

**YAPI PARAMETRELERİNİN
TAHRİBATSIZ BELİRLENMESİ**

SERTAÇ TUHTA

DOKTORA TEZİ

**TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA
ANABİLİM DALI**

T.C.
ONDOKUZMAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI PARAMETRELERİNİN TAHRİBATSIZ BELİRLENMESİ

SERTAÇ TUHTA

DOKTORA TEZİ

TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA ANABİLİM DALI

DANIŞMAN

PROF. DR. AZER A. KASIMZADE

SAMSUN – 2010

ÖZ

Bu tez, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiş MF-046 nolu “Binaların Deprem Özelliklerinin Tahribatsız Tayini Yönteminin Tasarlanması” konulu proje kapsamında yapılmıştır.

Çeyrek asırlık bir süreden beri, yapıların tahribatsız olarak parametrelerinin belirlenmesi, sistem tanımlama ve hasar belirleme için farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada yapı parametrelerinin tahribatsız olarak belirlenmesi, bununla bağlı olarak sistem tanımlama, model güncelleme ve hasar belirleme yöntemleri ayrıntılı olarak incelenerek, yeni bir hesaplama algoritması ve beraberinde bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir.

Birinci bölümde genel bilgiler, konunun güncelliği ve önemi üzerinde durulmuştur.

İkinci bölümde konuyla ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar ve bazı temel bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde çalışmada kullanılmış materyaller ve metotlar ile ilgili geniş bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde elde edilmiş olan bulgulara yer verilerek sonuç kısmına hazırlık yapılmıştır.

Beşinci bölümde elde edilmiş olan sonuçlar irdelenerek, konu ile ilgili öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar metodu, sistem tanımlama, model güncelleme, modal parametre belirleme, fiziksel parametre belirleme

ABSTRACT

This thesis has been made in the scope of MF-046 “Non-Destructive Evaluation Dynamic Properties of Building Structures and Health Monitoring” supported by Ondokuz Mayıs University Scientific Research Projects Commission.

Since a quarter century period, various methods have been developed for nondestructive determination of structure parameters, system identification and determination of damage.

In this thesis, new calculation algorithm and computer software concerned with it was developed by examining nondestructive determination of structure parameters and system identification depending on it, model updating and determination of damage methods in detail.

In chapter one, general information, actuality of the subject and its importance were presented.

In chapter two, previously conducted studies and some basic information about the subject were given.

In chapter three, wide information about materials and methods used for this thesis were given.

In chapter four, preparation for result section was made by ranking obtained findings.

In chapter five, recommendations about the subject were presented by examining the results of the study.

Keywords: Finite element methods, system identification, model updating, determination of modal parameters, determination of physical parameters

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 Prof. Dr. Azer A. KASIMZADE' ye minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini paylaşan Sayın Hocalarım Prof. Dr. Yusuf DEMİR, Prof. Dr. Çetin YILMAZ, Prof. Dr. Hikmet Hüseyin ÇATAL ve Yrd. Doç Dr. Zeki KARACA' ya ayrı ayrı teşekkür ederim. Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Öğrenim hayatım süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta annem K. Nimet TUHTA ve babam Fikret TUHTA olmak üzere tüm aile fertlerine teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmasının ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Sertaç TUHTA

Samsun 2010

İÇİNDEKİLER

| Başlık Adı | Sayfa No |
|--|-----------------|
| ÖZ | iii |
| ABSTRACT | iv |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER | vi |
| SİMGELER LİSTESİ | ix |
| KISALTMALAR LİSTESİ | xiii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xiv |
| ÇİZELGELER LİSTESİ | xix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. GENEL BİLGİLER | 4 |
| 3. MATERYAL ve METOT | 25 |
| 3.1. Tepki Ölçümleri | 25 |
| 3.1.1. Çevresel Titreşimler | 26 |
| 3.1.2. Yapay Titreşimler | 28 |
| 3.1.3. Amaç ve Yöntem | 30 |
| 3.1.4. Veri Analizi | 32 |
| 3.1.5. Modal Frekanslar | 33 |
| 3.1.6. Mod Şekilleri | 34 |
| 3.1.7. Sönüm Oranları | 35 |
| 3.1.8. Burulma Titreşimleri | 36 |
| 3.1.9. Öteleme Titreşimleri | 37 |
| 3.1.10. Yapı-Zemin Etkileşimi | 37 |
| 3.2. Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) | 39 |
| 3.2.1. Yapıların Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi | 41 |
| 3.2.2. Çok Dinamik Serbestlik Dereceli Yapıların Hareket Denklemlerinin Düzenlenmesi | 47 |
| 3.2.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Gerçek Yapı ile Uyumsuzlukları | 50 |
| 3.2.3.1. Sayısal Modellemenin Pratik Sınırlarından Kaynaklanan Uyumsuzluklar | 51 |
| 3.2.3.2. Sayısal Modeldeki Sayısal Değerlerden Kaynaklanan Uyumsuzluklar | 51 |
| 3.3. Deneysel Model (DM) | 52 |
| 3.4. Sonlu Elemanlar Modeli ile Deneysel Modelin Karşılaştırılması | 53 |
| 3.5. Sistem Tanımlamanın Genel İlkeleri | 53 |
| 3.5.1. Lineer Durum-Uzay Modelleri | 54 |
| 3.5.1.1. Sürekli Zaman Lineer Durum Uzay Modelleri | 54 |
| 3.5.1.2. Kesikli Zaman Lineer Durum Uzay Modeli | 56 |
| 3.5.2. Kontrol Edilebilme, Gözlemlenebilme, Kararlı Olabilme ve Teşhis Edilebilme Kavramları | 57 |
| 3.5.2.1. Kontrol Edilebilme | 58 |
| 3.5.2.2. Gözlemlenebilme | 58 |
| 3.5.2.3. Kararlı Olabilme | 59 |
| 3.5.2.4. Ortaya Çıkarılabilme, Teşhis Edilebilme | 60 |
| 3.5.3. Kalman Filtresi | 61 |
| 3.5.3.1. Zamandan Bağımsız Riccati Denklemi | 65 |
| 3.5.3.2. Lineer Olmayan Durum Uzay Modeli ve Genişletilmiş Kalman | 67 |

| | |
|--|-----|
| Filtresi | |
| 3.6. Sistem Tanımlama Metodu | 71 |
| 3.6.1. Karakutu Modelinin Tanımlanması | 72 |
| 3.7. Hassaslık Değerlendirmesi | 76 |
| 3.7.1. Korelasyon Katsayıları | 76 |
| 3.7.2. Hassaslık Analizi | 78 |
| 3.7.3. Hassaslık Analizi İçin Parametre Seçimi | 79 |
| 3.7.4. Hassaslık Analizi İçin Tepki Seçimi | 80 |
| 3.8. Model Güncelleme | 80 |
| 3.8.1. Doğrudan Metotlar | 80 |
| 3.8.1.1. Lagrange Çarpanları Metodu | 81 |
| 3.8.1.2. Lanczos Altküme Metodu | 87 |
| 3.8.1.3. Modal Hessenberg Metodu | 88 |
| 3.8.1.4. Kontrol Teorisi Metotları | 91 |
| 3.8.2. Tekrarlı Metotlar | 91 |
| 4. BULGULAR | 94 |
| 4.1. Betonarme Binanın Deneysel İnceleme Sistemi ile İncelenmesi | 94 |
| 4.1.1. Binanın Özellikleri | 94 |
| 4.1.2. Deneysel Ölçüm ve Sonuçları | 97 |
| 4.1.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz Sonuçları | 106 |
| 4.1.4. Betonarme Elastisite Modülü (E) Parametresine Göre | 115 |
| Güncelleme | |
| 4.1.5. Betonarme Birim Hacim Ağırlığı (ρ) Parametresine Göre | 126 |
| Güncelleme | |
| 4.1.5.1. Kirişler İçin Hesap | 126 |
| 4.1.5.2. Kolonlar İçin Hesap | 128 |
| 4.1.5.3. Döşemeler İçin Hesap | 130 |
| 4.1.6. Betonarme Elastisite Modülü (E) ve Betonarme Birim Hacim | 146 |
| Ağırlığı (ρ) Parametresine Göre Güncelleme | |
| 4.2. Çelik Deney Yapısının Deneysel İnceleme Sistemi ile İncelenmesi | 164 |
| 4.2.1. Yapının Özellikleri | 164 |
| 4.2.2. Deneysel Ölçüm ve Sonuçları | 167 |
| 4.2.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz Sonuçları | 173 |
| 4.2.4. (I_2, I_3) Lokal Atalet Momenti Parametresine Göre Güncelleme | 177 |
| 4.3. Betonarme Binanın Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi | 183 |
| 4.3.1. Betonarme Binanın Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş | 199 |
| Modal Parametreleri | |
| 4.3.2. Betonarme Binanın Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş | 200 |
| Fiziksel Parametreleri | |
| 4.3.3. Betonarme Binanın Sonlu Elemanlar Modelinin Modal | 201 |
| Parametreleri | |
| 4.3.4. Betonarme Binanın Sonlu Elemanlar Modelinin Fiziksel | 202 |
| Parametreleri | |
| 4.4. Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi | 203 |
| 4.4.1. İmpuls Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama | 203 |
| Metodu ile İncelenmesi | |
| 4.4.1.1. İmpuls Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama | 205 |

| | |
|---|-----|
| Metodu ile Bulunmuş Modal Parametreleri | |
| 4.4.1.2. İmpuls Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Fiziksel Parametreleri | 206 |
| 4.4.1.3. Çelik Deney Yapısının Sonlu Elemanlar Modelinin Modal Parametreleri | 207 |
| 4.4.1.4. Çelik Deney Yapısının Sonlu Elemanlar Modelinin Fiziksel Parametreleri | 207 |
| 4.4.2. Çevresel Mikrotremor Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi | 208 |
| 4.4.2.1. Çevresel Mikrotremor Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Modal Parametreleri | 219 |
| 4.4.2.2. Çevresel Mikrotremor Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Fiziksel Parametreleri | 219 |
| 5. SONUÇLAR | 221 |
| 6. KAYNAKLAR | 224 |
| 7. EKLER | 234 |
| 8. ÖZGEÇMİŞ | 235 |

SİMGELER LİSTESİ

| | | |
|----------------------|---|---|
| μ | : | Poisson oranı |
| f_{ck} | : | Çelik çekme dayanımı |
| f_{yk} | : | Çelik akma dayanımı |
| E_b | : | Beton elastisite modülü |
| ρ | : | Donatı oranı (pursantaj) |
| E_ζ | : | Çelik elastisite modülü |
| $E_{eş}$ | : | Dönüştürülmüş-eşdeğer elastisite modülü |
| N | : | Kayıt toplam nokta sayısı |
| Δt | : | Kayıt örnekleme aralığı |
| Δf | : | Frekans çözünürlüğü |
| f_N | : | Nyquist frekansı |
| \bar{A}_f | : | Düzleştirilmiş Fourier genliği |
| A_f | : | Orijinal Fourier genliği |
| W | : | Simetrik düzleştirme 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 yerdeğiştirme |
| $[k]$ | : | Rijitlik matrisi |
| \bar{k}_k | : | k . sonlu elemanın lokal rijitlik matrisi |
| $\bar{\bar{k}}_k$ | : | k . sonlu elemanın global rijitlik matrisi |
| $\bar{\bar{k}}_{+k}$ | : | k . sonlu elemanın ayrıkJ 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 |
| \bar{F}_k | : | k . sonlu elemanın lokal düğüm kuvvetleri vektörü |
| $\bar{\bar{F}}_k$ | : | k . sonlu elemanın global düğüm kuvvetleri vektörü |
| $\bar{\bar{F}}_{+k}$ | : | k . sonlu elemanın ayrıkJ düğüm kuvvetleri vektörü |
| \bar{R}_{*k} | : | k . sonlu elemanın lokal koordinat sisteminde (A) alanına etkiyen sürekli dağılımış $q(A)$ yükünden eşdeğer düğüm yükleri vektörü |
| $[H_k]$ | : | k . sonlu elemanın şekil fonksiyonu |
| $[c]$ | : | Sönüm matrisi |

| | |
|---------------------|--|
| $[k]$ | : Rijitlik matrisi |
| $[m]$ | : Kütle matrisi |
| $[\bar{m}_k]$ | : k . sonlu elemanın l.k.s.' de kütle matris |
| $[m_{\bullet k}]$ | : Her bir i . serbestlik derecesi doğrultusunda verilmiş $m_{\bullet kii}$ tekil kütlelerden oluşturulmuş eleman köşegen kütle matrisi |
| $[m_{*k}]$ | : Elemanın kendisinin sürekli dağılmış külesinden oluşturulmuş eleman eşdeğer kütle matrisi |
| ρ_k | : Sonlu elemanın yoğunluğu |
| V_k | : Sonlu elemanın hacmi |
| ω_{oi} | : Sönümsüz sistemin i . doğal titreşim modunun serbest titreşim frekansı |
| $\{a_i\}$ | : Sönümsüz sistemin i . doğal titreşim modunun mod şekli |
| $\{F_e\}$ | : Sisteme etkiyen elastik kuvvet |
| k_{ij} | : j . k.s.d.' si doğrultusunda birim yerdeğiştirmeden oluşmuş kuvvet |
| $\{F_c\}$ | : Sisteme etkiyen sönüm kuvveti |
| c_{ij} | : j . k.s.d.' si doğrultusunda birim hızdan oluşmuş kuvvet |
| $\{F_I\}$ | : Sisteme etkiyen atalet kuvveti |
| m_{ij} | : Kütle tesir katsayısı |
| e_0 | : Tesir vektörü |
| $(\ddot{\Delta})$ | : Dış dinamik kuvvetler sistem mesnedinin kinematik uyarılmasından oluşmuş yer ivmesi |
| $\{e_*\}$ | : Tesir vektörü |
| $(\varphi(t))$ | : Yer hareketinin burulma bileşeni |
| $\{e_{**}\}$ | : 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{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 |

| | | |
|------------------------|---|--|
| $\{u_k\}$ | : | Ayrık zaman durgunlaşmış yerdeğişme vektörü |
| $[A]$ | : | Ayrık-zamanda sistem matrisi |
| $[B]$ | : | Ayrık-zamanda giriş matrisi |
| $[I]$ | : | Birim matris |
| $\{w_k\}$ | : | Arıza ve modelleme eksikliklerinden dolayı ortaya çıkabilecek sistem oluşum gürültüsü |
| $\{v_k\}$ | : | Aygıt hatalarından dolayı ölçme gürültüsü |
| $\{y_k\}$ | : | 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 yerdeğiştirmeler arasındaki ağırlıklı mutlak fark |
| N_m | : | Seçilmiş toplam mod sayısı |
| N_N | : | Seçilmiş toplam düğüm sayısı |
| N_D | : | Seçilmiş toplam serbestlik derecesi sayısı |
| $(C_c Küt.)$ | : | Tam ve hesaplanmış kütle arasındaki ağırlıklı mutlak fark |
| C_R | : | Tepkiler için ağırlık matrisi |
| f | : | Rezonans frekansı |
| M_a | : | Sayısal kütle matrisi |
| Φ_m | : | Ölçüm özvektör matrisi |
| δ_{ij} | : | Kronecker deltası |
| γ_{ih} | : | Lagrange çarpanı |
| Δ | : | Ölçüm doğal frekans matrisi |
| $\gamma_{\Delta_{ij}}$ | : | Lagrange çarpanı matrisi elemanı |
| $\gamma_{k_{ij}}$ | : | Lagrange çarpanı matrisi elemanı |
| $\overline{M_a}$ | : | Sonlu eleman serbestlik derecesine göre artırılmış ölçüm modları ve analitik kütle matrisinden elde edilmiş genelleştirilmiş kütle matrisidir. |
| Ψ | : | Özvektör |
| $\{p\}$ | : | Modal koordinat |
| λ | : | Kompleks özdeğer |
| E_b | : | Beton elastisite modülü |

| | | |
|----------------|---|-------------------------|
| $E_{\text{ç}}$ | : | Çelik elastisite modülü |
| $A_{\text{ç}}$ | : | Çelik alanı |
| A_{b} | : | Beton alanı |
| ω | : | Açısal frekans |
| ξ | : | Sönüm oranı |
| T | : | Periyot |

