar{m}_{\bullet k}] + [\bar{m}_{*k}] \quad (3.89)$$

$$[\bar{m}_{\bullet k}] = - \int \rho_k [H_k]^T [H_k] dv \quad (3.90)$$

[c] Sistemin sönümlenme matrisi formül (3.91) ile ifade edilir ve sistemin rijitliği [k] ve kütle [m] matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$[c]=[m]\left(\sum_{i=1}^J \frac{\xi_i \omega_{oi}}{M_i} \{\Phi_i\}\{\Phi_i\}^T\right) [m] \quad (3.91)$$

$$M_i = \{\Phi_i\}^T [m] \{\Phi_i\} \quad (3.92)$$

$$\Phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\{a_j\}[m]\{a_j\}}} \quad (3.93)$$

Burda  $\omega_{oi}, \{a_i\}$  sönümsüz sistemin  $i$ . normal titreşim modunun serbest titreşim frekansı mod formudur ve uygun özdeğer probleminin çözümünden türetilmiştir:

$$[d]\{\ddot{u}\} + \{u\} = \{0\} \quad (3.94)$$

$$\{u\} = \{a\} \sin(\omega_o t + \varphi_0) \quad (3.95)$$

$$\left. \begin{array}{l} [d]\{a\} = \frac{1}{\omega_o^2} \{a\} \\ \text{veya} \\ [d]\{a\} = \bar{\lambda} \{a\} \end{array} \right\} \longrightarrow \omega_{oi}, \{a_i\} \quad (3.96)$$

Burda:

$$[d]=[k]^{-1}[m] = [\delta][m] = [d] = \frac{[\bar{d}]}{\bar{\lambda}} ; \bar{\lambda} = \frac{1}{\omega_o^2 \delta_o m_o} \quad (3.97)$$

Eğer sisteme dinamik yükler sadece düğüm ve elemanları üzerinde etkilerse zamana bağlı dış dinamik kuvvet vektörü statik çözümdeki (3.74-3.79) düzenine uygun şekilde aşağıdaki gibi kurulur:

$$\{F(t)\} = \{F_o\} \quad (3.98)$$

$$\{F_{+k}(t)\} = \sum_{k=1}^{k_*} \{\bar{F}_{+k}(t)\} \quad (3.99)$$

$$\{\bar{F}_{+k}(t)\} = [\tau_k]^T \{\bar{F}_k(t)\} \quad (3.100)$$

$$\{\bar{F}_k(t)\} = [C_k] \{\bar{F}_k(t)\} \quad (3.101)$$

$$\{\bar{F}_k(t)\} = \{\bar{F}_{*k}(t)\} + \{\bar{R}_{*k}(t)\} \quad (3.102)$$

$$\{\bar{R}_{*k}(t)\} = - \int_{A_k} [H_k(A)]^T q_k(A, t) dA \quad (3.103)$$

Sembol tarafından verilen sınır koşullarının uygulanması için (örneğin, sırayı tanımlayan  $i$ . mesnete uygun satır ve sütun elemanlarının yerine 0, eşleşme noktasında 1 yazılması) prosedür görüntülenmiştir.

### 3.27. Çok Dinamik Serbestlik Dereceli Yapıların Hareket Denklemlerinin Düzenlenmesi:

Hareket denklemi, sistemin dinamik dengesine bakılarak oluşturulur:

$$\{F_e\} + \{F_c\} + \{F_I\} = \{F(t)\} \quad (3.104)$$

Burada  $\{F_e\}$ , Sistem etki eden elastik kuvvetleri olup  $i$ . elemanı (yani, ks.d yönündeki  $u_i$  yer değişmesine sistem yanıtıdır), aşağıdaki gibi süperpozisyonla bulunur:

$$\{F_{ei}\} = k_{i1}u_1 + k_{i2}u_2 + \dots + k_{ij}u_j + k_{in}u_n \quad (3.105)$$

$k_{ij}$   $j$ . Kinematik serbestlik derecesi (ks.d.) cinsinden birim yer değiştirme ( $u_j = 1$ )  $i$ . k.s.d yönünde oluşan kuvvettir.  $i = 1, n$  k.s.d'si için sisteme etki eden elastik kuvvet şu şekilde ifade edilebilir:

$$\{F_e\} = [k]\{u\} \quad (3.106)$$

Bu denklemde  $[k]$  sistemin rijitlik matrisidir. Küçük sistemlerin yapısal mekaniğinden (yer değiştirme yöntemi) ve karmaşık sistemler için sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile elde edilmektedir.

$\{F_c\}$  Sisteme etki eden sönümlenme kuvvetleridir. Eşdeğer viskoz sönümlenme teorisine dayanan titreşim sırasında sistemdeki enerji dürtüsü göz önüne alındığında,  $i$ . eleman süperpozisyonla şu şekilde bulunur:

$$F_{ci} = c_{i1}\dot{u}_1 + c_{i2}\dot{u}_2 + \dots + c_{ij}\dot{u}_j + \dots + c_{in}\dot{u}_n \quad (3.107)$$

$c_{ij}$   $j$ . k.s.d'si doğrultusunda birim hızdan ( $\dot{u}_j = 1$ )  $i$ . k.s.d'si doğrultusunda oluşmuş kuvvettir.

$i=1, n$  k.s.d'si için sisteme etki eden sönüm kuvveti aşağıda gösterilmektedir:

$$\{F_c\} = [c][\dot{u}] \quad (3.108)$$

Burada [c] sistemin sönümlenme matrisidir. Daha önce uygulamalarda gösterildiği gibi, bir sönümlenme matrisinin elemanları, sönümlenme katsayıları  $c_{ij}$ , sonlu bir sistem serbestliği derecesinin sönümlenme oranlarına bağlı olarak oluşturulmaktadır. Bu nedenle, sönümlenme (katsayılar) matrisi belirli sönümlenme oranlarına göre bulunmaktadır. Sönümlenme oranları bir *d.s.d.* Sistemlerde görüldüğü gibi deneylerle bulunmaktadır.

$\{F_I\}$  Sisteme etki eden atalet kuvvetidir ve *i.* elemanı (*i. k.s.d.* doğrultusunda  $\ddot{u}_i$  ivmesine sistemin gösterdiği tepkidir) aşağıdaki denkleme gösterildiği gibi süperpozisyonla bulunur:

$$F_{Ii} = m_{i1}\ddot{u}_1 + m_{i2}\ddot{u}_2 + \dots + m_{ij}\ddot{u}_j + \dots + m_{in}\ddot{u}_n \quad (3.109)$$

$m_{ij}$  Kütle tesir katsayısı olup, *j. k.s.d.* 'si doğrultusunda birim ivmeden ( $\ddot{u}_j = 1$ ) *i. k.s.d.* 'si hizasında oluşan kuvvettir.

$i=1, n$  *k.s.d.* 'si için sisteme etki eden atalet kuvveti aşağıda göstermektedir:

$$\{F_I\} = [m]\{\ddot{u}\} \quad (3.110)$$

[*m*] Kütle matrisidir ( $m_{ij} = m_{ji}$ ). Kütleler tekil kütleler halinde düğümlere dağıtılsa ve düğüm ağırlık merkezi etrafında burulma ataletinin sistem dinamiğine etkisi ihmal edilirse, kütle matrisi köşegen olur ( $i \neq j$  için  $m_{ij} = 0$ ).

Dış dinamik kuvvetle sisteme sadece *k.s.d.* 'si doğrultusunda uygulanmış dinamik yükler ise, aşağıda gösterilmektedir:

$$\{F(t)\} = \{e_0\}^T \{f(t)\} \quad (3.111)$$

Buradaki  $e_0$  tesir vektörü gösterip, *k.s.d.* doğrultusunda dinamik kuvveti bulunuyorsa (1), bulunmuyorsa (0) değerini içeren vektör elde edilmektedir.

Sistemin dinamik kuvvetleri ve mesnedinin kinematik uyarılmasından oluşan yer ivmesi ( $\ddot{\Delta}$ ) ise, dış kuvvetlerin vektörü aşağıdaki denkleme gösterilir:

$$\{F(t)\} = \{F(t)\}_{etk} = -[m]\{e_*\} \ddot{\Delta}(t) \quad (3.112)$$

Burda  $\{e_*\}$  etki vektörü, sistemin statik temelidir.  $\Delta = 1$  kütlelerin konumunun *k.s.d.* yönünde değişmesidir. Sistem tabanının *k.s.d.* yönünde kinetik uyarılmasından

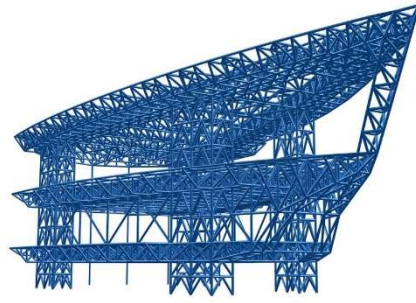
kaynaklanan kuvvetlere etkin kuvvet denmektedir. Yer titreşimlerinden kaynaklanan burulma bileşeni ( $\varphi t$ ) verildiğinde, şu şekilde ifade edilir:

$$\{F(t)\} = \{F(t)\}_{etk} = -[m]\{e_{**}\} \ddot{\varphi}(t) \quad (3.113)$$

Burda  $\{e_{**}\}$  vektör elemanlarının temel sisteme etkisi  $\varphi = 1$  dönmesinden kaynaklanan *k.s.d'*si yönündeki değişikliklerdir.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.114)$$

Sistem hareket denklemlerinden görülebileceği gibi,  $[k]$ ,  $[c]$ ,  $[m]$  matrisleri aynı boyuttadır (sistemin k.s.d.'sine eşittir) ve  $[k]$  matrisinin boyutu ile orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle, matris  $[k]$  için kinematik denklemlerin boyutlarının küçültülmesi prosedürde düzenlenirse, matris  $[c]$  ve  $[m]$  boyutlarının küçültülmesi aynı şekilde ele alınmaktadır.



Şekil 3.3. Çok dinamik serbestlik dereceli

### 3.28. Deneysel Model (DM):

Deneysel model, yapı üzerinde belirli noktalardan alınan ölçümler ile yapının titreşim davranışını gösteren modeldir. Zaman alanında ölçümler alınmaktadır. Frekans tepkisi fonksiyonları (FTF), zaman alanında alınan ölçümlerin frekans alanına dönüştürülmesi ve işlenmesiyle elde edilmektedir. Frekans tepkisi fonksiyonları, modaler analiz yöntemleri kullanılarak işlenip modaler alana dönüştürülmektedir. Böylece deneysel model temsil edilebilmektedir. Teoride mümkün olsa da pratikte tüm serbestlik derecelerini ölçmek mümkün değildir. Deneysel bir model oluşturmak için, ölçümlerin

deneysel ölçüm yöntemlerine göre yapılması ve ölçüm verilerinin uygun model analiz yöntemleriyle işlenmesi gerekmektedir.

### **3.29. Sonlu Eleman Modeli ile Deneysel Modelin Karşılaştırılması:**

Sonlu eleman modeli ile deneysel model arasındaki karşılaştırma, modelin uygulanabilirliği sürecindeki ilk adımdır. Modelin geçerliliğini sağlamak, sistemi tanımlayarak bir sonraki adıma geçmesini sağlar. Model geçerliliğini tanıtmamanın ikinci adımı, deneysel model ile sonlu eleman modeli arasındaki farkları bulmaktır (Ewins, 2000). Pratikte tepki ölçülerine göre elde edilen deneysel model, sonlu eleman modeliyle tam olarak uyumlu olamamaktadır. Ancak iki modelin koordinatları ve boyutlarının yanı sıra koşullu parametreler arasında da uyum vardır. Ancak, tipik parametre çarpışmaları ayrı ayrı tartışılır ve güncellenir. Burada sadece koordinat ve boyutsal çatışmalar incelenir ve bir eşleşme varsa sistem tanımlama aşaması başlamaktadır.