KISALTMALAR LİSTESİ

| | | |
|------|---|-----------------------------------|
| TGTÇ | : | Tek Giriş Tek Çıkış |
| ÇGÇÇ | : | Çoklu Giriş Çoklu Çıkış |
| TGÇÇ | : | Tek Giriş Çoklu Çıkış |
| GKF | : | Genişletilmiş Kalman Filtresi |
| SKF | : | Sezgisiz Kalman Filtresi |
| ARX | : | Otomatik Regresyonlu Ekstra Girdi |
| SS | : | Durum Uzayı |
| ÇSDS | : | Çok Serbestlik Dereceli Sistem |
| TSDS | : | Tek Serbestlik Dereceli Sistem |
| ERA | : | Eigen Realizasyon Algoritması |
| EÇM | : | Etkileşimli Çoklu Model |
| SEMG | : | Sonlu Eleman Modeli Güncelleme |
| FTF | : | Frekans Tepki Fonksiyonu |
| SEM | : | Sonlu Elemanlar Modeli |
| MGK | : | Modal Güvenlik Kriteri |
| DM | : | Deneysel Model |
| MÖF | : | Modal Ölçek Faktörü |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| Şekil Adı | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Şekil 1.1. Deneysel inceleme sistemi | 3 |
| Şekil 2.1. Yalnızca çıkışa dayalı modal tanımlama metotları | 15 |
| Şekil 3.1. Mikrotremor ölçüm aygıtları (ivmeölçerler) | 27 |
| Şekil 3.2. Veri toplama birimleri | 27 |
| Şekil 3.3. Eksantrik kütleli titreştiriciler | 28 |
| Şekil 3.4. Betonarme bina ve çelik deney yapısının sonlu elemanlar modeli | 50 |
| Şekil 3.5. Betonarme bina ve çelik deney yapısının deneysel modelleri | 52 |
| Şekil 3.6. Sistem tanımlama şeması | 54 |
| Şekil 4.1. X yönünde eksantrisitenin katlara göre dağılımı | 95 |
| Şekil 4.2. Y yönünde eksantrisitenin katlara göre dağılımı | 96 |
| Şekil 4.3. Toplam eksantrisitenin katlara göre dağılımı | 96 |
| Şekil 4.4.a. Binaya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni (1) | 97 |
| Şekil 4.4.b. Binaya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni (2) | 97 |
| Şekil 4.4.c. Binaya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni (3) | 98 |
| Şekil 4.4.d. Binada ölçüm yapılışı (1) | 98 |
| Şekil 4.4.e. Binada ölçüm yapılışı (2) | 99 |
| Şekil 4.5. DM 1. mod şekli | 99 |
| Şekil 4.6. DM 2. mod şekli | 100 |
| Şekil 4.7. DM 3. mod şekli | 100 |
| Şekil 4.8. DM 4. mod şekli | 101 |
| Şekil 4.9. DM 5. mod şekli | 101 |
| Şekil 4.10. DM 6. mod şekli | 102 |
| Şekil 4.11. DM 7. mod şekli | 102 |
| Şekil 4.12. DM 8. mod şekli | 103 |
| Şekil 4.13. DM 9. mod şekli | 103 |
| Şekil 4.14. DM 10. mod şekli | 104 |
| Şekil 4.15. DM 11. mod şekli | 104 |
| Şekil 4.16. DM 12. mod şekli | 105 |
| Şekil 4.17. DM 13. mod şekli | 105 |
| Şekil 4.18. Binanın sonlu eleman modeli | 107 |
| Şekil 4.19. Güncelleştirme öncesi MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 108 |
| Şekil 4.20. Eşleşme-1 SEM1-DM5 | 109 |
| Şekil 4.21. Eşleşme-2 SEM2-DM3 | 110 |
| Şekil 4.22. Eşleşme-3 SEM3-DM4 | 110 |
| Şekil 4.23. Eşleşme-4 SEM4-DM6 | 111 |
| Şekil 4.24. Eşleşme-5 SEM5-DM7 | 111 |
| Şekil 4.25. Eşleşme-6 SEM6-DM8 | 112 |
| Şekil 4.26. Eşleşme-7 SEM7-DM9 | 112 |
| Şekil 4.27. Eşleşme-8 SEM8-DM10 | 113 |
| Şekil 4.28. Eşleşme-9 SEM9-DM11 | 113 |
| Şekil 4.29. Eşleşme-10 SEM10-DM12 | 114 |
| Şekil 4.30. Bina elemanlarının betonarme elastisite modülü (E) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 117 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.31. Güncelleştirme sonrası betonarme elastisite modülü (E) değişimi | 117 |
| Şekil 4.32. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 119 |
| Şekil 4.33. Eşleşme-1 SEM1-DM5 | 119 |
| Şekil 4.34. Eşleşme-2 SEM2-DM2 | 120 |
| Şekil 4.35. Eşleşme-3 SEM3-DM4 | 120 |
| Şekil 4.36. Eşleşme-4 SEM4-DM6 | 121 |
| Şekil 4.37. Eşleşme-5 SEM5-DM7 | 121 |
| Şekil 4.38. Eşleşme-6 SEM6-DM8 | 122 |
| Şekil 4.39. Eşleşme-7 SEM7-DM9 | 122 |
| Şekil 4.40. Eşleşme-8 SEM8-DM10 | 123 |
| Şekil 4.41. Eşleşme-9 SEM9-DM11 | 123 |
| Şekil 4.42. Eşleşme-10 SEM10-DM12 | 124 |
| Şekil 4.43. Binada betonarme elastisite modülü (E) ' nün en çok değişim gösterdiği düzlem | 126 |
| Şekil 4.44. Bina elemanlarının betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 133 |
| Şekil 4.45. Güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimi | 134 |
| Şekil 4.46. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 135 |
| Şekil 4.47. Eşleşme-1 SEM1-DM5 | 136 |
| Şekil 4.48. Eşleşme-2 SEM2-DM2 | 136 |
| Şekil 4.49. Eşleşme-3 SEM3-DM4 | 137 |
| Şekil 4.50. Eşleşme-4 SEM4-DM6 | 137 |
| Şekil 4.51. Eşleşme-5 SEM5-DM7 | 138 |
| Şekil 4.52. Eşleşme-6 SEM6-DM8 | 138 |
| Şekil 4.53. Eşleşme-7 SEM7-DM9 | 139 |
| Şekil 4.54. Eşleşme-8 SEM8-DM10 | 139 |
| Şekil 4.55. Eşleşme-9 SEM9-DM11 | 140 |
| Şekil 4.56. Eşleşme-10 SEM10-DM12 | 140 |
| Şekil 4.57. Binada kirişlerin betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ' nun en çok değişim gösterdiği düzlem | 142 |
| Şekil 4.58. Binada kolonların betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ' nun en çok değişim gösterdiği düzlem ($\rho = 2635.5 \text{ kg/m}^3$) | 143 |
| Şekil 4.59. Binada kolonların betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ' nun en çok değişim gösterdiği düzlem ($\rho = 2328.5 \text{ kg/m}^3$) | 144 |
| Şekil 4.60. Binada döşemelerin betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ' nun en çok değişim gösterdiği düzlem | 145 |
| Şekil 4.61. Bina elemanlarının betonarme elastisite modülü (E) ve betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 150 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.62. Güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığı (E) değişimi | 151 |
| Şekil 4.63. Güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimi | 151 |
| Şekil 4.64. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 153 |
| Şekil 4.65. Eşleşme-1 SEM1-DM5 | 153 |
| Şekil 4.66. Eşleşme-2 SEM2-DM3 | 154 |
| Şekil 4.67. Eşleşme-3 SEM3-DM4 | 154 |
| Şekil 4.68. Eşleşme-4 SEM4-DM6 | 155 |
| Şekil 4.69. Eşleşme-5 SEM5-DM7 | 155 |
| Şekil 4.70. Eşleşme-6 SEM6-DM8 | 156 |
| Şekil 4.71. Eşleşme-7 SEM7-DM9 | 156 |
| Şekil 4.72. Eşleşme-8 SEM8-DM10 | 157 |
| Şekil 4.73. Eşleşme-9 SEM9-DM11 | 157 |
| Şekil 4.74. Eşleşme-10 SEM10-DM12 | 158 |
| Şekil 4.75. Binada kirişlerin betonarme elastisite modülü (E) ' nün en çok değişim gösterdiği düzlem | 159 |
| Şekil 4.76. Binada kolonların betonarme elastisite modülü (E) ' nün en çok değişim gösterdiği düzlem | 160 |
| Şekil 4.77. Binada kirişlerin betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ' nun en çok değişim gösterdiği düzlem | 161 |
| Şekil 4.78. Kurşun kütle detayları | 165 |
| Şekil 4.79. Çelik deney yapısı | 166 |
| Şekil 4.80. Yapıya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni | 167 |
| Şekil 4.81. DM 1. mod şekli | 168 |
| Şekil 4.82. DM 2. mod şekli | 168 |
| Şekil 4.83. DM 3. mod şekli | 169 |
| Şekil 4.84. DM 4. mod şekli | 169 |
| Şekil 4.85. DM 5. mod şekli | 170 |
| Şekil 4.86. DM 6. mod şekli | 170 |
| Şekil 4.87. DM 7. mod şekli | 171 |
| Şekil 4.88. DM 8. mod şekli | 171 |
| Şekil 4.89. DM 9. mod şekli | 172 |
| Şekil 4.90. DM 10. mod şekli | 172 |
| Şekil 4.91. DM 11. mod şekli | 173 |
| Şekil 4.92. Yapının sonlu eleman modeli | 174 |
| Şekil 4.93. Güncelleştirme öncesi MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 175 |
| Şekil 4.94. Eşleşme-1 SEM1-DM2 | 176 |
| Şekil 4.95. Eşleşme-2 SEM2-DM3 | 176 |
| Şekil 4.96. Yapı elemanlarının atalet momentleri (I_2, I_3) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi | 178 |
| Şekil 4.97. Güncelleştirme sonrası (I_2) değişimi | 179 |
| Şekil 4.98. Güncelleştirme sonrası (I_3) değişimi | 179 |
| Şekil 4.99. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve | 180 |

| | |
|---|-----|
| düzlemde gösterimi | |
| Şekil 4.100. Bina tabanına etkiyen ivmenin zamana bağlı değişimi | 185 |
| Şekil 4.101. 1. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 186 |
| Şekil 4.102. 2. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 186 |
| Şekil 4.103. 3. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 187 |
| Şekil 4.104. 4. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 187 |
| Şekil 4.105. 5. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 188 |
| Şekil 4.106. 6. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 188 |
| Şekil 4.107. 7. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 189 |
| Şekil 4.108. 8. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 189 |
| Şekil 4.109. 9. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 190 |
| Şekil 4.110. 10. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 190 |
| Şekil 4.111. 11. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 191 |
| Şekil 4.112. 12. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 191 |
| Şekil 4.113. 1. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 192 |
| Şekil 4.114. 2. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 192 |
| Şekil 4.115. 3. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 193 |
| Şekil 4.116. 4. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 193 |
| Şekil 4.117. 5. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 194 |
| Şekil 4.118. 6. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 194 |
| Şekil 4.119. 7. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 195 |
| Şekil 4.120. 8. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 195 |
| Şekil 4.121. 9. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 196 |
| Şekil 4.122. 10. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 196 |
| Şekil 4.123. 11. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 197 |
| Şekil 4.124. 12. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 197 |
| Şekil 4.125. Kestirim hatası ve varyans değişimi | 198 |
| Şekil 4.126. İmpuls tepkisinin zamana bağlı değişimi | 204 |
| Şekil 4.127. Yapı tabanına etkiyen ivmenin zamana bağlı değişimi | 209 |
| Şekil 4.128. 1. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 210 |
| Şekil 4.129. 2. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 210 |
| Şekil 4.130. 3. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 211 |
| Şekil 4.131. 4. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi | 211 |
| Şekil 4.132. 1. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 212 |
| Şekil 4.133. 2. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 212 |
| Şekil 4.134. 3. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 213 |
| Şekil 4.135. 4. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi | 213 |
| Şekil 4.136. 1. katta öngörölmüş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 214 |
| Şekil 4.137. 2. katta öngörölmüş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 214 |
| Şekil 4.138. 3. katta öngörölmüş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 215 |
| Şekil 4.139. 4. katta öngörölmüş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 215 |
| Şekil 4.140. 1. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 216 |
| Şekil 4.141. 2. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 216 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.142. 3. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 217 |
| Şekil 4.143. 4. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması | 217 |
| Şekil 4.144. Tekil değerlerin dağılımı | 218 |
| Şekil 4.145. Kestirim hatası ve varyans değişimi | 218 |

ÇİZELGELER LİSTESİ

| Çizelge Adı | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Çizelge 3.1. Yaygın kullanıma sahip sonlu eleman tipleri | 41 |
| Çizelge 4.1. Deneysel modelin doğal titreşim periyotları | 106 |
| Çizelge 4.2. Sonlu eleman modelinin doğal titreşim periyotları | 107 |
| Çizelge 4.3. Güncelleştirme öncesi MGK matrisi değerleri | 114 |
| Çizelge 4.4. Betonarme elastisite modülünün (E) güncelleştirme aralığı | 115 |
| Çizelge 4.5. Güncelleştirme sonrası MGK matrisi değerleri | 118 |
| Çizelge 4.6. Güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerleri | 124 |
| Çizelge 4.7. Kirişlerde betonarme elastisite modüllerinin en fazla değişim gösterdiği kotlar | 125 |
| Çizelge 4.8. Kolonlarda betonarme elastisite modülünün en fazla değişim gösterdiği kotlar | 125 |
| Çizelge 4.9. Kirişlerde betonarme birim hacim ağırlığının güncelleme aralığı | 128 |
| Çizelge 4.10. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının güncelleme aralığı | 130 |
| Çizelge 4.11. Döşemelerde betonarme birim hacim ağırlığının güncelleme aralığı | 131 |
| Çizelge 4.12. Güncelleştirme sonrası MGK matrisi değerleri | 134 |
| Çizelge 4.13. Güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerleri | 141 |
| Çizelge 4.14. Kirişlerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2275.9 \text{ kg/m}^3$) | 141 |
| Çizelge 4.15. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2635.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 1.75 m düzlemi | 142 |
| Çizelge 4.16. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2328.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 12.75 m düzlemi | 143 |
| Çizelge 4.17. Döşemelerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 3339.58 \text{ kg/m}^3$) | 144 |
| Çizelge 4.18. Betonarme elastisite modülünün (E) güncelleştirme aralığı | 146 |
| Çizelge 4.19. Betonarme birim hacim ağırlığının (ρ) güncelleştirme aralığı | 146 |
| Çizelge 4.20. Güncelleştirme sonrası MGK matrisi değerleri | 152 |
| Çizelge 4.21. Güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerleri | 158 |
| Çizelge 4.22. Kirişlerde betonarme elastisite modülünün en fazla değişim gösterdiği kotlar ($E = 30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$) | 159 |
| Çizelge 4.23. Kolonlarda betonarme elastisite modülünün en fazla değişim gösterdiği kotlar ($E = 30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$) Y = 1.75 m düzlemi | 160 |
| Çizelge 4.24. Kirişlerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2275.9 \text{ kg/m}^3$) | 161 |

| | |
|--|-----|
| Çizelge 4.25. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2635.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 1.75 m düzlemi | 162 |
| Çizelge 4.26. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2328.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 12.75 m düzlemi | 162 |
| Çizelge 4.27. Döşemelerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 3339.58 \text{ kg/m}^3$) | 162 |
| Çizelge 4.28. Katlara göre kütle dağılımı | 164 |
| Çizelge 4.29. Deneysel modelin doğal titreşim periyotları | 173 |
| Çizelge 4.30. Sonlu eleman modelinin doğal titreşim periyotları | 174 |
| Çizelge 4.31. Güncelleştirme öncesi MGK matrisi değerleri | 176 |
| Çizelge 4.32. Atalet momentleri (I_2, I_3) için güncelleştirme aralığı | 177 |
| Çizelge 4.33. I_2 parametresi en fazla değişen elemanların numaraları ve değişim oranları | 181 |
| Çizelge 4.34. I_3 parametresi en fazla değişen elemanların numaraları ve değişim oranları | 182 |

1. GİRİŞ

Mevcut yapıların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi çalışmaları, genellikle yaşanan önemli bir deprem sonrası gündeme gelmektedir. Bunun başlıca nedeni, depremden etkilenmiş yapıların deprem sonrası durumlarının saptanması ve onarım-güçlendirme gereksiniminin belirlenmesidir. Ülkemizde geçmişte yaşanan uygulama sisteminde, “hasar tespiti” olarak adlandırılan bir inceleme sonucunda yapının hasar derecesi belirlenmekte ve ağır hasarlı yapıların yıkılmasına, orta hasarlı yapıların onarılıp güçlendirilmesine, az hasarlı yapıların ise sadece onarımına karar verilmektedir. Yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesinde esas amaç, var olan yapılarda gerekli inceleme ve hesapların olası bir depremden önce yapılar ve yetersiz görülen yapıların depremde hedeflenen performans seviyesine yükseltilmesi için uygulanacak iyileştirme işlemlerine karar verilmesidir. Deprem tehlikesi altında olan kentsel yerleşimlerde yeterli deprem güvenliğine sahip olmayan pek çok yapı olduğu bilinmektedir.

Yapıların deprem güvenliği değerlendirmesinde kısa vadeli ilk hedef, meydana gelebilecek şiddetli bir depremde yıkılma olasılığı yüksek olan bu tür binaları saptamak ve olası can kaybını önlemek olmalıdır. Yüksek risk taşıyan binalar ya terk edilerek yıkılmalı veya güçlendirilerek hasar riski azaltılmalıdır. Değerlendirmede orta vadeli ikinci hedef ise yıkılma riski yüksek olmasa da önemli ölçüde hasar görebilecek yapıların mevcut dayanımlarını ve hasara neden olan zayıflıklarını belirlemektir.

Yapıların teorik analizlerinde çoğunlukla deprem, rüzgâr ve kar yükü dikkate alınmakta ve yapılar bu yüklere karşı dayanıklı olarak projelendirilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, yapıların dış etkiler altında çok fazla zarar görmemesi beklenmektedir.

Buna rağmen, gerçekte çoğu yapı dış etkilerden dolayı oldukça fazla zarar görmekte, hatta yıkılmaktadır. Bunun başlıca sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir; Zeminden kaynaklanan problemler (sığ yeraltı suyu veya nemlenme, temelin ana kayaya oturmaması ve yağmur-sığ suların uzaklaştırılmaması, vs.)

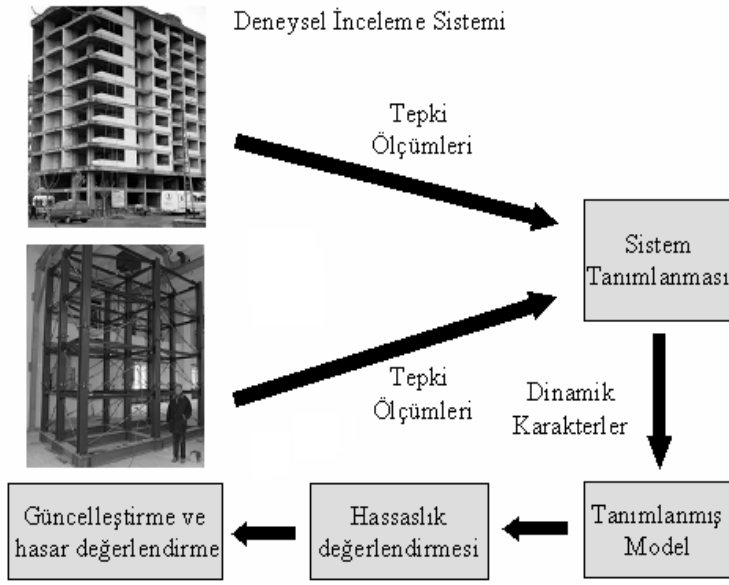
Yapı temelinden kaynaklanan problemler (sığ temel, aynı taban düzeyinde olmayan temel sistemi ve gerekli olduğu halde kazıklı temel sistemi kullanılmaması, vs.)

Taşıyıcı sistemden kaynaklanan problemler (zayıf kolon güçlü kiriş uygulaması, standart dışı çıkmalar, taşıyıcı sistem süreksizliği ve önce duvar sonra taşıyıcı sistemin yapılması, vs.)

Malzemeden kaynaklı problemler (düz donatı kullanımı, donatının standart dışı olması, az donatı kullanımı, etriye sıklaştırması yapılmaması, dayanımı düşük beton kullanımı, kalıbın kötü olması, onaylanan statik ve mimari projeyle, uygulamanın uyuşmaması, işçilik hataları, yapının maruz kaldığı farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlamlar, yorulmalar, vs.)

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.

Günümüzde mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin çevresel titreşimler kullanılarak hasarsız belirlendiği birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, betonarme ve çelik binaların, köprülerin, barajların, siloların, stadyumların, tarihi yapıların ve nükleer santrallerin dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Artık dinamik özellikleri belirlemek de tek başına yetersiz kaldığı için, tez çalışmasında rasgele etkilerden tahmin edilmiş durum vektörünün $\hat{x}(k)$ gerçek durum vektöründen $x(k)$ farkının $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ mümkün olabildiğince minimum olabilmesi için, bu farkın kovaryansı $P = \text{cov}(e(k))$ Riccati denkleminin çözümü (P) olarak bulunarak Kalman $K(k)$ kazancı (bu mümkün olmadığında doğrudan giriş-çıkışa dayalı gözlemsel kazanç (G)) elde edilir. Sistem karakteristik durum matrislerinin (A, B, C, D) optimal (en verimli) olarak belirlenmesi için yeni bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir. Sistemin tepkilerine dayanarak herhangi sistemin modal parametrelerinin, hem de fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesini sağlayacak tanımlama yöntemlerinin sistemli bir biçimde inceleme çalışmaları yapılmıştır. Düzeni şekil 1.1.' de gösterilen "Deneysel İnceleme Sistemi" ne ilişkin teorik bilgiler ele alındıktan sonra, iki yapı incelenmiş ve bu sonuçlara (teorik ve sayısal) dayalı olarak tüm yapı türlerini kapsayacak bilgisayar yazılımı oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.1. Deneysel inceleme sistemi

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Sistem Tanımlama ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte tasarım sürecinde sayısal modellerin kullanım alanı yaygınlaşmakta ve sayısal modellerden beklentiler artmaktadır. Sayısal modeller tasarım, tasarımda yapılan değişikliklerin sınanması ve optimizasyon gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Sayısal model sonuçları, yapılan kabullere bağlı olarak yapıyı temsil etmektedir. Yanlış yapılan kabullerin sonucunda sayısal modelin sonuçları gerçekten uzak olabilmektedir. Bilim alanı olarak sistem tanımlama kavramı ve terimi 1962 yılında Zadeh tarafından sunulmuştur (Zadeh, 1962) ve şu şekilde tanımlanmıştır. Sistemden gözlenen veya toplanan veriler kullanarak o sistemin dinamik yapısı hakkında (genellikle matematiksel) model oluşturulması ya da yapılandırılmasına sistem tanımlama denilmektedir.

Sistem tanımlama üç temel adımdan oluşmaktadır:

- 1- Model seçimi ve denenmesi-sistem modellenerek ve deney planlanarak sistem tepkileri ölçülür.
- 2- Parametre tahmini-seçilmiş model ve ölçülmüş tepkileri kullanarak sistem parametreleri tahmin edilir. Yapı mekaniğinde parametre tahmini yapısal modal parametrelerin (modal frekanslar, mod şekilleri, modal sönüm, vs.) teşhis edilmesinde kullanılır, bunlarda yapı sisteminin davranışını belirlemektedir.
- 3- Modal doğrulama veya model güncelleştirme

Fagin (1964), Fitzgerald (1971), filtreleme problemi üzerinde birçok çalışma yapmışlardır. Kalman filtresinin ıraksaması durumunu incelemişlerdir.

Magill (1965), çoklu model algoritmaları üzerinde çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bilinmeyen parametreleri ve bilinen kovaryansları olan bir model için en iyi tahminin, koşullu tahminlerin ağırlıklı olarak toplamı olduğu tarafından ortaya konulmuştur. Burada ağırlıklar, her parametrenin doğruluğuna ait koşullu olasılıklardır. Zamandan bağımsız durum için ilk çoklu model yaklaşımını uygulamıştır. Bu yaklaşımda, hesaplama yükü artmasına rağmen, tahmin performansı artmaktadır. Önceki çalışmalarda, tahmin yapılırken sistem modları

arasında geçiş olmayacağı varsayılmıştır. Bu yaklaşım geçişsiz çoklu model algoritmalarının kurulmasına öncülük etmiştir.

Wong ve ark. (1967), doğrusal zamanla değişmeyen ayrık zamanlı sistemlerin parametrelerinin tahmini için, yardımcı değişken yönteminin kullanılıp kullanılmayacağını araştırmışlardır. Bu yöntem için en iyi çözümü veren tahminlerin var olduğunu kanıtlamış ve ardışık hesaplamaya dayalı çevrimiçi tanımlama yöntemini kullanmışlardır. Yardımcı değişken yönteminin, doğrusal türevsel sistemlerin parametrelerinin tahmini için de kullanılabilceğini açıklamışlardır.

Wong ve ark. (1967), sistemi tanımlanmak istenen model ile ilişkisiz fakat aynı girişe sahip gürültüsüz bir modelin birleştirilme temeline dayanan Yardımcı Değişkenler Metodu' nu ortaya koymuş ve (Young, 1970)' ın metot üzerinde yaptığı güncelleme filtresi ilavesi ile kararsızlık problemini ortadan kaldırmıştır.

Ackerson ve ark. (1970), çalışmalarında daha gerçekçi yaklaşımlar olan çoklu model algoritmaları kullanmaya başlamıştır. Önerdikleri bu algoritmalarda, modeller arasında, olası geçişlere izin verilmiştir. Son çalışmalarında, iyi takip performansını koruyarak, daha az sayıda model kullanımına daha fazla önem vermişlerdir.

Jazwinski (1970), en etkili tahmin algoritmalarından biri olan Kalman filtresini, lineer ve lineerleştirilmiş modellerde durum tahmini yapabilmek amacıyla yaygın olarak kullanmıştır. Bu modeller, sistemin durumunu gösteren ancak gözlenemeyen stokastik süreç ile ilgili bir durum eşitliği ve gözlenebilen stokastik süreç ile ilgili bir ölçüm (gözlem) eşitliği tarafından modellenir. Bu denklemlere durum-uzay modeli denir. Kalman filtresinin amacı, sistemin durum-uzay modeline uygun olarak, sistemde bulunan gürültünün etkisini azaltıp, durum vektörünü gözlemlerini kullanarak tahmin etmektir.

Mehra (1972), modelde yer alan hata terimlerinin kovaryanslarının bilinmemesi durumunda, bu matrislerin tahmin edilmesi durumunu incelemiş ve kendini uyarlayan Kalman filtresi için çalışmalar yapmıştır.

Tse ve ark. (1975), çok değişkenli stokastik doğrusal sistemin boyutunun, sistem matrislerinin ve gürültü değişkenlerinin bilinmediği durumunu ele almışlardır. Böyle bir sistemin çıkış verilerini kullanarak, sistem tanımlanması için bir model geliştirmişlerdir. Uygun parametre tahminleri elde etmek için; çıkış işleminin yenilikler gösterimi kullanılmış ve bu sistem matrisleri kesin kanonik biçimde seçilmiştir. Yenilikler

gösteriminin parametreleri ve sistem yapısının tahmini için bir sistematik yöntem tanımlanmıştır.

Roth (1981), gürültüsüz gözlemlere dayalı kısmi türevsel denklemlerle tanımlanan bir sistemde sabitlerin tanımlanması problemini ele almıştır. Bu çalışmada kullanılan teknikler, (Berman, 1979)' ın fikirlerinden çıkarılmış olup sanki-linearleştirme, türevsel yaklaşımlar, dinamik programlama uygulamaları incelenmiştir. Mevcut giriş-çıkış verisinin bilindiği düşüncesinden, en elverişli çıkış verisi için başlangıç koşulları ve sistem parametrelerinin her ikisini elde etmek için nümerik bir yöntem oluşturmuştur. Burada parçalı türevsel yaklaşım kullanılmış, (Berman, 1979)' ın deterministik sistemlerin tanımlanması alanında yapmış olduğu katkının küçük bir kısmı uygulanmıştır.