### **3.30. Sistem Tanımlamanın Genel İlkeleri:**

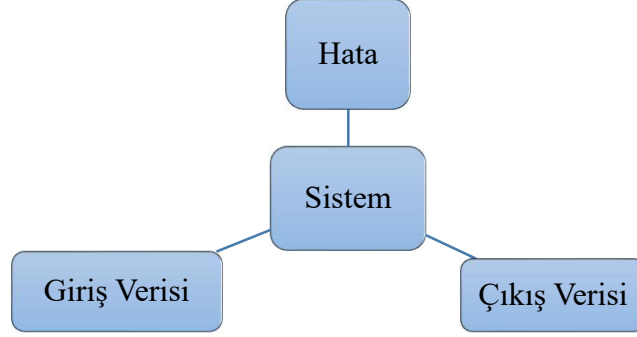
Birimlerden oluşan ve birimleri arasındaki iç ilişkilere ve çevre ile dış ilişkilere göre işleyen gerçek bir küresel olay, süreç veya sistemin belirli bir ifadesine model denmektedir. Anlatım sözlü olarak, çizerek, belli bir ölçekte veya başka bir şekilde fiziksel benzerlik oluşturularak yapılsa da en doğru anlatım bilimin ortak dili olan matematik kullanılarak yapılmaktadır. Genel olarak sistemler, birimleri arasındaki ilişkiler ve çevre ile ilişkileri açısından çok karmaşıktır. Bunlar bazı basitleştirmeler (ihmalller) ve kabullerden sonra modellenmiştir.

Sistem taramasının amacı, sistemin davranışını bilmek, sistemi denetlemek, sistemi yenilemek veya korumak olabilmektedir. Bazı durumlarda, (bilinen) girdi ve çıktıları izleyerek hangi çıktının bilinen girdi sistemine bağlı olacağı veya sistemin kendisi (sistem parametreleri) hakkında bilgi çıkarmanız gerekebilmektedir.

Bazı sistemlerde, istenen çıktıyı elde etmek için çıkış üzerindeki geri bildirimle bağlı olarak sisteme girdiler verilmektedir. Bu tür izleme, geri bildirim olarak adlandırılmaktadır. Gerçek dünyadaki bir olgunun modellenmesi sırasında, ilgilenilen özellikler (hız, ivme, vb) ile modeldeki karşılıkları olan kavramlar (vektör, türev, vb) arasındaki bağ kurulduktan sonra, olgunun ait olduğu bilim dalındaki ilkelere göre modelin yapısı oluşturulur. Çoğu durumda, nasıl ölçüleceğini belirlemek, ölçü birimini

bulmak ve bazı durumlarda ölçme aracını (ölçek, terazi, metre, termometre, anket, test vb.) bulmak için araştırmanın en zor aşamalarından biridir.

Ölçüm sonucunda elde edilen değer, modelde ölçülen karakteristiğe eşdeğer olan değişkenin aldığı değer olarak kabul edilmektedir. Ölçülen özellik rastgeleliği içerdiğinde, modeldeki karşılık gelen değişken normal olarak rastgele bir değişken olarak ele alınacaktır.



Şekil 3.4. Sistem tanımlama şeması

### 3.31. Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırması:

Frekans alanı yaklaşımlarından biri, Frekans Alanı Ayırıştırması'dır (FDD). FDD, Temel Frekans Alanı yaklaşımının bir uzantısıdır ve tepe toplama tekniği olarak adlandırılmaktadır. FDD tanımlamasında ilk adım, güç spektral yoğunluğu (PSD) matrisini tahmin etmektir. Ayırık frekanslarda bilinen çıkış (PSD) tahmini daha sonra matrisin tekil değer ayrıştırması (SVD) alınarak ayrıştırılmaktadır. Spektral matrisin (SVD) alınmasıyla, spektral matris, her biri tek bir serbestlik derecesine (SDOF) karşılık gelen bir dizi çapraz spektral yoğunluk (CSD) (oto spektral yoğunluk) işlevine ayrıştırılmaktadır. CSD işlevlerini, her biri dinamik sistemin tek bir titreşim moduna karşılık gelen tek serbestlik dereceli (SDOF) CSD işlevlerine ayrıştırarak sinyallerin güçlü gürültü kirliliği durumunda bile yakın modlar yüksek doğrulukla tanımlanabilmektedir.

Bir titreşim modunun doğal frekansını ve sönümlenme oranını (CSD) işlevinin karşılık gelen (SDOF) 'si aracılığıyla belirlemek için, (SDOF) işlevi ters Fourier dönüşümü kullanılarak zaman alanına geri döndü ve frekans ve sönümlenme oranı, geçiş süreleri ve logaritmik azalmadan tahmin edilir, Sırasıyla (CSD) işlevleri, yüzde 50

örtüşme ile Hanning pencereleri kullanan Welch-Bartlett'in yöntemine göre tahmin edilmektedir.

FDD teorisi, genel bir n-DOF sistemi için stokastik bir sürecin girdi / çıktı ilişkisine dayanmaktadır.

$$G_{yy}(\omega) = \bar{H}(\omega)G_{xx}(\omega)H^T(\omega) \quad (3.115)$$

Burda,  $G_{xx}$  ve  $G_{yy}(\omega)$  sırasıyla  $(r \times r)$  ve  $(m \times m)$  giriş ve çıkış PSD matrisleridir,  $(r)$  giriş kanallarının sayısı (referanslar) ve  $(m)$  çıkış yanıtlarının sayısıdır (ölçümler). Üst çubuk, karmaşık konjugatı ve tepe sembolü (T) devrikini belirtir. Daha sonra,  $H(\omega)$ , kutup / kalıntı formunda da yazılabilen  $(m \times r)$  Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF) matrisidir.

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{i\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{i\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (3.116)$$

Burda  $n$  modların sayısı göstermektedir.  $H(\omega)$  kare matrisi.

$$R_k = \phi_k \Gamma_k^T \quad (3.117)$$

Burda  $R_k$  ( $m \times r$ ) Kalıntı Matrisi

$$\lambda_k = -\xi_k \omega_k + i\omega_{dk} = -\xi_k \omega_k + i\omega_{dk}(1 - \xi_k^2)^{1/2} \quad (3.108)$$

Burda  $\lambda_k$  FRF'nin kutuplarıdır (karmaşık eşlenik çiftler halinde).

$$G_{yy}(\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{i\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^H}{-i\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{\bar{A}_k}{i\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{A_k^T}{-i\omega - \lambda_k} \quad (3.119)$$

Burada  $(A_k)$ ,  $(k)$  kutbuna  $(\lambda_k)$  karşılık gelen PSD çıktısının kalıntı matrisidir. PSD çıktısının kendisine gelince, kalıntı matrisi bir  $(m \times m)$  Hermitian matristir.

$$A_k = \sum_{s=1}^n \left( \frac{R_s}{-\lambda_k - \lambda_s - \bar{\lambda}_s} \right) G_{xx} R_k^T \quad (3.120)$$

Yapı hafif sönümlendiğinde (küçük sönüm oranları) kutup şu şekilde ifade edilebilir:  $\lambda_k = -\xi_k \omega_k - i\omega_{dk} \cong -\xi_k \omega_k - i\omega_k$  daha sonra,  $k$ 'inci modal frekansın yakınında, kalıntı matrisi aşağıdaki yaklaşık ifade ile ifade edilebilir:

$$A_k = \left[ \frac{R_k}{2(\xi_k \omega_k - i\omega_k)} + \frac{\bar{R}_k}{2\xi_k \omega_k} \right] G_{xx} R_k^T \simeq \frac{\bar{R}_k G_{xx} R_k^T}{2\xi_k \omega_k} = \frac{\bar{\phi}_k \Gamma_k^H G_{xx} \Gamma_k \phi_k^T}{2\xi_k \omega_k} = d_k \bar{\phi}_k \phi_k^T \quad (3.121)$$

Burda  $\bar{R}_k$  paydası  $\xi_k \omega_k$  birine göre baskın olduğundan ve  $2(\xi_k \omega_k - i \omega_k)$  terimi gerçek bir skaler olduğu için sadece  $d_k = \Gamma_k^H G_{xx} \Gamma_k / 2 \xi_k \omega_k$ .

Ardından, Denklemin formülasyonu ile. (3.73), kalıntı matrisi  $A_k$ , mod şekil vektörüne dayalı bir matrisle orantılı hale gelir, yani  $A_k \propto \bar{R}_k G_{xx} R_k^T = \bar{\Phi}_k \Gamma_k^H G_{xx} \Gamma_k \Phi_k^T \propto d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^T$  Denklem. (3.122) Denklem (3.109) biri türetilir:

$$G_{yy}(\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^T}{i\omega - \lambda_k} + \frac{d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^T}{-i\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^H}{i\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^H}{-i\omega - \lambda_k} \quad (3.123)$$

Modal bir frekansın yakınında spektrum çizgileri olan dar bantta, Denklemdaki sadece ilk iki terim. (3.112), paydaları  $-i\omega - \bar{\lambda}_k = \bar{\tau} \simeq \xi_k \omega_k$  son ikisine göre daha küçük olduğu için baskındır,  $i\omega - \bar{\lambda}_k = -i\omega - \bar{\lambda}_k \simeq \xi_k \omega_k + 2i\omega_k$  Bunu hesaba katarak, önceki denklem şu şekilde basitleştirilebilir:

$$G_{yy}(\omega) \simeq \sum_{k=1}^n \frac{d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^T}{i\omega - \lambda_k} + \frac{d_k \bar{\Phi}_k \Phi_k^T}{-i\omega - \bar{\lambda}_k} = \bar{\Phi} \left\{ \text{diag} \left[ \eta e \left( \frac{2d_k}{i\omega - \lambda_k} \right) \right] \right\} \Phi^T \quad (3.123)$$

Burada  $\Phi = [\phi_1 \phi_2 \dots \phi_n]$ , tüm özvektörleri  $\phi_i$  sütun olarak toplayan özvektör matrisidir. Denklem (3.113), spektral matrisin modal bir ayrışmasını temsil eder. Tek bir moddan  $k$  spektral yoğunluk matrisine katkı şu şekilde ifade edilebilir:

$$G_{yy}(\omega) = \bar{\Phi}_k \left\{ \text{diag} \left[ \eta e \left( \frac{2d_k}{i\omega - \lambda_k} \right) \right] \right\} \Phi_k^T = \bar{\Phi}_k \left\{ \text{diag} \left[ \left( \frac{2d_k \xi_k \omega_k}{(\xi_k \omega_k)^2 + (\omega_k - \omega_{dk})^2} \right) \right] \right\} \Phi_k^T \quad (3.124)$$

Bu son form daha sonra SVD tekniği kullanılarak bir takım tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlere ayrıştırılır. İlkinden doğal frekanslar çıkarılır; ikincisinden yaklaşık mod şekilleri elde edilir. Bir rezonans tepe noktası etrafında tanımlanan tekil değer verileri, spektral çan tanımlamayı gerçekleştirmek için ters FFT kullanılarak zaman alanına (TD) geri kaydırılır. Tüm ekstremumlar, yani tepeler ve vadiler, sönümlü bir SDOF sisteminin serbest düşüşü olarak işlev görür, modal sönüm oranını tahmin etmek için düz çizginin eğiminin aşağıdaki doğrusal regresyon işlemlerini gerçekleştirmek için uygun bir zaman penceresi içinde belirlenir. Tahmini sönümlenme oranı ve sönümlü doğal frekanslar bilinerek, sönümlenmemiş doğal frekans da tahmin edilebilir.

#### 4. BULGULAR:

Giriş kısmında algoritması verilmiş, materyal ve metot kısmında teorik detayları anlatılmış deneysel inceleme sistemi ile yapı incelenmiş (betonarme bina) ve sonuçları verilmiştir. Son kısımda, sistem tanımlama metodu başlığı altında teorisi oluşturulmuş olan, teze esas olan yapı parametrelerinin belirlenmesini yazılımı ile yapı incelenmiştir. Sonuçlar, 5. kısımdaki sonuçlar başlığı altında açıklanmıştır.