Young (1981), sistemi başlangıç frekans ve geçici durum tepkisinden yararlanarak tanımlamıştır. Bu işlemler için sinüzoidal, birim basamak, birim darbe gibi özel girişler kullanmıştır. Bilgisayarın kullanıma girmesiyle birlikte ayrık zaman modellerinin belirlenmesi büyük önem kazanmıştır. Örneklenmiş verilerden yararlanarak sistemin ayrık zaman modelinin belirlenmesini ele almış ve bu konuda çeşitli metotlar geliştirmiştir.

Sinha ve Kuszta (1983), Feliu ve ark. (1988), Lastman ve Sinha (1989), Sinha ve Lastman (1991), sürekli zaman modellerinin tahminini doğrudan ve dolaylı yöntemlerle olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Dolaylı yöntemlerde ilk olarak bilinen herhangi bir algoritma ile ayrık zaman modeli belirlenmekte ve bilinen dönüşüm algoritmaları yardımıyla sürekli zaman modeline geçilmektedir. Bu yaklaşımda, ayrık zaman modellerin parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan ayrık zaman algoritmalarının kullanma avantajının olduğunu, fakat çevrim içi gerçek zaman uygulamaları için gerçekleştirilmesinin ilave hesaplamalar gerektirdiğini ortaya koymuşlardır.

Juang ve ark. (1985), zaman tanım alanında, çevresel titreşim kayıtları-giriş (zemin) ve yapısal noktaların tepkileri-çıkış olarak alınıp, yapısal sistemdeki giriş-çıkış ilişkilerinin TSDS (Tek Giriş Tek Çıkış-TGTC) ve ÇSDS (Çok Giriş Çok Çıkış-ÇGÇÇ) olarak tasarlanan otomatik regresyonlu ekstra girdi (ARX) ve durum-uzay (SS) matematik modelleri üzerinde değişik filtre tekniklerinin optimizasyon uyarlamaları kullanılarak aranan parametrelerin giriş-çıkış ilişkisi ağınlı en güvenilir mertebede kurmaya çalışmışlardır. ÇSDS için girişler ve çıkışlar arasındaki ÇGÇÇ çapraz ilişki ağınlı şekillendirecek parametrelerin hesaplanması aşamasında Eigen Realizasyon

Algoritması (ERA) kullanarak değişken Kalman filtresi yardımıyla parametrik değişkenleri hesaplamışlardır.

Ljung (1987), sistem tanımlama için geliştirilen teknikleri endüstriyel amaçlar için kullanmaya başlamıştır, sistematik şekilde çalışmalar yapmıştır.

Alengrin ve ark. (1987), ARMA model için, yeni bir parametre tahmini yöntemi geliştirdiler. Bu çalışmalarında, bir sistemin geçici durumda iken (Li, S. ve ark., 1986) tarafından belirlenen formüllerin, bir adımlı tahminci bağıntıları ile de kolaylıkla elde edilebileceğini gösterdiler. Sistemin sürekli durumu için sistemin AR parametrelerini ve MA parametrelerini ayrı ayrı hesaplamışlardır.

Chung ve ark. (1988), yapmış oldukları çalışmalarda doğrusal olmayan sistemlerin bilinmeyen parametrelerinin tahmini ve analizi konusunu, Taylor serileri yaklaşımı kullanarak ele almışlardır. Sayısal programlamaya uygun algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımın ana avantajı, tümlev için kullanılan matrisin yapısının oldukça basit olmasıdır. Nümerik örneklerle bu yaklaşımın doğruluğunu göstermişlerdir.

Hashemipour ve ark. (1988), Rao and Durant (1991), çoklu algılayıcıya sahip sistemler için paralel Kalman filtresini incelemişlerdir.

Kay (1988), yapmış olduğu çalışmada, model derecesi seçilirken her zaman en küçük model derecesi seçilerek sinyal modellenmesi gerektiğini ve uygun model derecesi seçimi için, Akaike bilgi kriteri, Schwarz Bayesian model seçme kriteri ve son tahmin hata kriterlerinden yararlanmanın uygun olacağını ortaya koymuştur. Seçilen model derecesine bağlı olarak sistemin parametrelerini tahmin ederek, son olarak sinyalin performansını test edip, performans testi ile ilgili olarak en küçük kareler, spektral eşleme ve en çok olabilirlik gibi ölçütlerin kullanılabilceğini tespit etmiştir. Eğer, seçilen modelin performansı uygun çıkmazsa, yani çizdirilen grafikte güven Aralığının (%95' lik güven aralığı) dışına taşma varsa model derecesinin bir artırılarak modelin tekrar oluşturulması gerektiğini belirlemiştir.

Sagara ve Zhao (1989, 1990, 1991), Yang ve ark. (1994), Johansson (1993, 1994), Kowalczyk ve Kozlowski (2000), çalışmalarında sürekli zaman modellerinin belirlenmesinde geçmiş yıllarda, örneğin durum değişkeni filtreleri gibi analog ön filtreleri iyi kullanmışlardır. Sayısal bilgisayarların hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte sürekli zaman modellerinin tahmini tamamen sayısal olarak yapılmaktadır. Böylece ayrık zaman ölçümlerine dayalı işaret işleme uygulamaları için gerekli olan sayısal filtreleme teknikleri kullanılmıştır. Son yıllarda nümerik integrasyon, bilineer dönüşüm ve ortogonal

fonksiyonların kullanımı gibi bazı teknikler, sayısal bilgisayarlarda analog ön filtreleri gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Analog ön filtrelerin ayrıklaştırılarak sayısal biçimde kullanılmasıyla, bir diferansiyel denklemin parametrelerine bağlı olan bir ayrık zaman modeli elde edilir. Elde edilen bu ayrık modele bağlı olan sürekli zaman model parametreleri, ayrık zaman modellerinin belirlenmesinde kullanılan ayrık zaman algoritmalarından birisinin doğrudan veya değiştirilerek kullanılmasıyla doğrudan olarak bulunabilir.

Sagara ve ark. (1990), geçmiş yıllarda ayrık zaman sistem tahmini problemi için örneklenmiş verilere dayalı parametre tahmin algoritmaları üzerine oldukça iyi çalışmalar yapmışlardır. Ancak sonraları istenen hassasiyetin artması nedeniyle sürekli zaman modellerinin fiziksel yapıyı daha iyi temsil ettiğini göstermişlerdir.

Unbehauen ve Rao (1990, 1998), sürekli zaman modellerinin tahmininde, daima gürültü içeren giriş-çıkış işaretleri ölçümlerinin kullanılarak zamana göre türevlerinin elde edilmesinden dolayı bir tahmin algoritmasının uygulanmasından önce sistem diferansiyel denklemini cebri hale getirmek için işaret işleme gerekliliği üzerine çalışmışlardır. Pratikte en önemli yolun, filtrelenmiş işaretleri kullanmak ve bu işaretlerin ölçümlerin bir ön filtre üzerinden geçirilmesiyle elde edildiğini belirtmişlerdir.

Darouach ve ark. (1991), cebirsel kısıtlamalar altında, doğrusal dinamik sistemler için ardışık durum tahmini algoritması geliştirmişlerdir. Durum vektörü için minimum değişiklik tahmini, ölçülen model ve dinamik model denklemine bağlı olarak Kalman Filtresi ile belirlenir. Doğrusal kısıtlamalar, durum tahmini yönteminin genişletilmesi ile tartışılmıştır ve önceki durum tahmini ile yeni ölçümler ve doğrusal cebirsel kısıtlamalar altında doğrusal ardışık tahminin elde edildiği gösterilmiştir. Bu problem, güç sistemlerinde ve ekonomik sistemlerde karşımıza çıkmaktadır.

Elramisi ve ark. (1991), doğrusal olmayan, ayrık zamanlı model parametrelerinin tahmini için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Model yapısı Gabor temel fonksiyonlarının frekans-yerleşim alanında bir basitleştirme yapılarak gösterilerek, bu fonksiyonların uzaysal Gaussian eğrileri birlikte kullanılmıştır. Gabor temel fonksiyonları için yapılan değişimler, gürültü etkilerini önlemek için de incelenmiş bu algoritma üç katlı sinir ağı devrelerinde sistem tanımlama problemini çözmek için (düzenli olmayan bir örnekleme aralığı ile) kullanılmıştır.

Horvath (1991), doğrusal ayrık-zamanlı modellerin, rastlantı katsayıları ile ifade edilmesi durumunda model parametrelerinin tahmini ile ilgilenmiştir. Özellikle,

maksimum olasılık tahminleri ve onların tanımlanan model yapılaşma uygunluğunu araştırmıştır. Bu tahminler, doğrusal ayrık-zamanlı ve sabit katsayılı sistem için; ARX modeli için en küçük kare tahminleri kadar basit bir yapıya sahiptirler. Bu model; aynı boyutlu ARX modelindeki kadar bilinmeyen parametre sayısına sahiptir ve bu model, rastlantısal çıkışlara sahip gerçel sistemlerin modellenmesinde bir yöntem olarak kullanılabilir.

Chai (1992), indüksiyon motorunun çevrimiçi parametre tahmini için ekonomik bir algoritma tanımlamıştır. Bu parametreler, yalnızca işaretlerdeki bileşenlerden türetilir ve hesaplanmış olan parametrelerin en uygunudur. Spektral analiz kullanarak, çevrimiçi test metotları için kullanılabilir olduğu gösterilir ve bu metot standart offline' a benzemektedir. Bilgisayar uygulaması sonucunda, 2KW gücünde bir indüksiyon motorundan elde edilen deneysel sonuçlar kadar, algoritma performansının da iyi olduğu görülmüştür.

Darouach (1992), yapmış olduğu çalışmada; tek-girişli tek-çıkışlı ayrık zamanlı tekil sistemleri ele almıştır. Bu sistem için, çevrimiçi durum ve parametre tahmini konusunda ardışık bir algoritma geliştirmiştir. Ele alınan model, köşegensel gözlenebilir biçimde düşünülmüştür. Bu yaklaşım, geliştirilmiş Kalman filtrelemesine dayanır ve iki adımda geliştirilebilir. Birinci adımda, parametreler ardışık en küçük kareler metoduyla tahmin edilmiştir. Bu parametreler ikinci adımda, geliştirilmiş Kalman filtresi kullanılarak durum tahmini için kullanılmış ve bu algoritmanın doğruluğu sayısal örneklerle kanıtlanmıştır.

Liaw (1992), tahrik sistemlerinin parametre tahmini için dolaylı olarak bir rastlantı yöntem kullanmıştır. Bu yöntemde, tahrik sistemlerinin her bir bloğu için bir ayrık-zamanlı ARMA model uydurulur ve örneklenmiş giriş-çıkış verilerinden sistem tanımlaması yapılır. Sonra baskın enerji modları düşüncesinden gidilerek sürekli zaman modeli için uygun indirgeme derecesi belirlenir. Sonuç olarak sürekli zaman modelinin parametreleri, tanımlaması yapılan ARMA modelinin frekans tepkisinin benzerliğinden yararlanılarak bulunur. Sunulan yöntem, bir pompalı depolanan güç sistemlerindeki tahrik sisteminin parametrelerinin tahmini için kullanılmıştır. Bu yöntemin en büyük avantajı, durum uzayı dönüşümü için sıklıkla sistem bölümlerinin birim matris kullanılarak yapılmasıdır ve böylece dengeli gerçekleştirme ve spektral ayrışım kullanılan yöntemler için ters çevirme işlemleri ortadan kalkmıştır. Bu algoritma, kararsız sistemler için doğrudan kullanılabilir.

Kamas (1993), güç elektroniği devrelerinde parametrelerin ve ölçülemeyen devre değişkenlerinin parametrelerinin tahmini ve devre modelinin oluşturulması konularını incelemiştir. Güç elektroniği devreleri üzerinde yaptığı sayısız uygulamalarda, kapalı çevrimli kontrol tasarımları için, çok pahalı ve doğrudan elde edilmesi mümkün olmayan kadar zor olan çalışmada durum tahmini için Lyapunov fonksiyonuna dayanarak devre parametrelerinin bütünüyle bilinmediği durumlar için, bir adaptif tahmin algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, ölçülemeyen devre değişkenleriyle beraber bilinmeyen devre parametrelerinin tahmininde kullanılmıştır. Ortalamalı ve tekil dağılımlı analiz kullanılarak durum tahmininin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Koh ve ark. (1994), Tseng ve ark. (1994), Angelis ve ark. (2003), Phan ve Longman (2004), mekanik sistemlerin yapısal parametrelerinin belirlenmesi doğrultusunda çalışmalar yapmışlardır.

Li ve Bar-Shalom (1993), Monte Carlo simülasyonları kullanılmadan Etkileşimli Çoklu Model (EÇM) algoritması için tahmin metodunun performansını örnekler ile tartışmışlardır.

Lin ve Atherton (1993), manevra yapan hedef takibinde kullanılan Etkileşimli Çoklu Model (EÇM) algoritmasının bazı özellikleri ve farklı sayıdaki modeller ile farklı parametrelerin kullanılmasının etkilerinden bahsetmişlerdir.

Mazor ve ark. (1993), etkileşimli Çoklu Model (EÇM) algoritmalarını hedef takibi açısından incelemiş, algoritmaların varsayımlarını ve çeşitli durumlardaki uygulamalarını göstermişlerdir.

Özbek (1993), kesikli-zaman durum-uzay modellerinde indirgemeli tahmin yöntemini incelemiş, Özbek ve Öztürk (1993), gayri safi millî hâsıla değerinin Kalman filtresi ile tahmini ile ilgili bir çalışma yapmıştır.

Subrahmanyam (1993), yapmış olduğu çalışmada; sürekli zamanlı tek girişli-tek çıkışlı sistemin aktarma işlevinin parametrelerinin Markov parametrelerinden yararlanılarak tahmini için bir algoritma geliştirmiştir. Markov-Poisson parametreleri olarak bilinen parametrelerin yeni bir grubu, Markov parametrelerinin tanımını genelleştirmek için kullanılmıştır. Benzer modellerin tahmini için sürekli zamanlı sistemlerin aktarma fonksiyonlarını veren bu verimli algoritmayı detaylı olarak incelemiştir.

Wan (1993), lineer olmayan sistemler için genişletilmiş Kalman filtresi (EKF), yaklaşık maksimum olasılık tahminini sağlayabilmekte, ortalama ve kovaryans tekrarlı

olarak güncelleştirilebilmekte iken, bununla birlikte, dinamiklerin birinci derece lineerizasyonunda rasgele değişkeni tahmin etmek için türev alınması gerektiğini, böylece lineer olmayan dinamiklerin bu türevle, yine zamanla değişen lineer dinamiklere yaklaştırılabileceğini ve bu takdirde Standart Kalman eşitlikleri uygulanabileceğini ispat etmiştir.