#### 4.1. Betonarme Binanın Deneysel İnceleme Sistemi ile İncelenmesi:

##### 4.1.1. Binanın Özellikleri:

Kat yüksekliği 8 m'dir. Bina Ön görünüşte (X eksenin üzerinde 6 açıklık aralarında 9m) Yan görünüşte ise (Y eksenin üzerinde 12 açıklık aralarında 9m) ve Üst görünüşte (72 adet döşeme) oluşmaktadır. Tüm plakalar iki yönlü Dişli nervürlü (waffle) döşemedir. Toplam döşeme alanı  $110 \text{ m} \times 55 \text{ m} = 6050 \text{ m}^2$ . Binanın inşaatı 2003 sonbahar aylarında başladı ve 2005 kış aylarında tamamlandı.

	<b>Derinlik (m)</b>	<b>Genişlik (m)</b>
<b>Kolon</b>	0.8	0.8
<b>Kiriş</b>	0.6	1

Tablo 4.1. Kolon ve kiriş ebatları

Beton Türü: C16

Çelik Türü: S220

Beton Basınç Dayanımı:  $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$

Çelik Akma Dayanımı:  $f_{yk} = 220 \text{ MPa}$

Elastisite Modülü  $E_c = 27000 \text{ MPa}$

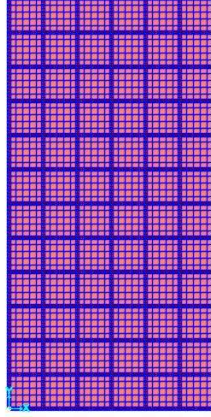
Beton Poisson Oranı = 0.2



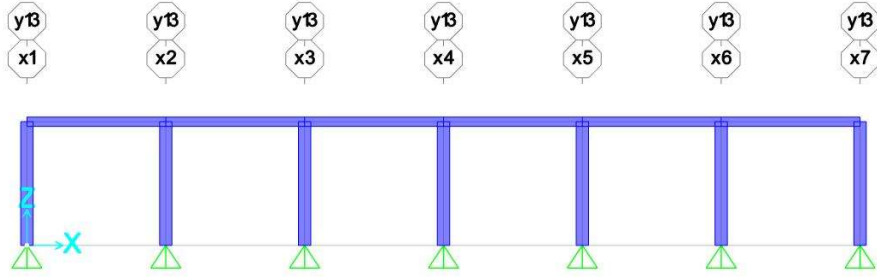
Şekil 4.1. Yapı'nın Dış Görünüşü



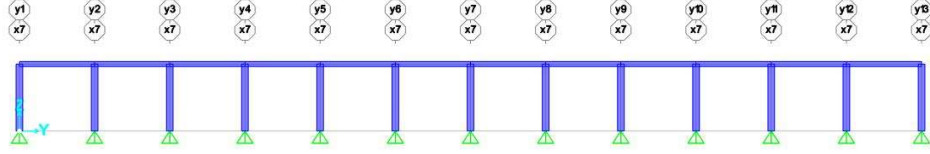
Şekil 4.2. Yapı'nın iç görünüşü



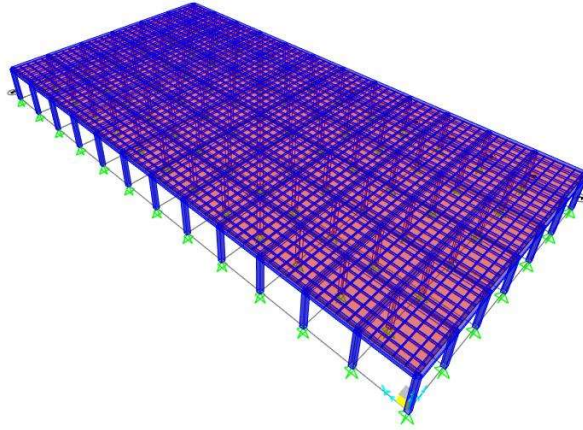
Şekil 4.3. Yapı'nın üstten görünüşü



Şekil 4.4. Yapı'nın önden görünüşü

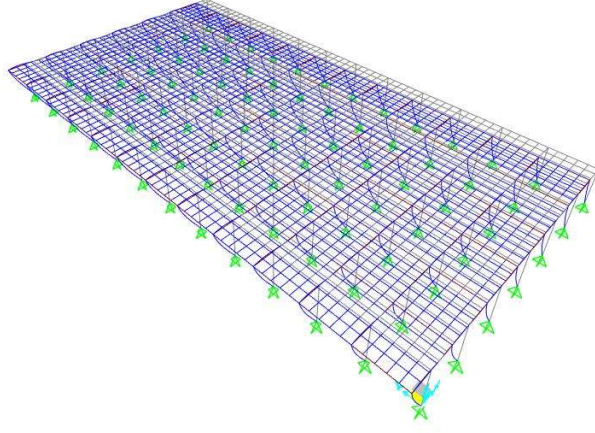


Şekil 4.5. Yapı'nın yandan görünüşü

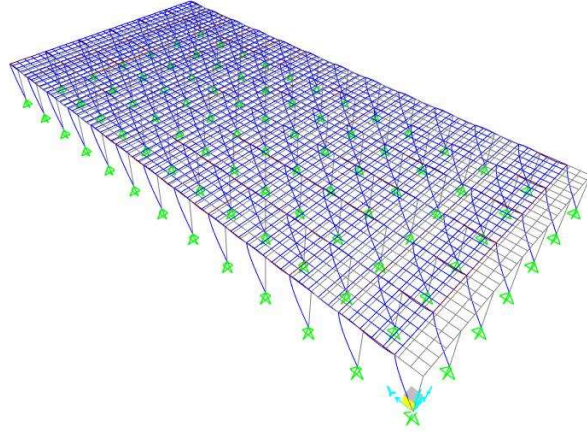


Şekil 4.6. Yapı'nın üç boyutlu görünüşü

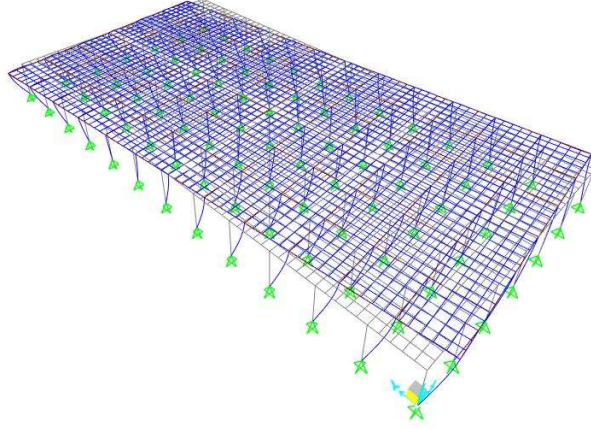
#### 4.2. Sonlu Elemanların Mod Şekilleri:



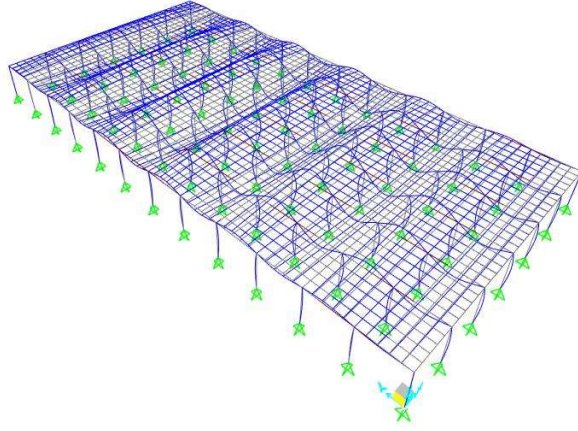
Şekil 4.7. SEM 1. Mod şekli



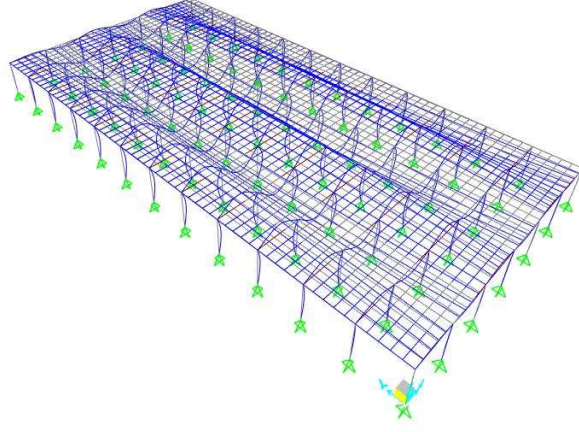
Şekil 4.8. SEM 2. Mod şekli



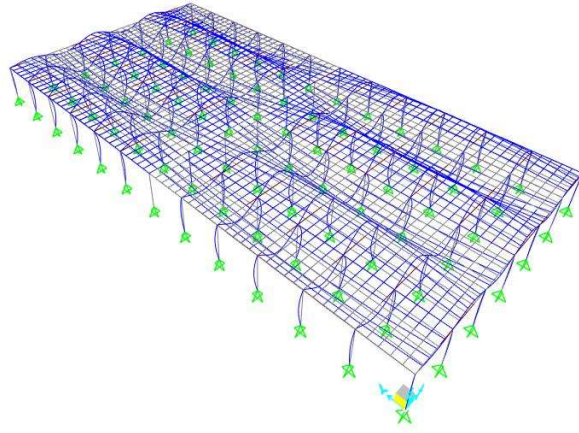
Şekil 4.9. SEM 3. Mod şekli



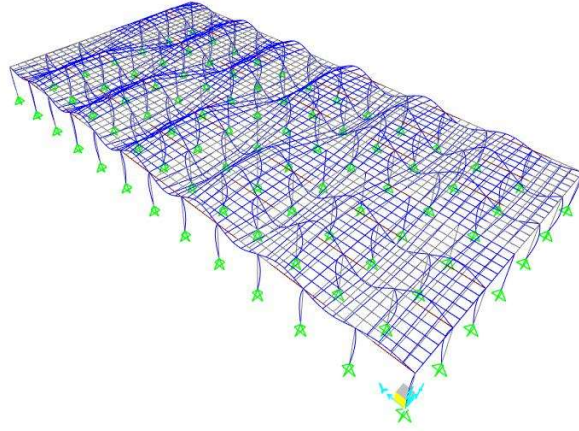
Şekil 4.10. SEM 4. Mod şekli



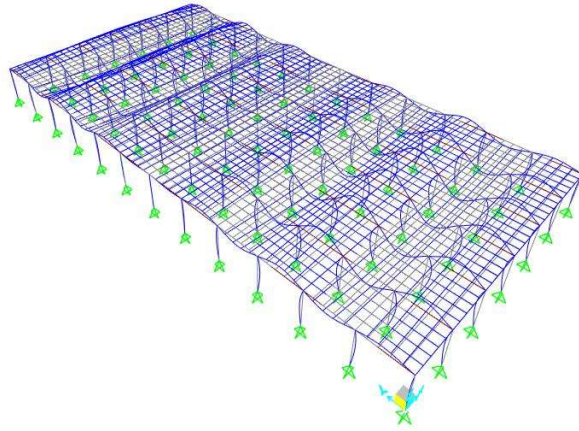
Şekil 4.11. SEM 5. Mod şekli



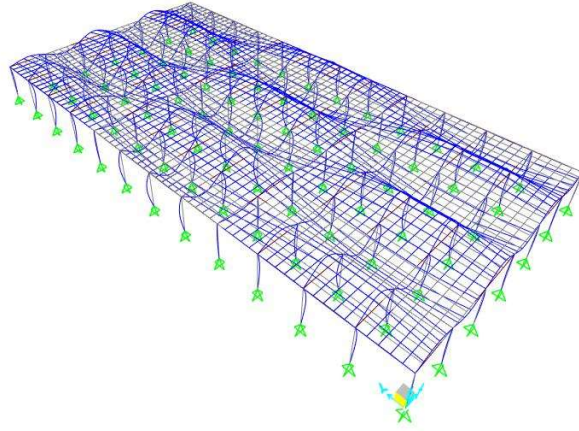
Şekil 4.12. SEM 6. Mod şekli



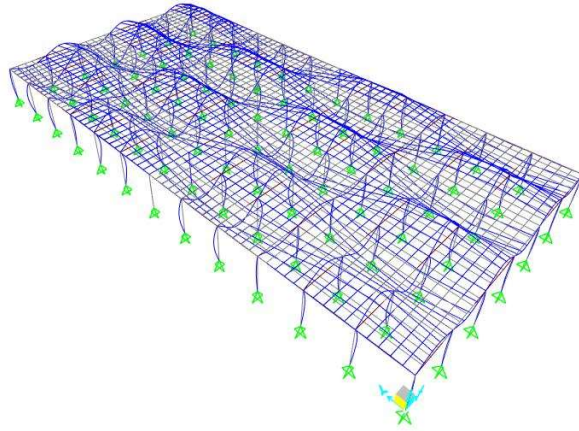
Şekil 4.13. SEM 7. Mod şekli



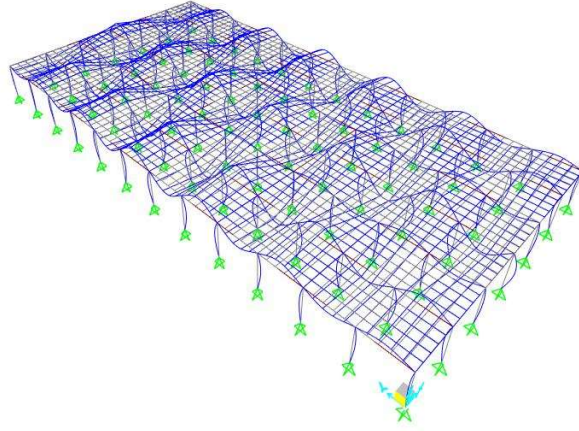
Şekil 4.14. SEM 8. Mod şekli



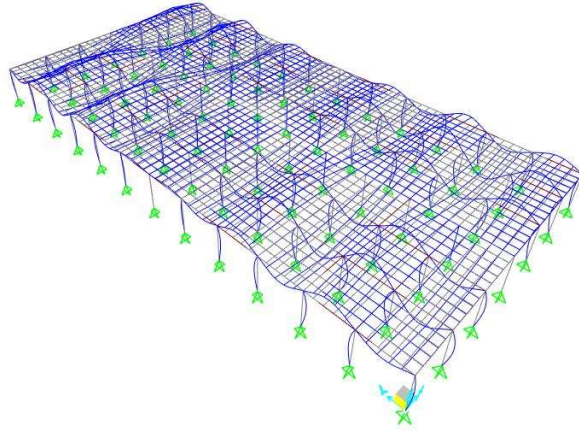
Şekil 4.15. SEM 9. Mod şekli



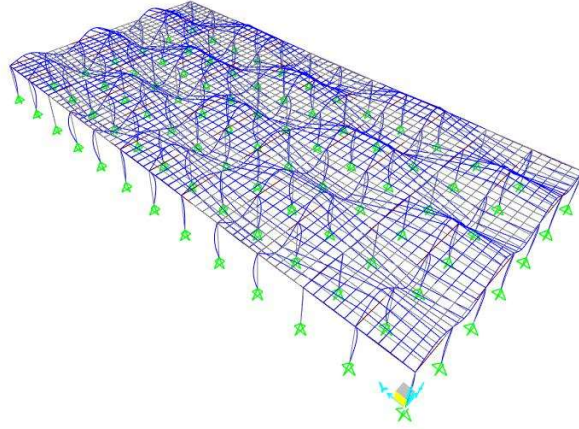
Şekil 4.16. SEM 10. Mod şekli



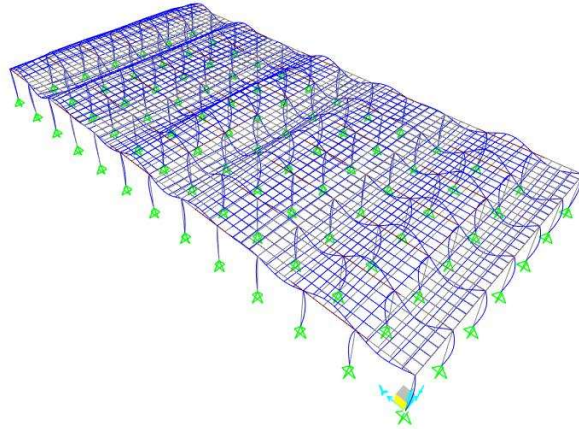
Şekil 4.17. SEM 11. Mod şekli



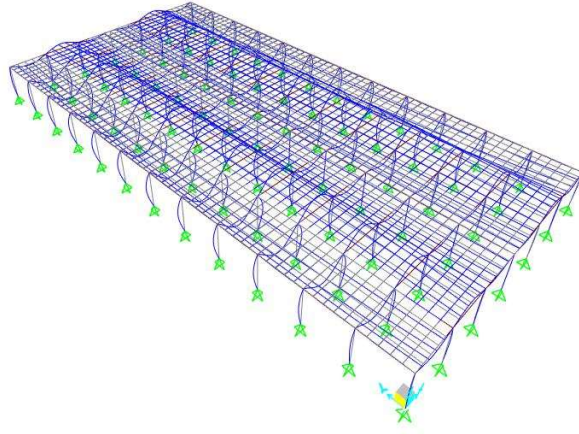
Şekil 4.18. SEM 12. Mod şekli



Şekil 4.19. SEM 13. Mod şekli



Şekil 4.20. SEM 14. Mod şekli



Şekil 4.21. SEM 15. Mod şekli

Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz Sonuçları bina materyal ve metot kısmında detaylı olarak anlatılmış, modellenerek mod şekilleri, titreşim periyotları ve frekansları belirlenmiştir. Binanın sonlu elemanlar modelinde; 830 adet düğüm noktası, 1477 adet çubuk eleman, 72 adet membran– kabuk eleman bulunmaktadır. Mod sayıları 15.

<b>Mod Şekiller</b>	<b>Periyotlar</b>	<b>Frekanslar (Hz)</b>
<b>1</b>	0.858916	1.164258
<b>2</b>	0.844346	1.184348
<b>3</b>	0.767302	1.303269
<b>4</b>	0.074677	13.390946
<b>5</b>	0.074277	13.463036
<b>6</b>	0.073839	13.543069
<b>7</b>	0.073480	13.609237
<b>8</b>	0.073402	13.623612
<b>9</b>	0.073192	13.662254
<b>10</b>	0.072423	13.807805
<b>11</b>	0.071919	13.904439
<b>12</b>	0.071750	13.937324
<b>13</b>	0.071594	13.967685
<b>14</b>	0.071419	14.001897
<b>15</b>	0.070855	14.113393

Tablo 4.2. Sonlu eleman modelinin doğal titreşim periyotları ve frekansları

### 4.3. Çevresel Titreşimler:

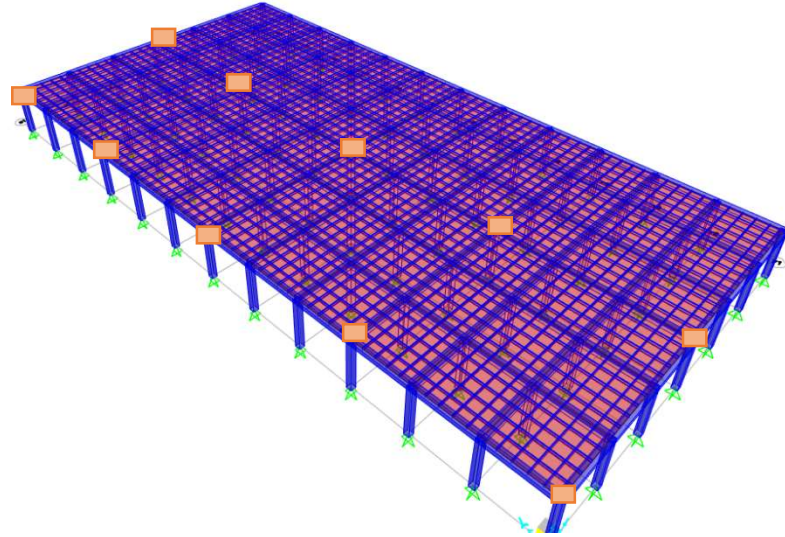
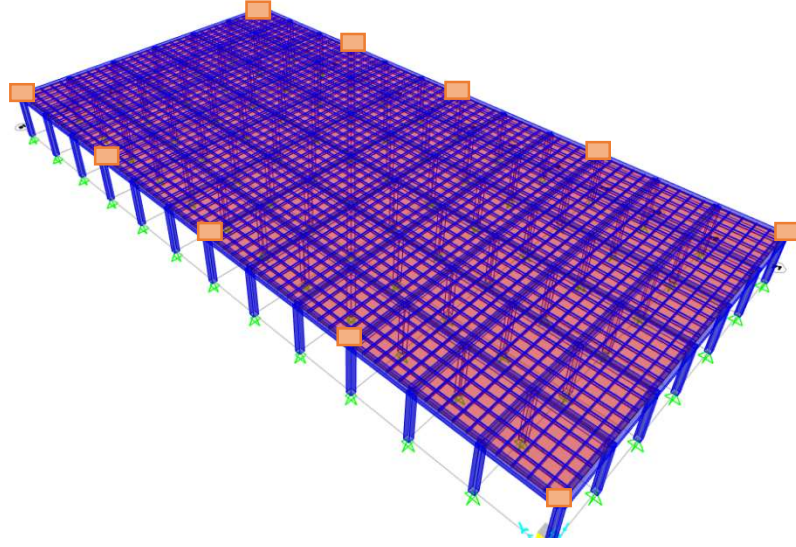
Çevresel titreşimlere mikrotremor denir. Mikrotremorlar, çeşitli kaynaklardan yayılan Dünya üzerinde sürekli titreşimlerdir. Bu küçük sarsıntıların kaynağı da çeşitlidir. Dünyanın belirli bir eksenindeki dönüşü, gelgit etkileri, jeotermal faaliyetler, yer altı sismik faaliyetleri, atmosferik etkiler, rüzgâr ve kültürel gürültü (trafik, endüstriyel faaliyetler ve diğer bazı insan kaynaklı etkiler) olarak hesaplanabilir. Tüm bu faktörler yerdeki titreşimler olarak düşünülebilir. Yerdeki çok küçük titreşimler olarak tanımlayabileceğimiz mikro sensörlerin (bu titreşimlerin genliği 0,1 mikron -1 mikron ve dönüşleri 0,05-2 saniye arasında değişir) yüzey dalgaları mı yoksa cisim dalgaları mı olduğu konusunda birçok araştırmacı farklı görüşlere sahiptir.

Genel olarak, küçük depremler ve diğer bazı derin kaynakların neden olduğu titreşimlerin özellikleri cisim dalgaları ile ilgilidir; Rüzgâr ve diğer sığ insan kaynaklı gürültü, yüzey dalgaları yaklaşımı olarak değerlendirilir. Bir bölgedeki titreşimler o bölgelerde doğal zemin gürültüsüne neden olur. Farklı zemin koşulları için doğal zemin gürültüsü de farklı olacaktır. Bu konsepte dayanarak, basit bir homojen yatay tabakalama ortamı kabul edilerek, alanda kuvvetli yer hareketi verisi olmasa bile doğrudan mikrotrimor ölçümleri ile zeminin efektif periyodunu belirlemek mümkündür.

Yerdeki etkili periyot ve yaklaşık olarak efektif periyotta bulunan büyütme faktörü gibi parametreler, uygun bir cihaz olan hassas bir ölçüm cihazı ile farklı alanlarda ölçümler yapılarak bulunabilmektedir. Sahada doğru ölçümler yapabilmek için, kayıt cihazı, bilgisayar, sismograf sistemi, güç ünitesi ve ilgili çevre birimlerinin yapısına bağlı olarak esas olarak bir kayıt cihazı gereklidir. Mikrotremor cihazları, bina içerisinde istenilen noktada ivme değerini ölçer. Frekans aralığı, eksenler ve ölçüm konumlarına göre türlere ayrılır. Alınan verileri veri toplama birimine gönderir.



Şekil 4.22. Mikrotremor ölçüm aleti (İvmeölçer)



Şekil 4.23. İvmeölçerlerin üç boyutlu görünümde binanın konumu

#### 4.4. Sistem Tanımlama:

##### 4.4.1. Ayrık Zaman Tanımlı Durum-Uzay Modeli:

$$x(t + Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t) \quad (3.76)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t) \quad (3.77)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.61 \text{ +/- } 1.32 & -0.09 \text{ +/- } 1.185 & 0.12 \text{ +/- } 1.52 & 0.06 \text{ +/- } 0.51 & 0.18 \text{ +/- } 1.11 & -0.97 \text{ +/- } 1.26 \\ 0.11 \text{ +/- } 1.73 & 0.33 \text{ +/- } 1.459 & 0.41 \text{ +/- } 1.92 & 0.34 \text{ +/- } 0.72 & 0.73 \text{ +/- } 1.55 & -0.04 \text{ +/- } 1.77 \\ -0.40 \text{ +/- } 2.18 & -0.46 \text{ +/- } 2.333 & -0.41 \text{ +/- } 2.14 & -0.33 \text{ +/- } 0.99 & -0.01 \text{ +/- } 2.09 & 0.21 \text{ +/- } 1.82 \\ -0.20 \text{ +/- } 1.80 & 0.04 \text{ +/- } 1.949 & -0.17 \text{ +/- } 2.97 & 0.42 \text{ +/- } 0.98 & -0.21 \text{ +/- } 2.06 & 1.27 \text{ +/- } 2.58 \\ 0.41 \text{ +/- } 3.30 & 0.53 \text{ +/- } 2.785 & -0.39 \text{ +/- } 4.01 & 0.15 \text{ +/- } 1.39 & -0.21 \text{ +/- } 2.44 & 0.02 \text{ +/- } 3.07 \\ 0.53 \text{ +/- } 1.38 & -0.22 \text{ +/- } 1.748 & 0.51 \text{ +/- } 1.92 & -0.01 \text{ +/- } 0.60 & -0.28 \text{ +/- } 1.61 & -0.39 \text{ +/- } 1.70 \end{bmatrix} \times 10^{14}$$

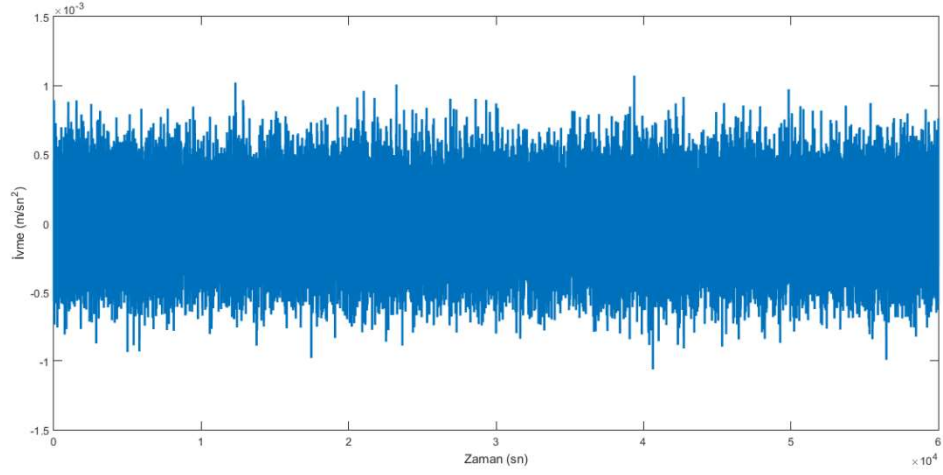
$$B = \begin{bmatrix} -1.24 \times 10^{15} \text{ +/- } 4.28 \times 10^{29} \\ 1.8 \times 10^{15} \text{ +/- } 8.32 \times 10^{29} \\ -1.86 \times 10^{15} \text{ +/- } 5.70 \times 10^{29} \\ 6.77 \times 10^{15} \text{ +/- } 1.06 \times 10^{30} \\ 1.78 \times 10^{15} \text{ +/- } 9.77 \times 10^{29} \\ 8.54 \times 10^{14} \text{ +/- } 7.801 \times 10^{29} \end{bmatrix}$$

$$C = [1.24 \times 10^{-20} \text{ +/- } 1.19 \times 10^{-6} \quad -7.17 \times 10^{-21} \text{ +/- } 1.31 \times 10^{-6} \quad 3.26 \times 10^{-21} \text{ +/- } 1.87 \times 10^{-6} \\ 4.97 \times 10^{-21} \text{ +/- } 7.12 \times 10^{-7} \quad 7.89 \times 10^{-22} \text{ +/- } 1.77 \times 10^{-6} \quad -6.44 \times 10^{-21} \text{ +/- } 1.42 \times 10^{-6}]$$

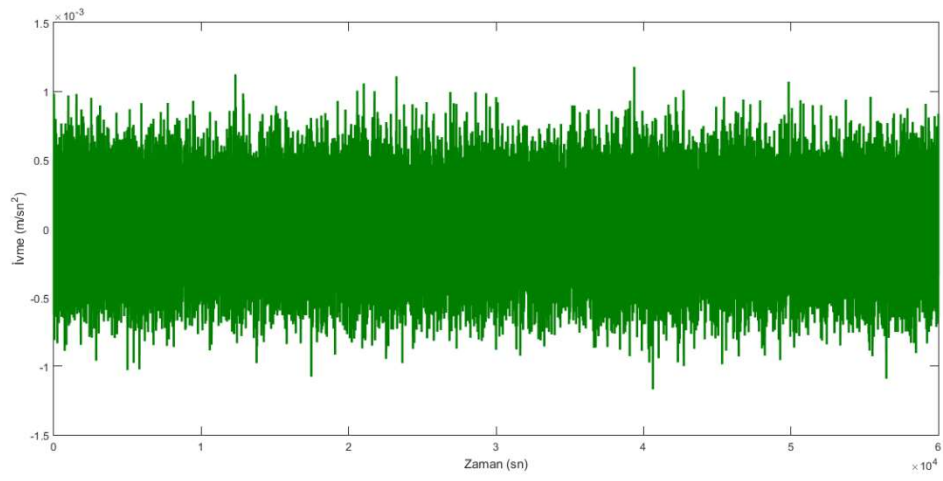
$$D = [1.10 \text{ +/- } 2.84 \times 10^{-6}]$$

$$K = \begin{bmatrix} -1.13 \times 10^{15} \text{ +/- } 1.42 \times 10^{32} \\ 1.64 \times 10^{15} \text{ +/- } 1.09 \times 10^{32} \\ -1.70 \times 10^{15} \text{ +/- } 5.02 \times 10^{31} \\ 6.15 \times 10^{15} \text{ +/- } 1.91 \times 10^{32} \\ 1.62 \times 10^{15} \text{ +/- } 1.31 \times 10^{32} \\ 7.76 \times 10^{15} \text{ +/- } 1.16 \times 10^{15} \end{bmatrix}$$