De Kock (1994), çıkış hata tekniğini kullanarak indüksiyon motorlarda parametre tahmini konusunda bir algoritma geliştirmiştir. Güç sistemleri için indüksiyon motorlarının simülasyonları; doğru olmayan veya bilinmeyen parametre verileri ile sık sık engellenmektedir. Motor parametrelerinin tahmini için geliştirdiği teknik, uygulanan gerilim bozulmaları ile birleştirilen çıkış hata tekniğini kullanmaktadır.

Xia ve ark. (1994), durum-uzay modelinin hatalı kurulması durumunda, Kalman filtresinde ortaya çıkan iraksama durumunu ele almış ve filtrede bazı güçlendirmelerin yapılmasını sağlayacak unutma faktörünün hesaplanması için çeşitli algoritmalar önermişlerdir.

Özbek ve ark. (1996), Kalman filtresinde modelin hatalı kurulmasından kaynaklanan iraksama problemi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır.

Raol (1996), dinamik sistemlerde durum uzayı modelinin parametrelerinin tahmini problemini çözmek için bir sinir ağı mimarisi oluşturmuştur. Ağırlık/eğim bilgisinin ön hesaplamasına bağlı olan mimari, doğrudan gradient hesaplaması (normalizasyonsuz) ve çıkış hata yöntemini kullanarak geliştirmiştir.

Farrar ve ark. (1997), çevresel titreşim ölçümüne dayalı hasar analizinin aynı zamanda yapının mevcut durumuyla modal özelliklerini ve bazı parametrik değişimlerin izlenmesiyle de hasar tespiti yapabilmeyi mümkün kıldığını ortaya koyan çalışma yapmışlardır. Lokal hasarların yüksek frekans içerikli buna karşın global yapısal hasarların düşük frekans içerikli olduğuna dayanarak yapılan istatistiksel çalışmalarda ilk mod frekansının diğer modal parametrelere nazaran daha az tesadüfi hatalardan etkilendiğini göstermişlerdir.

Özbek (1997), durum-uzay modelinin hatalı kurulması durumunda, Kalman filtresinde meydana gelen iraksama durumunu ele almış ve filtrede bazı güçlendirmeler yapacak bir algoritma önermiştir.

Yeddanapudi ve ark. (1997), çoklu hedef, çoklu algılayıcı hava trafik kontrolüne, Etkileşimli Çoklu Model (EÇM) algoritmasının uygulanması üzerinde durmuşlardır.

Farrell ve Barth (1999), Grewal ve ark. (2001), parametre tahmininde çoğunlukla kestirilen parametrelerin sistematik sapmalardan arıtılmış ve minimum varyansla elde edilmesinin amaçlanması gerektiğini bildirmişlerdir.

Herring (1999), özyineleme kavramı üzerinde duran çalışmalar yapmıştır. Özyineleme, kısaca ekstrapolasyon ile hesaplanabilecek parametrelerin yeni ölçülerle hesaplanabilmesidir. Kalman filtresi tekniğinin de dinamik (navigasyon için kinematik) model ile ölçüleri birleştiren optimal ve özyinelemeli bir parametre tahmin yöntemi olduğunu ortaya koymuştur.

Herring (1999), Moore (2001), uyarlamalı filtre kapsamında değerlendirilebilecek kinematik modelde olan sapmaların zaman korelasyonlu olarak modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Yerdeğiştirme, ani hız ve ivme değişimleri nedeniyle öngörülen modelden sapmaların korelasyonlu olduğu düşünüldüğünde, uygun gürültü modelleri ile filtrenin optimal çalışması sağlanabilir ve navigasyon çözümleri iyileştirilebilir.

Merwe ve Nelson (1999, 2001), hafıza problemi ve eski verilerin filtrede tutulmasından, öğrenme eğrilerinde olumsuz sonuçlar oluşması nedeniyle kullanılacak model ve durumlar belirlendikten sonra, çevrimiçi veya offline hesaplama yöntemlerinin seçilmesi gerekliliğine yönelik çalışmalar yapmışlardır.

Nelson (2000), çalışmasında daha önceki çalışmalardan farklı olarak, sinyallerin hem durumunun hem de parametrelerinin aynı anda iyileştirilmesi üzerinde durmuştur. Bu iyileştirme yöntemi literatürde ikili (Dual) filtreleme olarak bilinmektedir. Çalışma esnasında iki adet filtre kullanılmıştır. Filtreler birbirlerine paralel olarak çalışmakta olup, birisi sinyalin durumunda iyileştirme yaparken, diğer filtre ise sinyalin parametrelerinde iyileştirme yapmaktadır. Böylece ikili filtreleme yöntemi sinyallerin iyileştirilmesinde tekli filtrelerden daha uygun sonuçlar sağlamaktadır. Çünkü tekli filtreler gürültülü sinyallerin ya sadece durumunda iyileştirme yapmakta ya da parametrelerinde iyileştirme yapmaktadır.

Heunecke ve Welsch (2001), sistemlerin tanımlanmasında sistemin beklenen değeri ve oto korelasyon fonksiyonu, ayrıca, zaman serilerinin modellenmesi ile sistemin ileriye yönelik tahminlerinin yapılabirliği üzerinde çalışmışlardır. Etki-tepki büyüklükleri arasında gerçekleştirilecek bir çapraz-korelasyon işlemi ile de sistemin tepkisinin, etkiye göre gecikip-gecikmediği belirlenebilmektedir. Yani etkiyen büyüklük tepkiye sebep olmuş ise sistemde herhangi bir gecikme durumu meydana

gelmemektedir. Eğer bir değişim söz konusu değilse sistemde gecikme meydana gelmektedir.

Moore (2001, 2002), Rudolf Emil Kalman tarafından 1960 yılında ortaya konan ve navigasyon, deprem tahminleri ve objelerdeki dinamik ve kinematik hareketlerin belirlenmesi gibi birçok mühendislik alanında kullanılmakta olan teorisini uyarlamalı (adaptive) filtreler tercih ederek inovasyon dizisinin her adımda kontrolü ve buna uygun olarak kinematik modelin revizyonunu ifade edebilmiştir.

Nelson (2001), lineer olmayan sinyallerde, daha iyi performans için, ikinci derece EKF partikül filtresi kullanılması özellikleri üzerinde çalışmıştır.

Merwe ve Wan (2002), diğer bir tahmin edici olan birleşik Kalman filtresini incelemiştir. Bu filtre daha çok genişletilmiş Kalman filtresinin lineer olmayan ortamlarda tahmini esnasında filtrenin ıraksama problemine karşı türetilmiş bir versiyonu olduğu için, lineer olmayan sinyallerde daha uygun sonuçlar sağlayabileceği sonucuna varmışlardır.

Labarre ve Grivel (2003), ikili Kalman filtresinin ses sinyallerindeki iyileştirmeye yönelik kullanılma amacını araştırmış ve bunun sonucunda genişletilmiş Kalman filtresine bir alternatif olduğunu, genişletilmiş Kalman filtresindeki ıraksama probleminin olmadığını ve lineer olmayan sistemlerde uygun sonuçlar sağlayabildiğini belirlemiştir. İkili yaklaşımda, genişletilmiş Kalman filtresindeki ıraksama problemi göz önünde bulundurularak, lineer olmayan sinyallerde hesaplama yapılmış ve ikili hesaplamada genişletilmiş Kalman filtresine oranla daha uygun sonuçlar elde edilmiştir. İkili yaklaşımdaki diğer bir mantık ise model ve parametrelerin iteratif olarak aynı anda kestirilebilmesidir. Lineer olmayan sistemlerde, genişletilmiş Kalman filtresi sistem dinamiklerini doğrusallaştırarak, standart Kalman filtresiyle normal tekrarlı tahmin yapabilmektedir. Fakat doğrusallaştırma esnasında, sinyalin kovaryansı ve ortalamasında bazı durumlarda sapma gözlenmektedir. Çalışmalarında bu probleme ikili Kalman filtresi yaklaşımıyla bakmışlardır. Belirli bir ses sinyali üzerinden sinyalin paralel olarak bir taraftan durumu hesaplanırken, diğer taraftan da sinyalin parametreleri hesaplanarak genişletilmiş Kalman filtresinden daha iyi performans elde edilmiştir. Diğer taraftan ıraksama problemi de ortadan kalkmıştır. İkili filtrede çalışma modeli, sıralı olarak, yani hesaplamalar noktasal olarak yapılmaktadır. Lineer olmayan dinamik sistemlerde, kesikli zaman durumunun olasılığının hesaplanması için genişletilmiş Kalman filtresi uygun çözümler üretebilmektedir. Filtre dinamik modelden uygun sonuç

için tahminle gürültüyü birleştirmekte, tekrarlı bir şekilde bu işi devam ettirmektedir.

Sethi ve Song (2006), üç katlı çoklu modal modelin titreşim kontrolünü inceleyerek, alt uzayda sistem tanıma metodu ile modelin ilk üç modu belirleyerek bunun % 90 bir uyum sağladığını belirlemişlerdir. Bu sonuçları, tam durum kontrolünü sağlamak için kutup kontrolcüsünde kullanmışlardır.

Giraldo (2006), çalışmasında başlıca tanımlama yöntemlerini referans yapı üzerinde değerlendirerek SSI yönteminin aygıtlardaki gürültüye daha sağlam sonuçlar verdiğini; Ardından model güncelleme aracılığı ile yapı sağlamlık değerlendirilmesi çalışmalarına dayalı CGP (the conjugate gradients provides) yönteminin daha verimli olduğu kanaatine varılmıştır. Elbette bu sonuçlar çalışmada konulan kriterlere bağlı olup tüm rastlanabilen durumları içermemektedir.

Kasımzade ve Tuhta (2005, 2006, 2007, 2008, 2009), sistemin mevcut doğal ve yapay tepkilerine dayalı olarak herhangi sistemin modal parametrelerinin, hem de sistemin fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesini sağlayacak bir şekilde tanımlama yöntemlerinin sistemli bir şekilde inceleme çalışmalarını yapmışlardır. İster yapının modal, isterse de fiziksel parametrelerinin tahmin edilmesinin kesinliği, sistemin durum- A , giriş etki- B , çıkış etki- C , doğrudan iletme- D matrislerinin mümkün olabilen en az hata ile belirlenmiş olmasıdır. Bu hedefe ulaşmak için rasgele etkilerden tahmin edilmiş durum vektörünün $\hat{x}(k)$ gerçek durum vektöründen $x(k)$ farkının $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ mümkün olabildiğince minimum olabilmesi için, bu farkın kovaryansı $P = \text{cov}(e(k))$ Riccati denkleminin çözümü P olarak bulunarak, Kalman $K(k)$ kazancı (bu mümkün olmadığında doğrudan giriş-çıkışa dayalı gözlemsel kazanç G) elde edilerek, sistem karakteristik durum matrislerinin (A, B, C, D) optimal (en verimli) olarak belirlenmesi için yeni bir hesaplama algoritması geliştirilmiştir.

Yukarıdaki çalışmaları özetlersek İnşaat Mühendisliği Yapılarında giriş-çıkışa dayalı Modal Tanımlama yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir, Maia (1997), Cunha, Caetano (2005)

a) Frekans alanında modal tanımlama yöntemleri. Çok dinamik serbestlik dereceli sistemler için RFP (Rational Fraction Polynomial), CEFD (Complex Exponential Frequency Domain), PRFD (Polyreference Frequency Domain) yöntemleri.

b) Zaman alanında modal tanımlama yöntemleri. Dolaylı (indirect) CE (Complex Exponential), LSCE (Least-Squares Complex Exponential), PRCE (Polyreference Complex Exponential), ITD (Ibrahim (1977) Time Domain), ERA (Eigensystem Realization Algorithm) ve Doğrudan (direct) ARMA (Autoregressive Moving Average) yöntemleri mevcuttur.

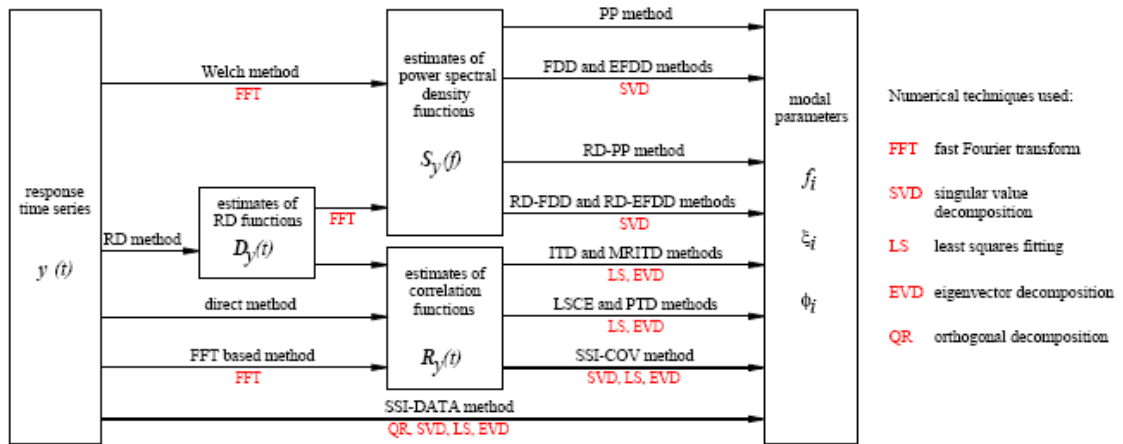
İnşaat Mühendisliği yapılarında sadece çıkışa dayalı modal tanımlama yöntemleri ağırlıklı olarak frekans alanında geliştirilmiş olan parametrik olmayan ve zaman alanında parametrik yöntemler olarak sınıflandırılabilir Rodrigues (2004).

a) Sadece çıkışa dayalı frekans alanında tanımlama yöntemleri. PP (Peak-Picking), FDD (Frequency Domain Decomposition), EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition)

b) Sadece çıkışa dayalı zaman alanında tanımlama yöntemleri. Bu yöntemlerde önce dinamik yapısal davranış ayrık zamanda durgunlaşmış durumda stokastik modellenir-ARMAV veya ARV modelleri şeklinde.

Bu modellere FFT algoritmi veya RD (Random Decrement method) yöntemi, ITD (Ibrahim Time Domain), MRITD (Multi Reference Ibrahim Time Domain, Fuzukono (1986)), LSCE (the Least Squares Complex Exponential), PRCE (Polyreference Complex Exponential), SSI-COV (Covariance Driven Stochastic Subspace Identification), SSI-DATA (Data-Driven Stochastic Subspace Identification), PolyMAX (Polymax parameter estimation method).