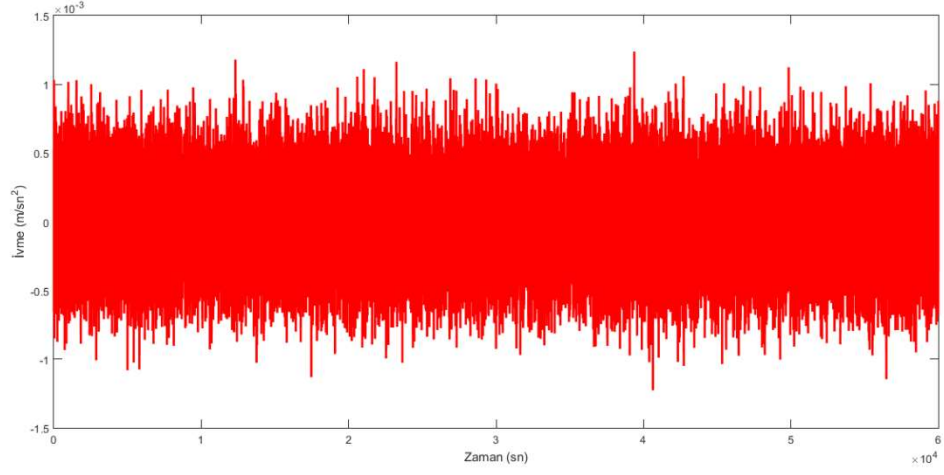
Tahmin verilerine uygunluk:%99,94



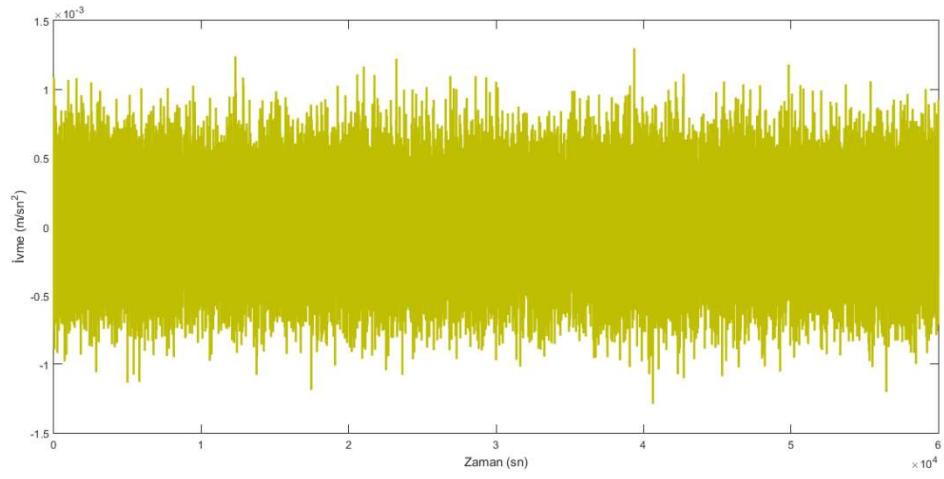
Şekil 4.24. İvme girdi sinyali  $u_1$



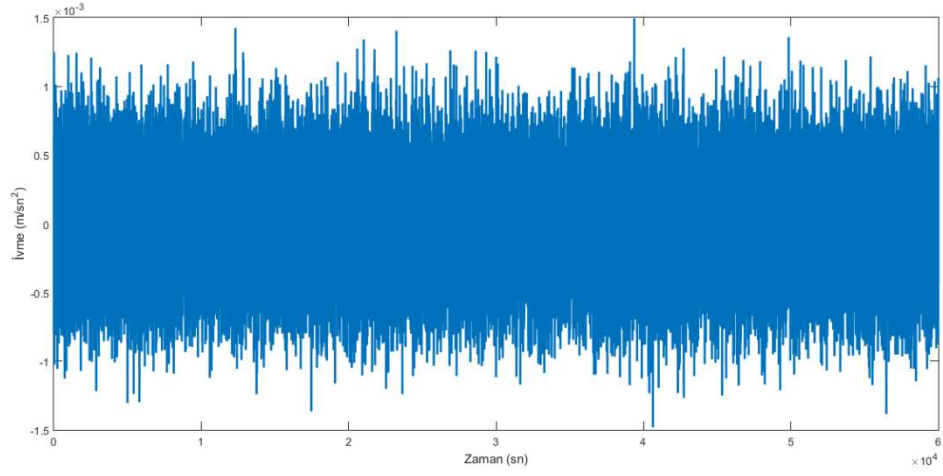
Şekil 4.25. İvme girdi sinyali  $u_2$



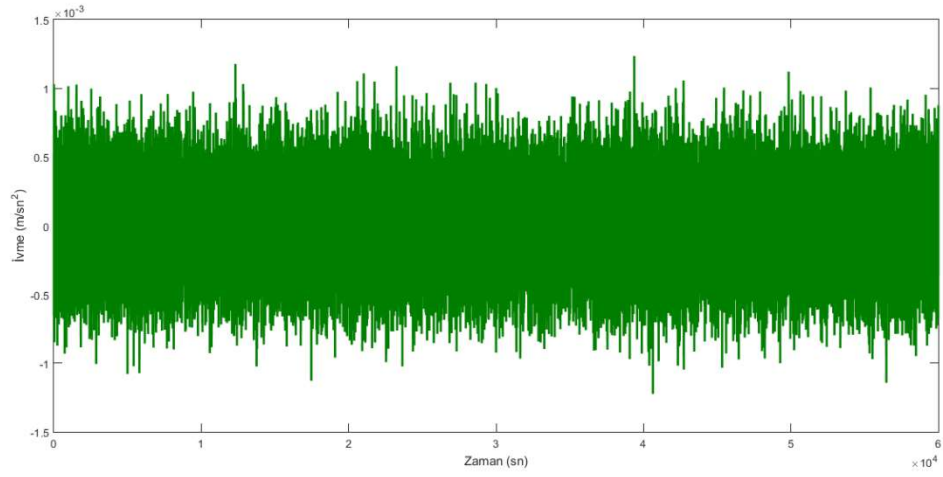
Şekil 4.26. İvme girdi sinyali  $u_3$



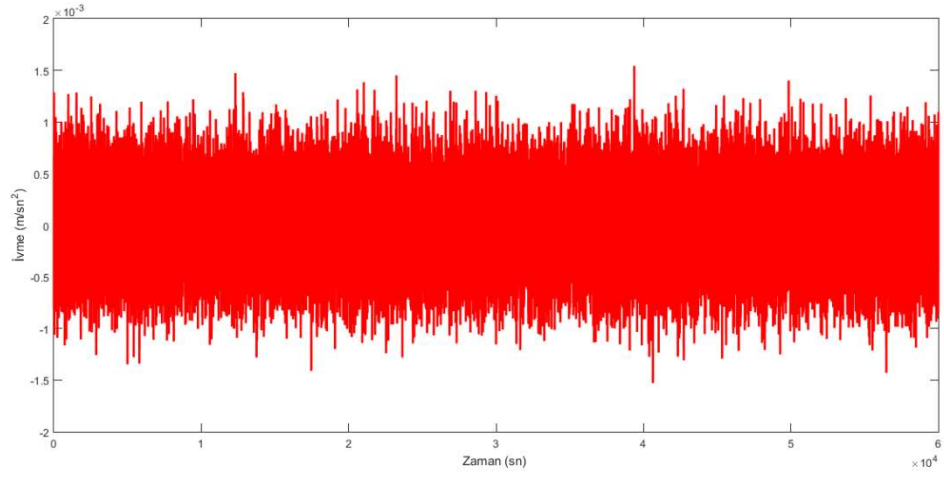
Şekil 4.27. İvme girdi sinyali  $u_4$



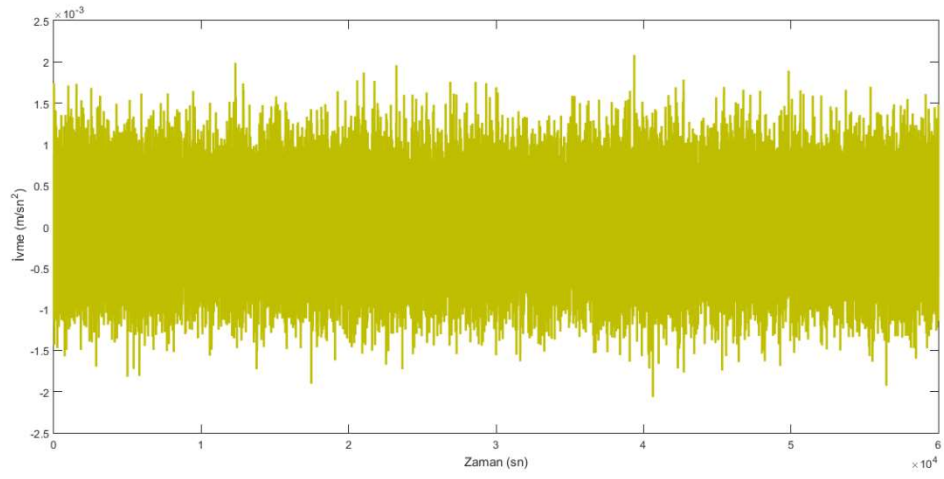
Şekil 4.28. İvme çıktı sinyali  $y_1$



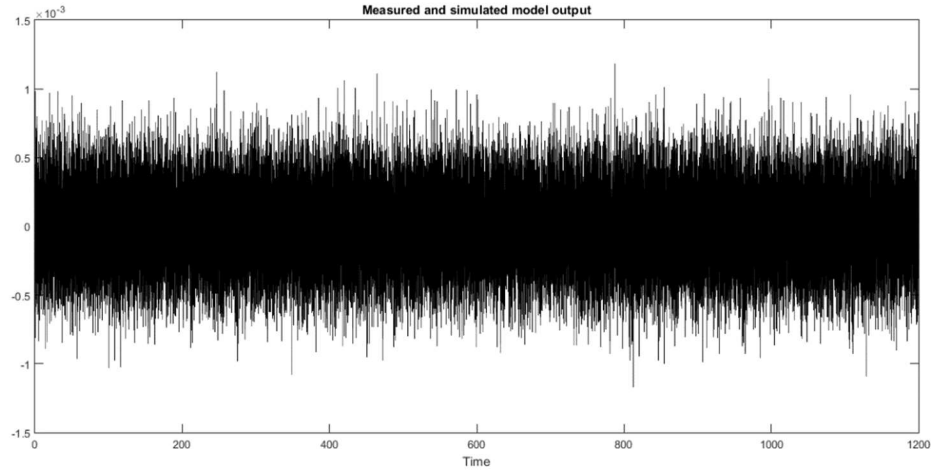
Şekil 4.29. İvme çıktı sinyali  $y_2$



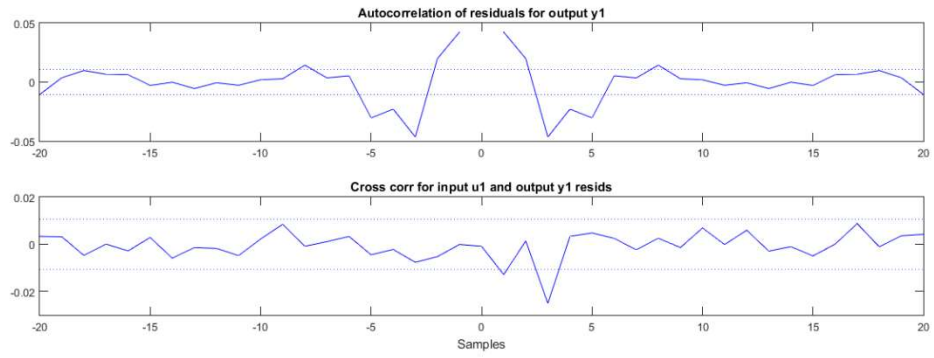
Şekil 4.30. İvme çıktı sinyali  $y_3$



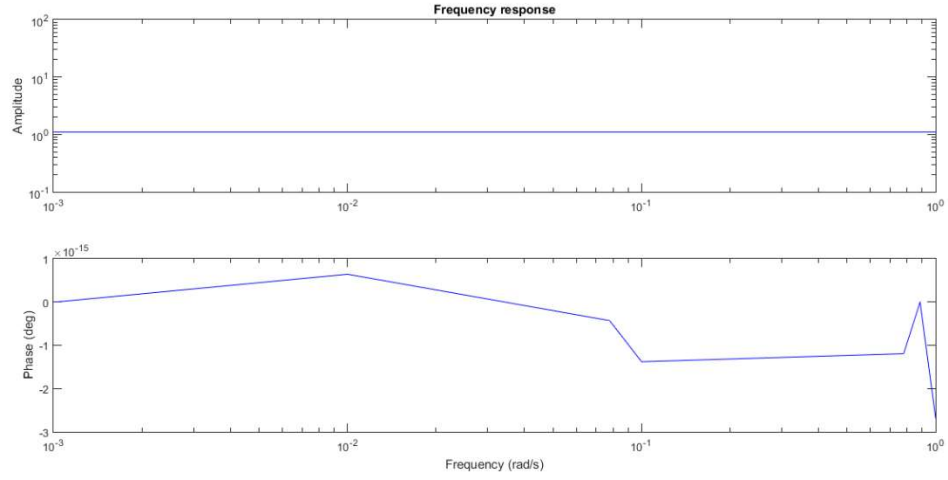
Şekil 4.31. İvme çıktı sinyali  $y_4$



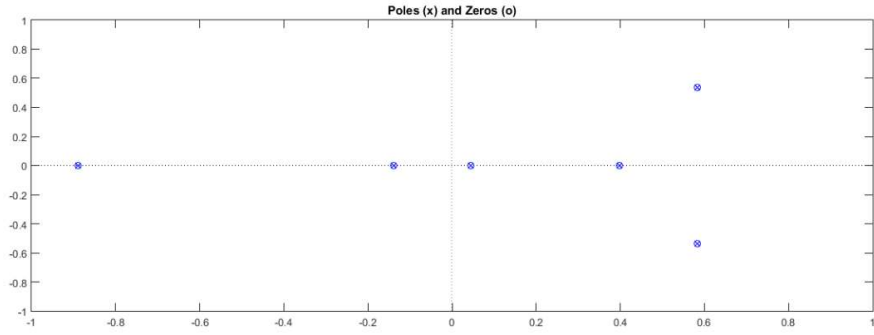
Şekil 4.32. Modelin çıktıları



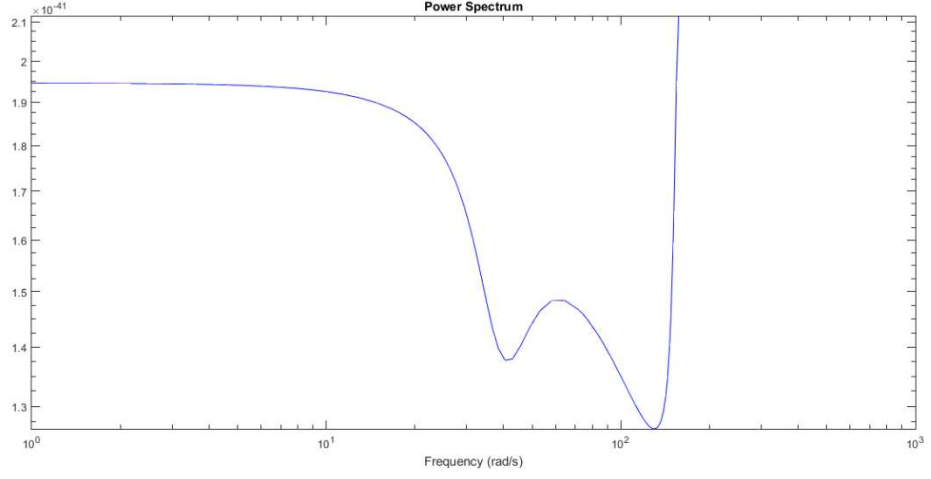
Şekil 4.33. Model kalıntı analizi



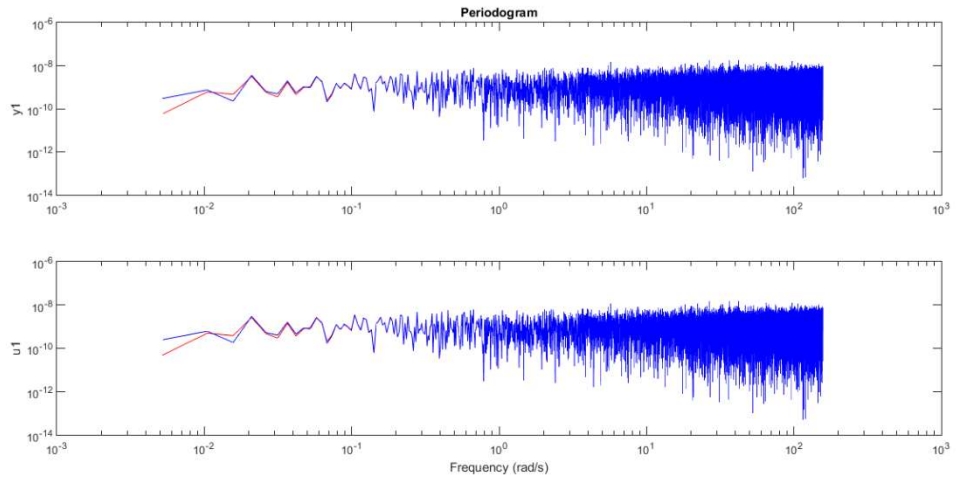
Şekil 4.34. Frekans tepkisi



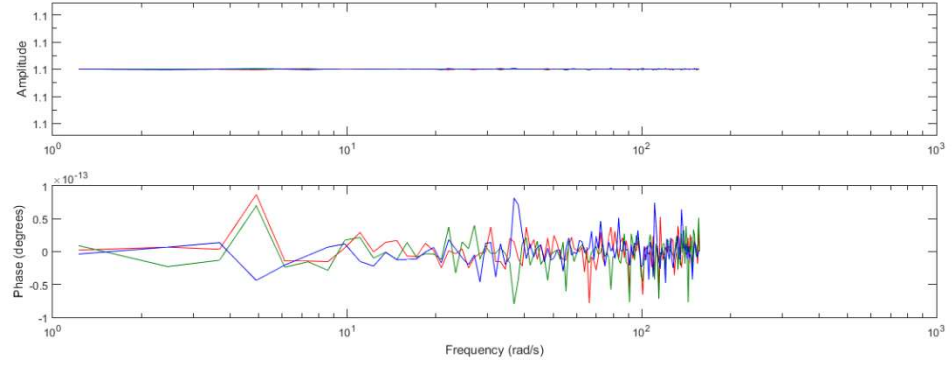
Şekil 4.35. Kutuplar ve sıfırlar



Şekil 4.36. Gürültü spektrumu



Şekil 4.37. Girdi ve çıktı frekansların diyagramı



Şekil 4.38. Genlik ve faz diyagramı

Sırasıyla incelendi:

- 1- A, B, C, D ve K matrisleri
- 2- Tahmin verilerine uygunluk:%99,94
- 3- Girdi ve Çıktı Sinyali
- 4- Model Çıktıları
- 5- Model Kalıntı Analizi
- 6- Frekans Fonksiyonu
- 7- Kutuplar ve Sıfırlar
- 8- Gürültü Spektrumu
- 9- Girdi ve Çıktı Frekansların Diyagramı

#### 4.4.2. Periyotların Karşılaştırılması:

Sonlu elemanlar yöntem ile elde edilen periyotların ve sistem tanımlama yöntem ile elde edilen periyotların aşağıdaki tablo 'da gösterilmiştir.

Mod Şekli	Sonlu Eleman Yöntemin Periyotları	Sistem Tanımlama Yöntemin Periyotları
1	0.858916	0.8591
2	0.844346	0.8444
3	0.767302	0.7674
4	0.074677	0.0747
5	0.074277	0.0743
6	0.073839	0.0739
7	0.073480	0.0734
8	0.073402	0.0734
9	0.073192	0.0732
10	0.072423	0.0725
11	0.071919	0.0719
12	0.071750	0.0717
13	0.071594	0.0716
14	0.071419	0.0714
15	0.070855	0.0709

Tablo 4.3. Sonlu eleman periyotları ve sistem tanımlama periyotları

Periyotların karşılaştığımızda **%99,89** ile %100 arasında uyum göstermektedir.

## 5. SONUÇ:

Bir betonarme binanın dinamik testleri bu tezde tartışılmaktadır. Bina, birinci kata monte edilmiş eksantrik-kütle çalkalayıcı kullanılarak test edildi. Kaydedilen zorlanan titreşimler ile ortam ve serbest titreşimler, Ayırık Zaman Tanımlı Durum-Uzay Modeli yöntemi kullanılarak test yapısının mod parametrelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Deneylerin yürütülmesi için en uygun stratejiyi belirlemek için başlangıçta geliştirilen bir ön SEM modelinden gelen girdilerle tanıtıldı. Testlerden sonra, Sistem Tanımlama Araç Kutusu kullanarak yardımcı olmak ve ayrıca çeşitli yapısal ve yapısal olmayan bileşenlerin yapının dinamik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için kullanılmak üzere revize edilip doğrulandı.

Betonarme binasının sonlu eleman modelinden analitik olarak **1.164258** ile **14.113393** Hz arasında değişen frekans ve **0.070855** ile **0.858916** arasında değişen periyot toplam 15 veri elde edilmiştir. Ortam titreşim testleri, zemin seviyesinde ortam titreşim verileri altında gerçekleştirilmiştir. Modal parametre sistem tanımlama ile gerçekleştirilmiştir.

- I. Sistemin A, B, C, D ve K matrisleri elde edildi.
- II. Giriş ve çıkış sinyalleri elde edildi.
- III. Frekans Fonksiyonu elde edildi.
- IV. Kutuplar ve Sıfırlar elde edildi.
- V. Gürültü Spektrumu elde edildi.
- VI. Model Kalıntı Analizi yapıldı.

Betonarme binanın sistem tanımlaması başarıyla gerçekleştirilmiş ve sistem matrisleri ortaya konulmuştur. Böylece %99,94 oranında matematiksel model oluşturulmuştur. Sistemin sayısal algoritmaları, model girdisi ve model çıktısı kullanılarak başarıyla elde edilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında, sistemin tanımlanmasıyla sistemin dinamik etkilere tepkileri hesaplanmıştır. Sonlu Elemanlar Metodu ile yapılmış olan incelemelerde de Sistem Tanımlama Metodu ile ulaşılmış olan modal sonuçlara aynen ulaşılmıştır. Fiziksel parametrelere geçildiğinde de sonuçların çakıştığı görülmüştür.

Bu, aktif bir araştırma alanı olarak kalmaya devam etmekte çünkü yapıların giderek daha önemli hale gelen sağlık izleme konusunda doğrudan uygulamaları vardır. Güçlü yer

hareketleri gibi bilinmeyen dinamik yüklemeye maruz kalan doğrusal olmayan davranışa sahip büyük gerçek yaşam yapılarının sistem tanımlaması zordur. Bu karmaşık problemin en etkili veya modellenmesi ve çözümünün çoklu paradigma yaklaşımı olduğuna inanılmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR:

Abdalla, M. O., Grigoriadis, K. M., and Zimmerman, D. C. (2000). "Structural damage detection using linear matrix inequality methods." *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 122, No. 4, 448.

Abdel Wahab, M. M., and De Roeck, G. (1999). "Damage detection in bridges using modal curvatures: Application to a real damage scenario." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 2, 217-235.

Alampalli, S., Fu, G., and Dillon, E. W. (1997). "Signal versus noise in damage detection by experimental modal analysis." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.123, No. 2, 237.

Alvin, K. F. (1997). "Finite element model update via Bayesian estimation and minimization of dynamic residuals." *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 5, 879.

Alvin, K. F., Robertson, A. N., Reich, G. W., and Park, K. C. (2003). "Structural system identification: from reality to models." *Comput. Struct.*, 81(12), 1149–1176.

Bajric A., Georgakis C. T., Brincker R. Evaluation of damping using time domain OMA techniques. Proceedings of 2014 SEM Fall Conference and International Symposium on Intensive Loading and Its Effects, Beijing, China, 2014.

Banks, H. T., Inman, D. J., Leo, D. J. and Wang, Y. (1996). "An experimentally validated damage detection theory in smart structures." *Journal of Sound and Vibration*, Volume 191, Issue 5, 859-880.

Barroso, L. R., and Rodriguez, R. (2004). "Damage detection utilizing the damage index method to a benchmark structure." *J. Eng. Mech., ASCE*, Vol.130, 142.

Baruh, H., and Ratan, S. (1993). "Damage detection in flexible structures." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 166, Issue 1, 21-30.

Bassevillea, M., Mevelb, L., and Goursatc, M. (2004). "Statistical model-based damage detection and localization: subspace-based residuals and damage-to noise sensitivity ratios." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 275, 769-794.

Bendat J. S., Piersol A. G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley and Sons, Hoboken, 2011.

Bernal, D. (2002). "Load vectors for damage localization." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 128, No. 1, 7-14.

Bicanic, N., and Chen, H. P. (1997). "Damage identification in framed structures using natural frequencies." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, 4451-4468.

Bishop, C. M. (1994). "Novelty detection and Neural Network validation." *IEE Proc., Vision, Image and Signal Processing*, Vol. 141, No. 4, pp. 217-222, August.

Brandt A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. John Wiley and Sons, Chichester, 2011.

Brincker R., Zhang L. Frequency domain decomposition revisited. *Proceedings of the 3rd International Operational Modal Analysis Conference*, Portonovo, Italy, 2009, p. 615-626.

Brownjohn, J. M. W., Xia, P. Q., Hao, H., and Xia, Y. (2001). "Civil structure condition assessment by finite element model updating: methodology and case studies." *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, 761-775.

Caicedo, J. M., Dyke, S. J., and Johnson, E. A. (2004). "Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for Phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 130, No. 1, 49-60.

Capecchi, D., and Vestrini, F. (1999). "Monitoring of structural systems by using frequency data." *Journal of Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 28, 447-461.

Casas, J. R., and Aparicio, A. C. (1994). "Structural damage identification from dynamic test data." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 8, 2437.

Catbas, F. N., and Aktan, A. E. (2000). "Modal analysis as a bridge health monitoring tool." *Proc. of 14th analysis and computational specialty conference*.

Caughey, T. H., and O'Kelly, M. E. J. (1965). "Classical normal modes in damped linear dynamic systems." *J. Appl. Mech.*, ASME, 32, 583-588.

Cha, P. D., and Switkes, J. P. (2002). "Enforcing structural connectivity to update damped systems using frequency response." *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 6, 1197.

Chang J., Liu W., Hu H., Nagarajaiah S. Improved independent component analysis based modal identification of higher damping structures. *Measurement*, Vol. 88, 2016, p. 402-416.

Chase, J. G., Hwang, K. L., Barroso, L. R., and Mander, J. B. (2005). "A simple LMS based approach to the structural health monitoring benchmark problem." *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Volume 34, Issue 6, 575 - 594.

Chauhan S., Phillips A. W., Allemang R. J. Damping estimation using operational modal analysis. Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, 2008.

Chiang, D. Y., and Lai, W. Y. (1999). "Structural damage detection using the simulated evolution method." *AIAA Journal*, Vol. 37, Issue 10, 1331.

Courant, R. (1943). "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations". *Bulletin of the American Mathematical Society*. 49: 1–23. doi:10.1090/s0002-9904-1943-07818-4.

Daryl L. Logan (2011). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning. ISBN 978-0495668251.

De Callafon, R. A. (2003). "Estimating parameters in a lumped parameter system with first principle modeling and dynamic experiments." *Proc., 13th IFAC Symposium on System Identification*, Rotterdam, the Netherlands, 1613-1618.

Farrar C. R., Doebling S. W., Cornwell P. J. A comparison study of modal parameter confidence intervals computed using the Monte Carlo and Bootstrap techniques. *Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Vol. 2, 1998, p. 936-944.

G.F. Sirca Jr., H. Adeli, *System identification in structural engineering*, *Scientia Iranica A* (2012) 19 (6), 1355–1364.

Gade S., Møller N. B., Herlufsen H., Konstantin Hansen H. Frequency domain techniques for operational modal analysis. *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark, 2005, p. 261-271.

Gintautas, V.; et al. (2008). "Resonant forcing of select degrees of freedom of multidimensional chaotic map dynamics". *J. Stat. Phys.* 130. arXiv:0705.0311. Bibcode:2008JSP...130..617G. doi:10.1007/s10955-007-9444-4. S2CID 8677631.

Hagan, M. T., Demuth, H. B., & Beale, M. H. (1996). *Neural network design*, PWS Pub. Co., Boston, 3632.

Hagan, M. T., & Menhaj, M. B. (1994). Training feed forward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE transactions on Neural Networks*, 5(6), 989-993.

Hrennikoff, Alexander (1941). "Solution of problems of elasticity by the framework method". *Journal of Applied Mechanics*. 8 (4): 169–175.

J. Kim, System Identification of Civil Engineering Structures through Wireless Structural Monitoring and Subspace System Identification Methods, PhD thesis, University of Michigan, 2011.

Jacobsen N., Andersen P., Bricker R. Applications of frequency domain curve-fitting in the EFDD technique. Proceedings of the 26th International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, 2008.

Jeary A. P. Damping in tall buildings – a mechanism and a predictor. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, Issue 5, 1986, p. 733-750.

Kalman, R.E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering, Vol. 83D, 95-108.