Bu yöntemler şematik olarak aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yalnızca çıkışa dayalı modal tanımlama metotları

2.2. Model Güncelleme ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Sistemin sonlu elemanlar modelinin SEM modal parametreleri aynı sistemin mevcut durumunda (DM deneysel model) tepkilerine dayanarak elde edilmiş modal parametreler ile çakışana kadar SEM modelinde değiştirilebilir parametrelerin (elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk, düğüm elemanlarının parametrelerini değiştirerek mafsallaştırılması, vs.) yenilenmesi model güncelleme olarak tanımlanmaktadır. Bunun için amaç (hedef) fonksiyonu oluşturularak optimizasyon teknikleri ile sistem güncellenmektedir. Kısaca model güncellemede amaç sayısal sonlu elemanlar modeli (SEM) ile deneysel model (DM) arasındaki uyumun artırılmasıdır.

Fox ve ark. (1968), sayısal özdeğerlerin sayısal modeldeki güncellenen değerlere göre birinci mertebeden türevlerini hesaplamıştır. Ayrıca özvektörlerin de birinci mertebeden türevleri için yöntem önermişlerdir.

Ross (1971), Thoren (1972), matris karıştırma yöntemini ortaya koymuşlardır. Bu yöntemde sayısal özvektörler deneysel özvektörlerle karıştırılarak güncelleme yapılmaktadır. Yöntem daha sonra Link ve ark. (1987) tarafından geliştirilmiştir. Yöntemin temeli yapının bütün serbestlik derecelerinde ölçüm yapılması durumunda, yapının kütle ve rijitlik matrislerinin doğrudan elde edilebilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşım uygulamada iki temel sorunla karşılaşmaktadır. İlk olarak genellikle ölçülmüş olan mod sayısı serbestlik derecesinden azdır, ikinci olarak da yapıdan sadece sınırlı sayıda noktadan ölçüm alınabilmektedir. Ancak karşılaşılan bu güçlükler sayısal modelin kütle ve rijitlik matrislerinin kullanılmasıyla aşılabılır.

Collins ve ark. (1972), minimum varyans yöntemleri hem deneysel hem de sayısal modelde hata olduğunu kabul etmekte ve bu hataları matrislerin varyansı olarak ifade etmektedir. Minimum varyans yöntemi ağırlıklandırma her adımda değiştiği bir fark yöntemidir. Minimum varyans yöntemini, deneysel ölçümlerin istatistiksel olarak birbirinden bağımsız olduğu kabulü ile ortaya koymuşlardır. Ancak, bu kabul yalnızca ilk çözüm adımında doğrudur. Sayısal parametreler, deneysel verilerle güncellendiğinden ilk adımdan sonra istatistiksel olarak bağımsızlık durumu ortadan kalkmaktadır.

Collins ve ark. (1974), model güncelleme üzerine yapılan ilk yayınlardan biri olan çalışmalarında istatistik yöntemlerini model güncelleme yöntemi olarak kullanmışlardır. Sayısal modelde belirlenen parametreler, ölçülmüş olan modal değerlere ulaşılan kadar

minimizasyon işlemine devam edilmektedir. Bu yöntem daha sonra geliştirilerek duyarlılık analizine bağlı bir yönteme dönüştürülmüştür. Yöntem deneysel modeldeki özellikleri sayısal modeldeki parametreleri değiştirerek taklit etmeyi amaçlamaktadır. Duyarlılık yöntemleri temelde bilinmeyen bir fonksiyonun Taylor serisine açılımı ve ikinci mertebeden terimlerin ihmal edilebileceği kabulüne dayanır. Birinci mertebeden türev ifadelerine duyarlılıklar denir ve yöntem bu duyarlılıkların bir matris şekline getirilerek kullanır.

Chu ve ark. (1975), Ojalvo (1987), Tan ve ark. (1989), özvektörlerin birinci mertebeden türevlerinin hesaplanması için yöntemler önermişlerdir. Duyarlılık matrisi ölçüm sayısı ile güncellenen değerlerin sayısının birbirine eşit olmadığı durumlarda matrisin kare olmadığını ve bu durumda güncelleme denkleminde bu matrisin tersinin alınmadığını vurgulamışlardır.

Moore (1976), kontrol yöntemine dayalı güncellemeyi kontrol teorisinden yararlanarak oluşturmuştur. Eğer sadece özdeğerler kullanılır ise yönteme kutup yerleştirilmesi adı verilmektedir. Geri besleme teorisini kullanarak farklı özdeğerler için eşzamanlı özdeğer ve özvektör eşlemesi için gerek ve yeter şartları belirlemiştir.

Hart ve ark. (1977), Ojalvo ve ark. (1989), tekil değer ayrıştırma yöntemini kare olmayan duyarlılık matrisinin tersinin alınması için kullanmışlardır.

Cheni ve ark. (1980), güncellenen parametrelerin normunu, minimize etme şartını yeni bir kısıt denklemini olarak önermişlerdir.

Cheni ve ark. (1980), sayısal modelin doğrusal olmayan sönümlü kabulü altında güncellenebilmesi için temel bir yöntem geliştirmişlerdir.

Andry ve ark. (1983), mekanik bir sistemin parametrelerini belirleme yöntemini ilk kullananlardır. Genellikle güncellenen modelin kütle ve rijitlik matrisleri kısıt denklemleri kullanılmadığı sürece simetrik olmamaktadır. Güncellenen matrislerin simetrikliğinden emin olmak için tekrarlı bir yöntem ortaya koymuşlardır.

Berger ve ark. (1984), sayısal kütle matrisinin doğru olduğu varsayımıyla, kuvvet dengesinden yararlanmışlardır. Yöntem hata konumlandırması için ölçülmüş mod şekillerini ve sayısal modeldeki matrisleri kullanır. Bulunan artan vektörünün tekrarlı çözülmesiyle güncelleme yapılır. Link kuvvet artanının sonuç hatası minimizasyonunu ağırlıklandırılmış Bayesian yaklaşımıyla veya en küçük kareler yöntemiyle çözmektedirler.

Berman (1984), tahmin edilen parametrelerin, önceki analizin parametrelerinden minimum düzeyde uzak olabilmesi için önceki analitik modelin kullanımını önermiştir. Bu öneri model güncelleştirmedeki araştırmalara büyük bir ivme katmıştır.

Güncelleştirici parametre seçiminin iki hususta dikkat gerektirdiğini belirtmiştir. Bunlardan ilki kaç tane parametrenin seçileceği; ikincisi ise aday parametrelerden hangilerinin seçilecek olmasıdır. Güncelleştirme için az sayıda parametre kullanımı ve geniş hacimde ölçülmüş veri kullanımının en iyi seçim olacağını tavsiye etmiştir. Fiziksel bir testte, frekans alanı dijital örnekleme erişimi ile işe yarar, kullanılabilir bilgi ise frekans alanındaki titreşim modellerinin miktarı ile sınırlıdır tespitlerini yapmıştır.

Sidhu ve ark. (1984), 80' lerin sonunda geliştirilmiş olan hata matrisi yöntemi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sayısal kütle ve rijitlik matrislerinde hata olduğunu kabul edip ve bu matrisleri doğrudan güncellemeyi amaçlamışlardır. Hata matrisi yöntemi birinci mertebeden bir yaklaşımdır ve sadece küçük hatalar için doğru kabul edilebilir.

Caesar (1986), güncellenmiş kütle ve rijitlik matrislerinin fiziksel anlamlılığını artırmak için, farklı amaç ve kısıt denklemleri kullanmıştır. Kısıt derlemlerinin oluşturulmasında kütle merkezinin yeri, toplam kütle ve atalet momenti gibi yapının fiziksel özelliklerinden yararlanmıştır.

Thomas (1986), Dascotte ve ark. (1989), duyarlılık yöntemini sayısal modelin kütle ve rijitlik matrislerinin güncellenmesinde kullanmışlardır.

Heylen (1987) ve Wei (1990), sonlu eleman güncellemesinde farklı yaklaşımlar olarak doğrudan yöntemler kullanmışlardır. Doğrudan yöntemler, rijitlik veya kütle matrisinin ya da her ikisinin eş zamanlı olarak güncellenmesi anlamına gelir. Friswell ve ark. (1998) rijitlik ve viskoz sönüm matrisini aynı anda güncellemiştir.

Kuo ve ark. (1987), duyarlılık yönteminin temelinde yatan Taylor serisinin açılımındaki kabulden kaynaklanan hataları azaltmak için ikinci mertebeden terimlerini de kullanmışlardır.

Link ve ark. (1987), deneysel modeldeki mod şekillerinin sayısal modeldeki serbestlik dereceleri ile tamamlanabileceğini kabul ettiler ve ölçülmemiş deneysel modları da sayısal modelden aldılar. Bu yöntemle yapılan güncelleme sonucunda güncellenen sayısal modelin mod şekilleri ile deneysel mod şekilleri temsil edebilmesine rağmen kütle ve rijitlik matrisleri aşırı değişmektedir. Aşırı değişmiş kütle ve rijitlik matrisleri yapının toplam kütle, kütle dağılımı gibi fiziksel özelliklerini temsil edememektedir.

Lim (1987), özvektörlerin birinci mertebeden türevlerinin hesaplanması için yalnız düşük frekanslardaki modlar için geçerli bir yöntem önermiştir.

Fisette ve ark. (1988), bulunan artan vektörünün tekrarlı çözülmesiyle güncelleme yapılmasını önermiş, sonra yaklaşım doğrudan bir yöntem elde etmek amacıyla geliştirilmiştir.

Natke (1988), duyarlılık yöntemine güncellenen parametreleri ağırlıklandıran bir terim eklemiştir. Duyarlılık yöntemini birçok araştırmacı farklı bilinmeyenleri güncellemek için kullanmıştır.

Zhang ve ark. (1988), geliştirilmiş hata konumlandırma yöntemine daha fazla denklem yazabilmek için seçilmiş olan vektörlerin iz düşümlerini de eklemiştir, ancak yöntemin temel denklemleri çok büyük bir değişikliğe uğramamıştır. Ayrıca hata konumlandırmaya dayalı bir önerme de yapmışlardır. Yöntemin bu şekli kütle ve rijitlik matrisindeki hataları bulabilmektedir ama bulunan hatanın hangi matrise ait olduğunu ayıramamaktadır.

Friswell (1989), sayısal modeldeki belirsizlikleri ve ölçümlerdeki paraziti hesaba dahil eden ve her çözüm adımında değişen bir ilişkilendirme matrisi önermiştir. Bu matris bir sonraki adımdaki güncelleme sonuçlarının elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Wei (1989), atalet momentlerini güncellenen parametreler olarak seçmiş ve basit bir üç boyutlu çubuk örneğini güncellemiştir. Ancak güncellenmiş olan eleman matrisleri fiziksel olarak anlamsız şekilde güncellenmişlerdir.

Dascotte (1990), sayısal ve deneysel verilerin birleştirilmesinin göreceli önemini bir uygulama üzerinde değerlendirmiştir. Yapının fiziksel özelliklerini güncellenen parametreler olarak değerlendirmiştir.

Friswell (1990), elastisite modülü, geometrik parametreler ve malzemelerin birim hacim ağırlığı gibi fiziksel parametre güncelleştirilmesi üzerinde çalışmıştır. Bu açıdan, kütle ve rijitlik matrisleri parametrelerin doğrusal olmayan fonksiyonları olarak görülebilmektedir fikrini savunmuştur.

Lieven ve ark. (1990), geliştirilmiş Hata Matrisi yöntemini ortaya koymuşlardır. Bu yöntemde Tekil Değer Ayrıştırması kullanılmakta ve sistem matrislerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Imregun ve Visser (1991), Mottershead ve Friswell (1993), deneysel modal verilerle sayısal modal veriler arasındaki uyumu sağlayarak hasarın belirlenmesi genel olarak sonlu eleman modeli güncellemesi (SEMG) yöntemiyle mümkün olabilir kanaatine varmışlardır. SEMG asıl olarak 1990' ların başlarında gelişmeye başlamıştır. Burada amaç hasarlı ve hasarsız durumdaki yapının doğal frekansları ve mod

şekillerinin arasındaki farkın minimize edilerek elastisite modülü gibi malzeme özelliklerindeki veya rijitlikteki değişimin bulunmasıdır. Rijitlik ile modal parametreler arasındaki ilişki, rijitlikteki değişimin modal parametrelerde değişikliğe yol açmasına neden olur. Yapının elemanlarında, malzeme özelliğinin birbirinden bağımsız bir şekilde değişmesi hasarın yerel olarak yeterli bir şekilde saptanmasını kolaylaştırmıştır. Bu konuda önemli çalışmalar yapmışlardır.

Ojalvo ve ark. (1991), ikinci mertebeden özdeğer duyarlılıklarını kütle ve rijitlik matrislerini güncellemede kullanmışlardır.

Pandey ve ark. (1991), mod şekillerinin türevlerinden yararlanarak hasar belirleme çalışmaları yapmışlardır. Bu türevlerin, küçük yer değiştirmelere karşı daha duyarlı olmalarına karşın, doğru bir şekilde hesaplanabilmelerinin oldukça zor olduğunu belirtmişlerdir.

Jung (1992), Chen (2001), doğrudan yöntemler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sayısal model verilerinin, deneysel modelin verileri ile tamamlanması prensibine dayanan yöntemde sayısal modelin sistem matrisleri doğrudan deneysel modelin matrislerinin kullanılmasıyla güncellenmektedir. Doğrudan yöntemlerde güncelleme eşitliği tek seferde çözülmekte ve sonuca ulaşılmaktadır. Yöntemlerin uygulanmasında deneysel model ile sayısal model arasındaki serbestlik derecesi farkına bağlı olumsuzluklar bulunmaktadır. Ölçüm sistemlerinin gelişime bağlı olarak bu yöntemlerin bazı olumsuz yanları giderilebilmektedir.

Nalitoela ve ark. (1992), Li ve Brown (1995), sonlu eleman güncellemesinin önemli problemlerinden birinin de deneysel verilerin genelde yeterli olmaması olduğuna dikkat çekerek, deneysel verileri arttırmak için yapıyı farklı şekillerde teste tabi tutmuşlardır.

Visser (1992), özdeğer kısıt yöntemi veya iki tepki yöntemi olarak adlandırılan yöntem üzerine çalışmalar yapmış ve uygulamada sınırlı başarıya sahip olduğunu belirtmiştir.

Gladwell ve Ahmadian (1994), her bir sonlu elemanın özdeğer ve özvektörlerini değiştirerek, kütle ve rijitlik matrisinin “yapısında” değişiklik yapan parametrelerin güncelleştirilmesi üzerinde çalışmışlardır.

Shulz ve ark. (1994), güncellenen matrislerin simetrikliğinden emin olmak için tekrarlı bir yöntemi yapının fiziksel özellikleriyle ilgili olan kısıtlar altında uygulamışlardır.