Kasımzade A.A., 2005. Finite Element Method: Foundation and Application to Earthquake Engineering (is included education and finite element analysis programs CD) , Istanbul, Beta Publication , (First edition 1997) Second edition, p.827. (ISBN 975-511-379-7)

Kasımzade A.A., 2005. Structural Dynamics: Theory and Application to Earthquake Engineering (is included education and dynamic analysis programs CD) , Istanbul, Beta Publication , (First edition 1998) Second edition, p.527. (ISBN 975-511-381-9)

Kasımzade A.A., 2006. Coupling of the Control System and the System Identification Toolboxes with Application in Structural Dynamics, International Conference Control 2006, Glasgow, Scotland, UK.

Kasımzade A.A., 2006. Fuzzy Finite Element Modeling of Structures under Earthquake Action, the 5 Th International Symposium on Intelligent Manufacturing System.

Kasımzade A.A., 2009. Mathematical Model of the Natural Seismic Protection: Modeling, Implementation, Applications, The 2nd International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI 2009 Orlando, Florida, USA.

Kasımzade A.A., Tuhta S., 2004. Estimation of Sensitivity and Reliability base Isolation Buildings under Earthquake Action, International Symposium on Network and Center-Based for SMART STRUCTURE TECHNOLOGIES AND EARTHQUAKE ENGINEERING, Osaka, Japan.

Kasımzade A.A., Tuhta S., 2005. Finite Element ,Analytical, Experimental Investigation of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP and Related Structure Analysis Problem's Solutions , AACEU, Scientific Works No 2, p.18.

Kasımzade A.A., Tuhta S., 2005. Performance of Reinforced Concrete Columns Confined by Composite Wraps , AACEU, Scientific Works No 2, p.13.

Kasımzade A.A., Tuhta S., Bal S., 2009. Natural Seismic Protection Peculiarities of Historical “Walled Obelisk” Structure In Istanbul: Modeling And Numerical Approach, SMART STRUCTURES AND MATERIALS, SMART 09, Porto-Portugal

Kasımzade, A. A., Tuhta, S. 2007. Ambient Vibration Analysis of Steel Structure, First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, 9p.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., 2005. Ambient Vibration Test on Detection of Dynamic Properties of Reinforced Concrete Building, First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, p. 345-352.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., 2006. The Eigensensitivity-Based Finite Element Model Updating Benchmark Model, 7th International Congress on. Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey, 9p.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., 2007. Ambient Vibration Analysis of Steel Structure, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07), Porto, Portugal, 10p.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., 2007. Particularities of Monitoring, Identification, Model Updating Hierarchy in Experimental Vibration Analysis of Structures, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07), Porto, Portugal, 10p.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., 2008. A Novel Approach for Modal Identification from Ambient Vibration, SEISMIC ENGINEERING INTERNATIONAL CONFERENCE, MERCEA '08, Reggio Calabria and Messina, July 8-11, Italy.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., 2009. Optimal Estimation the Building System Characteristics for Modal Identification, INTERNATIONAL OPERATIONAL MODAL ANALYSES CONFERENCE, IOMAC 2009, Porto Novo (Ancona), Italy.

Kasımzade, A.A., Tuhta, S., Uslu, A., 2006. Finite Element Modal Updating of Reinforce Concrete Building Use of Ambient Vibration Measurements, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES), Geneva, Switzerland, 10p.

Kasımzade, A., Tuhta, S., Aydin, H., & Günday, F. (2019). Determination of Modal Parameters on Steel Model Bridge Using Operational Modal Analysis. Presented at the 8th International Steel Structures Symposium, Konya.

Katok, A.; Hasselblatt, B. (1995). Introduction to the Modern Theory of Dynamical Systems. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-34187-5.

Lamb M., Rouillard V. Some issues when using Fourier analysis for the extraction of modal parameters. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 181, 2009, p. 012007.

Lus, H., Betti, R., and Longman, R. W. (2002). "Obtaining refined first order predictive models of linear structural systems." Earthquake Eng. Struct. Dyn., 31(7), 1413-1440.

Maia N. M. M., Silva J. M. M. Theoretical and Experimental Modal Analysis. Research Studies Press, Tounton, England, 1997.

Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2), 431-441.

MATLAB. (2010). version 7.10.0 (R2010a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

Melby, P.; et al. (2005). "Dynamics of Self-Adjusting Systems With Noise". Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 15 (3): 033902. Bibcode:2005Chaos..15c3902M. doi:10.1063/1.1953147. PMID 16252993.

Output-only Nonlinear System Identification of Civil Structures using Sparse Measurement Data Hamed Ebrahimian Assistant Professor Department of Civil and Environmental Engineering University of Nevada, Reno (UNR).

Özbek, L. 1993. Kesikli-Zaman Durum-Uzay Modelleri ve İndirgemeli Tahmin. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara.

Özbek, L. 1997. A Study on Adaptive Kalman Filter. ISI'97, Bulletin of the International Statistical Institute, Proceedings Book 2; 299-300, İstanbul.

Özbek, L., Öztürk, F. 1993. Kalman Filtresi ve Gayri Safi Milli Hasıla Üzerine Bir Uygulama. I. Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu, Sempozyum Bildiriler Kitabı; 99-105, İzmir.

Özbek, L., Öztürk, F., Aliev, F.A. 1996. Kalman Filtresinde Kayıpları Önlemek İçin Bir Yöntem. TOK'96, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul. Boğaziçi Üniversitesi Yayın No:588; 31-37, İstanbul.

Özşahin O., Özgüven H. N., Erhan B. Analysis and compensation of mass loading effect of accelerometers on tool point FRF measurements for chatter stability predictions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, Issue 6, 2010, p. 585-589.

Phan, M., Horta, L. G., Juang, J.-N., and Longman, R. W. (1992). Identification of linear systems by an asymptotically stable Observer. NASA Technical Paper TP-3164, Langley Research Center, Hampton, Virginia.

Phan, M., Juang, J. N., and Longman, R. W. (1991). On Markov parameters in system identification. NASA Technical Memorandum 104156, Langley Research Center, Hampton, Virginia.

Pioldi F. On the Formulation of Optimized Algorithms of Modal Dynamic Identification and Their Application in Seismic Field. M.Sc. Thesis, University of Bergamo, 2013.

Pioldi F., Ferrari R., Rizzi E. Output-only modal dynamic identification of frames by a refined FDD algorithm at seismic input and high damping. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 68, Issue 69, 2016, p. 265-291.

Reddy, J. N. (2006). *An Introduction to the Finite Element Method* (Third ed.). McGraw-Hill. ISBN 9780071267618.

Rodrigues J., Brincker R., Andersen P. Improvement of frequency domain output-only modal identification from the application of the random decrement technique. *Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference*, Dearborn, Michigan, 2004.

Silverman, L. M. (1971). "Realization of linear dynamical systems." *IEEE Trans. Automat. Control*, AC-16(6), 554-567.

Strogatz, S. H. (2001). *Nonlinear Dynamics and Chaos: with Applications to Physics, Biology and Chemistry*. Perseus.

Tamura Y., Zhang L., Yoshida A., Nakata S., Itoh T. Ambient vibration tests and modal identification of structures by FDD and 2DOF-RD technique. *Structural Engineers World Congress*, Yokohama, Japan, 2002.

Tuhta, S., & Günday, F. (2019). Multi Input Multi Output System Identification of Concrete Pavement Using N4SID. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research Development*, 4(1).

Tuhta, S., Alameri, I., & Günday, F. (2019). Numerical Algorithms N4SID for System Identification of Buildings. *International Journal of Advanced Research in Engineering Technology Science*, 1(6).

Tuhta, S., Günday, F., Aydin, H., & Alalou, M. (2019). MIMO System Identification of Machine Foundation Using N4SID. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research Development*

Tuhta, S., & Günday, F. (2019). MIMO System Identification of Industrial Building Using N4sid with Ambient Vibration. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*.

Tuhta, S., & Günday, F. (2019). Multi Input Multi Output System Identification of Concrete Pavement Using N4SID. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research Development*, 4(1),

Tuhta, S., Alameri, I., & Günday, F. (2019). Numerical Algorithms N4SID for System Identification of Buildings. *International Journal of Advanced Research in Engineering Technology Science*, 1(6)

Tuhta, S., Günday, F., & Abrar, O. (2019). Experimental Study on Effect of Seismic Damper to Reduce the Dynamic Response of Bench Scale Steel Structure Model. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 5(5), 901–911.

Tuhta, S., Günday, F., & Aydin, H. (2019). Numerical Algorithms for System Identification of Benchmark Steel Structure. Presented at the iSTE-CE'xx2019- International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering.

Tuhta, S., Günday, F., Alalou M. (2019). Determination of System Parameters on Model Lighting Pole Using ANN by Ambient Vibration. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI) | Volume VI, Issue XI, November 2019 | ISSN 2321–2705*

Tuhta.S., Gunday F., Aydin H., Dynamic Analysis of Model Steel Structures Retrofitted with GFRP Composites under Microtremor Vibration *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) Volume: 3 | Issue: 2 | Jan-Feb 2019*.

Tuhta.S., Abrar O., Gunday F., Experimental Study on Behavior of Bench-Scale Steel Structure Retrofitted with CFRP Composites under Ambient Vibration, *European Journal of Engineering Research and Science*, 2019.

Veletsos, A. S., and Ventura, C. E. (1986). "Modal analysis of non-classically damped linear systems." *Earthq. Engng. Struct. Dyn.*, 14(2), 217-243.

Vol. 58, No. 4, 741-761.

Wong, L. A., and Chen, J. C. (2000). "Damage identification of nonlinear structural systems." *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 8, 1444.

Worden, K. (1997). "Structural fault detection using a novelty measure." *Journal of Sound and Vibration*, 201, 85-101.

Worden, K., Manson, G., and Allman, D. (2003). "Experimental validation of a structural health monitoring methodology: Part I. Novelty detection on laboratory structure." *Journal of Sound and Vibration*, Volume 259, Issue 2, Pages 323-343.

Worden, K., Manson, G., and Fieller, N. J. (2000). "Damage detection using outlier analysis." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 229, 647-667.

Worden, K., Sohn, H., and Farrar, C. R. (2002). "Novelty detection in a changing environment: regression and interpolation approaches." *Journal of Sound and Vibration*,

Xia, Y., and Hao, H. (2003). "Statistical damage identification of structures with frequency changes." *Journal of Sound and Vibration*, Volume 263, Issue 4, Pages 853-870.

Xia, Y., Hao, H., Brownjohn, J. M. W., and Xia, P. Q. (2002). "Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data." *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol. 31, 1053- 1066.

Xu, B, Wu, Z. S. and Yokoyama K. (2003). "Response time series based structural parametric assessment approach with neural networks." *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures*. Vol. 1: 601-609.

Xu, Y. L., and Chen, J. (2004). "Structural damage detection using empirical mode decomposition: experimental investigation." *J. Engrg. Mech., ASCE*, 130, 1279.

Yang, J. N., Lei, Y., Lin, S., and Huang, N., (2004). "Hilbert Huang based approach for structural damage detection." *J. Engrg. Mech., ASCE*, 130, 85.

Zhang L., Tamura Y. Damping estimation of engineering structures with ambient response measurements. *Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, Florida, 2003.

## ÖZ GEÇMİŞ



Mohammad Alalou, 31.08.1993 tarihinde Suriye Rakka şehrinde doğdu. Harun Elreşit Lisesini bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölüm'ünde 2019 yılında mezun oldu. 2019 yılında Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans yapmaya başladı. Ana dil Arapça iyi derecede Türkçe ve orta derecede İngilizce bilmektedir.

### İletişim Bilgileri

E mail : mohamadalou93@live.com

Telefon : +90 (538) 031 05 97

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9015-2213>.

Linkedin: <https://www.linkedin.com/in/mohammad-al-alou-57107189/>

### Yayınlanmış Çalışmalar:

1. MIMO System Identification of Machine Foundation Using N4SID.
2. Determination of System Parameters on Model Lighting Pole Using ANN by Ambient Vibration.
3. Çelik Model Köprünün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modal Analizi.
4. Kablo Elemanlar ile Güçlendirilmiş Çelik Deney Yapısının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modal Analizi.