Friswell ve ark. (1995), bütün model güncelleme yöntemlerinde olduğu gibi tekrarlı yöntemlerin amacı da sayısal model ile deneysel model arasındaki uyumun artırılması

olduğunu bildirmişlerdir. Bu uyum genellikle sayısal model ile deneysel modelin özdeğerlerinin farkının karesini kullanan bir fark fonksiyonunun oluşturulmasıyla belirlenir. Bu fark fonksiyonunun doğası gereği tekrarlı çözüm gerektirmektedir. Tekrarlı yöntemler güncellenecek değişkenler için geniş seçim olanaklarının yanında başlangıçta seçilen parametrelerin ağırlıklandırılabilmesine de olanak sağlarlar. Parametrelerin ağırlıklandırılabilmesi bu yöntemlere avantaj ve esneklik kazandırır. Ancak doğru ağırlıklandırma değerlerinin belirlenmesi mühendislik bakış açısı ve tecrübe gerektirmektedir.

Mod açılımı yerine sayısal modelin serbestlik derecesinin deneysel modelin serbestlik derecesine indirgenebileceğini, ancak bu durum da hata konumlandırmanın çok zor olduğunu vurgulamışlardır. Doğrudan yöntemler ayrıca doğrudan sistem matrislerini güncellemeye çalıştıklarından, güncelleme sonucu ortaya çıkan matris fiziksel olarak anlamsız olabilmektedir. Tekrarlı yöntemler doğrudan yöntemlere oranla daha büyük hesap yükü getirmektedir. Bu yöntemler her adımda tekrar sayısal modelin çözülmesini gerektirmektedir. Buna ek olarak yakınsama her koşulda garanti edilememektedir. Bu olumsuzluklarına rağmen tekrarlı yöntemler güncellenmiş olan modelin sistem matrislerinin anlamlı olmasını sağlamaktadır. Ağırlıklandırma ile de mühendislik tecrübesi güncelleme sürecine eklenebilmektedir.

Lindholm ve ark. (1996), Bayesian yaklaşımını kullanmışlardır. Güncellenen parametreler hakkındaki ilk yaklaşık bilgileri ve deneysel verilerdeki hata tahminlerini çözüm sürecine ekleyerek, çözüm sürecini daha dengeli hale getirmişlerdir. Daha dengeli çözüm sürecine bağlı olarak, güncelleme sonuçlarının kalitesinin iyileştiğini belirtmişlerdir.

Stubbs ve Kim (1996), Shi ve ark. (2000), başka bir yaklaşım olarak modal şekil değiştirme enerjisini kullanarak sonlu eleman güncellemesi yapmışlardır.

Ziaei Rad ve ark. (1996), Shulz ve ark. (1994) yöntemini büyük sistemlerde kullanabilmek için bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Bicanic ve Chen (1997), Salawu (1997), doğal frekansların yalnız başına kullanılması, yapının tek bir noktasında ölçülerek kolay bir şekilde bulunması açısından çekici olduğuna dayanarak, bu konuda araştırmalar yapmışlar fakat frekansların tek başına yapının dinamik davranışını yansıtmadığını görmüşlerdir.

Doubling ve Farrar (1997), hasarın mod şekillerinde önemli bir değişiklik meydana getirip getirmediğini incelemişler ve hasar belirlemede mod şekillerinin kullanılması ve mod şekli vektörünü doğru bir şekilde oluşturmak için yapının birçok yerinde ölçüm yapılması gerektiğini tavsiye etmişlerdir.

Kenigsbueh ve ark. (1997), yine kütle ve rijitlik matrislerini doğru kabul etmişlerdir, ancak optimizasyon kriteri olarak kütle matrisi yerine ağırlıklandırma matrisi kullanmışlardır. Bu değişiklikle hata konumlarındaki hakkındaki ön bilgi ve mühendislik tecrübesi güncelleme sürecine dahil edilebilmiştir.

Natke ve Cempel (1997), frekans ve mod şekillerindeki değişimlerden yararlanarak çelik bir köprüde hasar belirleme çalışmaları yapmışlardır.

Friswell ve Penny (1998), Hao ve Xia (2002), Rao ve ark. (2004), gibi araştırmacılar farklı sonlu eleman modelleri ve uygunluk fonksiyonları kullanarak genetik algoritmaları hasar belirlemede kullanmışlardır. Genetik algoritmalar güçlü bir yöntemdir, fakat pek çok etken yakınsamada önemli rol oynamaktadır.

Fritzen ve ark. (1998), sonlu eleman modeli güncellemesinde genelde dinamik veri olarak, ölçülmeleri daha kolay olduğundan doğal frekans, mod şekillerini ve buna alternatif bir yaklaşım olarak frekans tepki fonksiyonlarını (FTF) kullanmışlardır.

Fritzen ve Bohle (1999), Teughel ve ark. (2002), değişken sayısını azaltmak için bir başka yol olarak hasar fonksiyonlarını kullanmışlardır.

Kosmatka ve Ricles (1999), bir kafes sistemini sonlu elemanlar metoduyla güncelleyerek hasarı belirlemeye çalışmışlardır.

Sas ve ark. (1999), güncellenecek parametrelerin seçimi için güncellenebilecek sayısal model parametrelerini şu şekilde sıralamaktadırlar: Sistem matrislerinin bağımsız elemanları, sayısal modelin farklı yerlerini temsil eden alt sistem matrisleri, sayısal modelin malzeme ve geometrik büyüklükler gibi fiziksel özellikleri bu seçenekler arasındadır. Sistem matrislerinin bağımsız elemanlarının veya bu matrislerin alt matrislerinin güncellenmesi için sistem matrislerinin tekrar oluşturulmasına gerek kalmadığını belirtmektedirler. Bu seçeneklerin güncellenmesinin sonlu elemanlar yazılımına ihtiyaç duyulmamasından ötürü daha kolay olduğunu belirtmektedirler. Güncellemenin yapılacağı alan olarak modal alanı daha uygun görmektedirler. Frekans alanında güncelleme yapılabilmesi için deneysel modeldeki frekans tepki fonksiyonlarının (FTF) parazitsiz ve çok kaliteli olmasının gerektiğini, ancak istenilen kalitede FTF'leri elde etmenin uygulamalarda sorun yaratabildiğini belirtmişlerdir. Buna karşın modal alanda özdeğerler ve özvektörlerin daha kesin olarak elde edilebildiğini, modern ölçüm olanaklarıyla özellikle özdeğerlerin oldukça başarılı şekilde belirlenebildiğini belirtmişlerdir.

Brownjohn ve Xia (2000), sonlu eleman güncellemesi birçok yapı çeşidine farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak uygulanmıştır. Singapur' daki asma köprü olarak tasarlanmış Safti Link köprüsünün dinamik davranışını deneysel verilerle betonun elastisite modülündeki değişimi doğrulayarak incelemiştir.

Vestroni ve Capecchi (2000), basit bir kirişte doğrudan yöntemi kullanmışlardır. Genel olarak etkili sonuçlar elde edilse de bu araştırmalarda basit yapılar kullanılmış ve hasar sınırlı tutulmuştur.

Chen (2001), Lagrange çarpanları yönteminde deneysel kütle ve rijitlik matrislerinin doğru olduğu kabulünden hareketle sayısal kütle ve rijitlik matrislerinin Lagrange çarpanları yardımıyla oluşturulmuş kısıt denklemleri yardımıyla elde edildiğine yönelik çalışmalar yapmıştır.

Chen (2001), kontrol yöntemine dayalı yöntemlerin uygulamasında bazı kısıtların bulunduğunu ortaya koymuştur. Deneysel ölçümlerin, sayısal modelin tüm serbestlik derecelerinde yapılması gerektiğini ve güncellenmiş matrislerin simetrisini sağlayabilmek için özel bir çaba gerektiğini ifade etmiştir.

Ge ve Lui (2005), 10 parçaya bölünerek modellenmiş bir ankastre konsol kirişte hasar tespiti yapmışlardır.

Yu ve ark. (2006), Northridge depreminde hasar görmüş mevcut 5 katlı bir yapıda sonlu eleman güncellemesi yöntemi ile hasar belirleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında doğal frekans değişimlerini ve frekans tepki fonksiyonlarını (FTF) kullanmışlardır.

Literatür araştırması sırasında dikkat çeken belirgin konu, güncelleme yöntemlerinin sınıflandırılması konusundaki farklılıklardır.

Jung (1992), Chen (2001) ve Rad (1997), yöntemleri güncelleme probleminin çözüm yöntemine göre, yani doğrudan yöntemler ve tekrarlı yöntemler olarak sınıflandırmaktadır.

Visser (1992), ise yöntemleri kullandığı verinin alanına göre, yani modal alan yöntemleri ve frekans alanı yöntemleri olarak ayırmaktadır.

Friswell ve ark. (1995), ise her iki şekilde de sınıflandırmıştır. Ayrıca aynı yöntem farklı kaynaklarda değişik isimlerle anılmaktadır.

Doğrudan yöntemlerin avantajları, tekrarlı çözüm gerektirmediklerinden ıraksama oluşmamaktadır ve her adımda sayısal modelin tekrarlı çözümünü gerektirmemektedirler. Ancak doğrudan yöntemler, sayısal model ile deneysel modelin serbestlik derecelerinin aynı

olmasını gerektirmektedir. Bu problem mod açılım yöntemleriyle çözülebilmektedir, ancak bu seferde deneysel modele belli olmayan bir oranda hata eklenmektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Tepki Ölçümleri

Yapının titreşim davranışının belirlenmesi için yapılan ölçümlerde amaç, yapının belirli sınır koşulları altında frekansa bağlı tepkilerini ölçmektir.

FTF' larının etki noktası ile ölçüm noktası arasındaki ilişki üç şekilde olmaktadır. Tek Giriş Tek Çıkış (TGTC) ölçümlerde etki noktaları ve ölçüm noktaları değişkendir. Değişkenlik ölçülen her FTF' larının ayrı ayrı modal analiz yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Tek Giriş Çoklu Çıkış (TGÇÇ) ölçümlerinde FTF' ları aynı noktadan aynı etki verilerek farklı ölçüm noktalarından alınmaktadır. FTF' ları arasında aynı etki kuvvetine karşı verilen tepki ilişkisi bulunduğundan FTF' larının modal analizi topluca yapılmaktadır. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (ÇGÇÇ) ölçümlerinde birden fazla noktadan etki verilerek farklı ölçüm noktalardan ölçüm alınmaktadır. Bu ölçümle alınan FTF' ları arasında birden fazla etki kuvvetine karşı verilen tepki ilişkisi bulunduğundan bu FTF' ları da topluca modal analiz yapılmaktadır. Ancak modal analiz yöntemi TGÇÇ ölçümlere uygulananlardan farklıdır.

TGTC, TGÇÇ ve ÇGÇÇ ölçümler yapı hakkında farklı miktarlarda bilgi barındırmaktadır. Bu ölçümlerde yapının tepki modelinin FTF matrisinin farklı yerlerini ölçülmektedir. FTF matrisinde satır indisi ölçüm noktalarını sütun indisi ise etki noktalarını göstermektedir.

TGTC ölçümde etki ve ölçüm noktaları değişken olduğundan FTF matrisinin sadece bir elemanı ölçülmektedir.

TGÇÇ ölçümlerde etki noktası sabit ölçüm noktaları değişken olduğundan FTF matrisinin bir sütunu ölçülmektedir.

ÇGÇÇ ölçümlerde ise etki noktasının birden fazla oluşu ve ölçüm noktaları değişken olduğundan FTF matrisinin birden fazla sütunu ölçülmektedir.

Görüldüğü gibi ÇGÇÇ ölçümler yapı hakkında en çok bilgi barındıran ölçümlerdir. Bu ölçümlerin daha çok veri barındırmaları hem modal değerlerin çok daha kaliteli elde edilmesine olanak sağlamakta hem de simetrik yapılarda frekansları birbirine çok yakın modların tanımlanması ve mod şekillerinin çıkartılmasını kolaylaştırmaktadır. Herhangi

bir yapının deneysel modal analizi sırasında birden fazla yöntem kullanılabilir. Modal analiz için seçilecek olan yöntem elde verilerin kalitesi ve miktarına bağlıdır. Modal analiz sonuçlarının kalitesi büyük ölçüde ölçümlerin kalitesiyle ilgilidir.

Elektronik ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, yapıların mevcut durumda ve deprem altındaki dinamik davranışlarını yapıya kurulan izleme sistemleri vasıtası ile incelemeyi laboratuvar ve sayısal yöntemlere karşı hem daha ekonomik hem de daha doğru sonuçlar veren bir alternatif haline getirmektedir. Bu konudaki en etkili gelişmeler deprem mühendisliği alanında olmaktadır. Bugün deprem bölgelerinde donatılmış yüzlerce bina gerçek bir arazi laboratuvarı oluşturmakta ve her depremde binlerce sayıda benzeri olmayan veriler sağlamaktadır. Deprem mühendisliğinde kullanılan yapı izleme sistemlerinin amacı ve kullanılan yöntemler kısaca anlatılmıştır.

3.1.1. Çevresel Titreşimler

Çevresel titreşimler, Mikrotremor olarak adlandırılır. Mikrotremor, farklı kaynaklardan yayılan yeryüzündeki sürekli titreşimlerdir. Bu mikro sarsıntıların kaynağı da çeşitlilik gösterir. Yerkürenin belli bir ekseninde dönmesi, gelgit etkisi, jeotermal aktiviteler, yeraltındaki sismik aktiviteler, atmosfer etkileri, rüzgar ve kültürel gürültüler (trafik, endüstriyel aktiviteler ve diğer bazı insan kaynaklı etkiler) olarak sayılabilir. Bütün bu etkenler yeryüzünde titreşim olarak algılanabilir. Yeryüzünde çok küçük titreşimler (Bu titreşimlerin genlikleri 0.1 mikron–1 mikron, periyotları ise 0.05–2 saniye arasında değişir) olarak nitelendirebileceğimiz mikrotremorların yüzey dalgaları mı yoksa cisim dalgaları mı olduğu hakkında çeşitli araştırmacıların değişik görüşleri bulunmaktadır. Genel olarak mikro depremler ve diğer bazı derin kaynaklardan oluşan titreşimlerin karakterleri cisim dalgaları ile ilişkilendirilirken; rüzgar ve insan kaynaklı diğer sığ gürültüler ise yüzey dalgaları yaklaşımı ile değerlendirilirler. Bir bölgedeki titreşimler, o bölgelerde zeminin doğal gürültüsünü oluştururlar. Farklı zemin koşullarına ait zeminin doğal gürültüsü de farklı olacaktır. Bu kavramdan yola çıkılarak basit homojen yatay tabakalı ortam kabulü yapılarak, zemin etkin periyodunun, doğrudan mikrotremor ölçümleri ile belirlenerek bölgede kuvvetli zemin hareketi verisi olmaması durumunda da saptanması olanaklı olmaktadır. Mikrotremor, uygun aygıt ile

çeşitli bölgelerde ölçümler yapılarak zemin etkin periyodu ve bir yaklaşım olarak etkin periyottaki büyütme katsayısı gibi parametreler bulunabilir. Arazide mikrotremor ölçümlerinin alınması için temel olarak bir kayıt aleti, kayıt aletinin yapısına bağlı olarak bilgisayar, sismometre sistemi, güç birimi ve bunlara bağlı yan birimler gerekmektedir.



Şekil 3.1. Mikrotremor ölçüm aygıtları (ivmeölçerler)

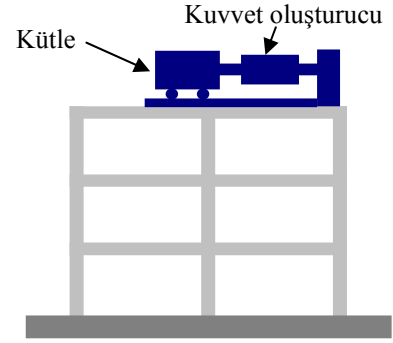
Mikrotremor aygıtları, yapıda istenilen noktadaki ivme değerini ölçer. Ölçüm yaptığı frekans aralığına, eksen takımına ve ölçüm yerine göre türlere ayrılır. Aldığı verileri, veri toplama birimine gönderir.



Şekil 3.2. Veri toplama birimleri

3.1.2. Yapay Titreşimler

Bu titreşim kaynaklarından en çok kullanılanı “Eksantrik Kütleli Titreştirici” dir. Eksantrik kütleli titreştiriciler, malzeme özelliklerinin ve yapıların rezonans frekanslarını hesaplamak amacı ile ve sönüm oranı, mod şekilleri ve diğer dinamik özelliklerini belirlemek için kullanılırlar. Sayısal modellerin geliştirilmesinde, hasar tespit çalışmalarında ve yapı dinamiği temel araştırmalarını yapmada, vs. kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Eksantrik kütleli titreştiriciler

Tez çalışmasında kullanılan çelik deney yapısında, eksantrik kütleli titreştirici ile verilen titreşimden de yapı parametreleri belirlenmiştir.

Sırası ile ilk bölümde izleme sistemlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yapı içinde nasıl yerleştirileceği konusu ele alınmakta, daha sonra kaydedilen verinin nasıl analiz edileceği konusundaki yöntemler anlatılmaktadır. Yapı izleme sistemlerinin pratikte kullanılmasındaki en önemli adım alınan kayıtların doğru olarak analiz edilmesidir. Burada anlatılan yöntemler Fourier dönüşümü ve bant-geçişli filtrelemeyi gerektirmektedir. Bu yöntemlerle yapının modal karakteristikleri (periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları), yapıdaki burulma ve öteleme titreşimlerinin genlik, periyotları ve yapıda yapı-zemin etkileşiminin olup olmadığı ve varsa mertebesi kolaylıkla tayin edilebilmektedir. Metotların ana hatları teorik detayları ile verilmiştir.

Son yirmi yıl içinde elektronik ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yapı mühendisliğinde de önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Bu değişikliklerin en çarpıcı örneklerinden birisi yapıların dinamik davranışlarının incelenmesi konusunda izlenen yöntemlerdir. Eskiden laboratuvar testleri veya sayısal yöntemlerle çözülmekte

olan birçok problem bugün gerçek yapılara kurulan izleme sistemleri sayesinde çok daha doğru olarak çözülebilmektedir.

Bu konudaki en büyük gelişmelerden biri deprem mühendisliği alanındadır. Yapıların deprem altındaki dinamik davranışları genelde analitik modeller veya sarsma masaları üzerine kurulan küçük ölçekli model yapılar vasıtası ile araştırılmaktadır. Günümüzde üzerlerine aletler yerleştirilmiş deprem bölgelerindeki yüzlerce yapıdan alınan deprem verileri yapıların deprem davranışı konusunda çok daha gerçekçi bilgiler vermektedir.

Gerçek yapılardan alınan tepki verileri laboratuvar deneylerinden alınan verileri geçersiz kılan değil fakat tamamlayan veriler olarak görülmelidir. Modelleme ve ölçeklemeden doğan hatalara ilave olarak laboratuvar testlerinin en büyük dezavantajı temel etrafındaki zemin yer değiştirmelerinin deprem davranışına etkisinin (yapı-zemin etkileşiminin) testler sırasında göz önüne alınmamasıdır. Mevcut binalardan alınan titreşim verileri yapı-zemin etkileşiminin, özellikle yumuşak zeminlere oturan ağır yapılarda, çok büyük bir faktör olduğunu göstermektedir. İzleme sistemleri sayesinde yapıların deprem davranışları, yapı-zemin etkileşimi de dahil, çok daha doğru bir şekilde izlenebilmektedir. Buna karşılık laboratuvar deneyleri çok daha kontrollü bir ortamda istenildiği zaman yapılabilen, istenildiği kadar tekrar edilebilen ve yapı yerdeğiştirmelerinin lineer sınırın ötesinde istenildiği kadar artırılabilirdiği deneyler olduğu için önemlidir.

İzleme sistemlerinden alınan veriler öncelikle yapının tasarımı ve sayısal modellenmesi sırasında kullanılan dinamik parametrelerin (örneğin, periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları gibi) doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılır. Ayrıca veri sayesinde yapının elastik ve elastik olmayan davranışlarını, yapı-zemin etkileşiminin mertebesini, burulma ve öteleme titreşimlerinin genlik ve periyotlarını, yapıda gözle görülemeyen hasarların olup olmadığını tayin etmek mümkün olabilmektedir. Titreşim ne kadar büyükse yapı yerdeğiştirmeleri de uygun oranda büyür ve dolayısı ile verilerden daha ayrıntılı bilgi çıkarılabilir.

Yapıların dinamik hareketlerinin izlenmesindeki en son uygulama Yapı Sağlığı İzlemesi olarak adlandırılan gerçek zamanlı izleme sistemleridir. Tezin temel aldığı, oluşturulmuş olan yöntemde “Deneysel İnceleme Sistemi” olarak ifade edilmektedir. Deneysel sistemlerde yapının hareketleri gerçek zamanlı ve sürekli olarak sürekli izlenir ve kayıtlar da yine gerçek zamanlı olarak analiz edilir. Bu sistemlerde amaç yapının dinamik özelliklerinde olan her türlü değişikliği anında tespit edip bunun yapı için bir

tehlike oluşturup oluşturmadığına karar vermektir. Dinamik özelliklerdeki değişiklikler deprem, fırtına, patlama gibi aşırı yüklerin oluşturduğu ani hasarlar nedeniyle olabildiği gibi, yapıda normal kullanımdan doğan aşınmaların zamanla birikmesiyle oluşan hasarlar nedeniyle de olabilir. Yapı izleme sistemlerinin pratikte uygulanmasında en önemli konu alınan kayıtların doğru bir şekilde analizi ve veride saklı bilgilerin optimum şekilde açığa çıkarılmasıdır.

3.1.3. Amaç ve Yöntem

Yukarıda da belirtildiği gibi, yapı izleme sistemlerinin ana amaçları yapının dinamik ve statik hareketlerini kaydetmek, bu davranışı kontrol eden parametrelerin sayısal değerlerini kayıtlardan hesaplamak, bu parametrelerdeki değişiklikleri, bu değişikliklerin yerlerini ve nedenlerini tayin etmektir. Bu bilgiler daha sonra mevcut yapı tasarım ve analiz metotlarının doğruluğunun kontrolünde, yapı yönetmeliklerinin iyileştirilmesinde, yeni yapı onarım ve güçlendirme metotlarının geliştirilmesinde ve yapılardaki hasarın yer ve büyüklüğünün tespitinde kullanılır.

Deprem mühendisliğinde kullanılan yapı izleme sistemlerindeki standart uygulama, yapıya beklenen ana hareket birleşenlerini tayin etmeye yeter sayıda ve konumda ivmeölçerler koymak ve bunları senkronize olarak merkezi bir kayıt sistemine bağlamak olarak özetlenebilir.

Gerekli ivmeölçerlerin sayısı ve konumu ölçülecek hareketin iki veya üç boyutlu olmasına bağlı olarak değişir. Rijit bir kütle için düzlemde veya uzayda yaptığı yer değiştirmeleri tarif eden koordinat dönüşümü denklemlerini yazarak gerekli ivmeölçerler sayısını ve konumu belirlemek mümkündür. İki boyutlu (bir düzlem içinde) olan bir hareket iki öteleme ve bir dönme ile tanımlanabilir. Dolayısı ile böyle bir hareketi olan rijit bir yapıda (örneğin perdeli ve rijit kat döşemeli bir binanın katları) bu üç bilinmeyeni tayin edebilmek için en az üç ölçmeye ihtiyaç vardır. Rijit hareket denklemlerindeki öteleme ve dönmelerin tekil olarak çözülebilmesi için üç ölçmenin aşağıdaki şartları sağlaması gerekir:

- Ölçmeler en az iki değişik noktada yapılmalıdır.
- Ölçmelerin doğrultularının üçü de birbirine paralel olmamalıdır.

— Ölçmelerin doğrultularının üçü de tek bir noktada kesişmemelidir.

Benzer şekilde, üç boyutlu (uzayda) bir hareket üç öteleme ve üç dönme ile tanımlanabilir. Böyle bir hareketi olan rijit bir yapıda (örneğin asma köprü tabliyelerini oluşturan parçalar) bu altı bilinmeyi tayin edebilmek için en az altı ölçmeye ihtiyaç vardır. Rijit hareket denklemlerindeki öteleme ve dönmelerin tekil olarak çözülebilmesi için altı ölçmenin aşağıdaki şartları sağlaması gerekir:

- Ölçmeler en az üç değişik noktada yapılmalıdır.
- Ölçmelerin yapıldığı noktalar bir doğru üzerinde olmamalıdır.
- Ölçmelerin doğrultularının altısı da birbirine paralel olmamalıdır.
- Ölçmelerin doğrultularının altısı da tek bir noktada kesişmemelidir.

Yukarıdaki koşullar yapı hareketinin rijit bir kütle hareketi olduğu varsayımına dayanmaktadır. Esnek yapılar için yapıyı her biri rijit kabul edilebilecek bölünmüş elemanlar halinde düşünmek ve bu koşulları her bir eleman için uygulamak gerekir. Örneğin, çok katlı bir bina esnek bir yapıdır, fakat binanın kat döşemeleri yatay düzlemde hareket eden rijit parçalar olarak düşünülebilir. Dolayısı ile binanın her katında yukarıda belirtildiği şekilde üç ölçme yapılır ve her kattaki ölçmeler anında kaydedilir ise bütün binanın davranışını ölçülmüş olur. Esnek yapılarda ivmeölçerler kabul edilen rijit elemanların hareketlerini ölçecek şekilde ve mümkünse birden fazla eleman için ortak ölçme yapacak şekilde yerleştirilmelidir. Bina tipi yapılar için ivmeölçerlerin yerleri ve sayısı konusunda aşağıda genel kurallar verilebilir:

- İlk grup ivmeölçerler binanın çatı katına konulmalıdır.
- İkinci grup ivmeölçerler binanın temel üstüne (zemin veya bodrum katı) konulmalıdır.
- Üçüncü grup ivmeölçerler binada rijitliğin ve kütlelerin değiştiği noktalara konulmalıdır.
- Daha sonraki ivmeölçer grupları binanın serbest titreşim modlarının maksimum olacağını tahmin ettiğimiz noktalara konulmalıdır.

Her grupta ne kadar ivmeölçer olacağı binanın beklenen davranışına göre değişir. Örneğin sadece yatay titreşimlerin beklendiği bir binada her kata üç ivmeölçer yeterlidir. Eğer yatay harekete ilave olarak öteleme tipi (temel etrafındaki rijit yapı dönmeleri) hareketler de bekleniyorsa temele üç yataya ilave olarak üç de düşey ivmeölçer koymak gerekir.

3.1.4. Veri Analizi

Aygıtlardan alınan kayıtların analiz edilmeden önce veri süreci denilen bir veri temizleme işleminden geçirilmesi gerekir. Bu işlem analizi kolaylaştırdığı gibi analiz sonuçlarındaki hata oranlarını da azaltır. Titreşim kayıtları için veri süreci aşağıdaki adımları kapsar:

- Verideki ortalama değerlerin ve lineer hataların ayıklanması
- Kayıtlardaki gürültünün, fazla olduğu çok düşük ve çok yüksek frekanslı kısımların filtre edilmesi.
- Yapıda mevcut en yüksek frekans değerleri göz önüne alınarak gerekirse kayıtlardaki örnekleme aralığının yükseltilmesi
- Eğer ivmeölçerlerden alınan kayıtlar senkronize değilse sayısal yöntemler kullanarak kayıtların senkronize edilmesi

Verilen bir kayıttan çıkarılabilecek frekansların en küçük aralığı Δf , ve en yüksek frekans değeri, f_N , kayıtın uzunluğu ve örnekleme aralığı ile ilgilidir ve aşağıdaki formüllerle belirlenir:

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t}, \quad f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.1)$$

Denklemlerde N kayıttaki toplam nokta sayısını ve Δt de kayıtın örnekleme aralığını gösterir. Literatürde Δf frekans çözünürlüğü ve f_N de Nyquist frekansı olarak adlandırılır. Bu denklemlere göre N -nokta uzunluğunda ve Δt örneklem aralığında bir kayıttaki birbirine Δf den daha yakın iki frekansı birbirinden ayırmak mümkün olmadığı gibi f_N den daha büyük frekansları görebilmek de mümkün değildir.

Bir dinamik sistemden elde edilen kayıtların analiz edilerek sistemin mekanik karakteristiklerinin bulunması konusu ile ilgilenen bilim dalı Sistem Tanımlanması olarak adlandırılır. Yapının dinamik davranışı ile ilgili ana parametrelerinin kayıttan nasıl elde edileceği aşağıda her bir parametre için özet olarak verilmiştir.

3.1.5. Modal Frekanslar

Yapının modal frekanslarını bulmanın en basit yolu proses edilmiş verinin Fourier dönüşümünü almaktır. Fourier dönüşümü esas olarak verinin sonlu sayıda sinüs eğrisinin genliklerini değiştirerek ve birbirine göre kaydırarak toplanmasına eşdeğer hale getirme işlemidir. N Noktalı ve Δt örnekleme aralıklı bir veri için Fourier dönüşümündeki frekans eksenini aşağıdaki frekans değerlerinden oluşur:

$$f_k = \frac{k-1}{N\Delta t}, k = 1, \dots, \frac{N}{2} + 1 \quad (3.2)$$

Fourier dönüşümünde genliğin maksimum olduğu frekanslar yapının modal frekanslarını gösterir.

Genelde her kayıt hem yapı ile ilgisi olmayan dış nedenlerin, hem de ivmeölçer ve kayıt sistemindeki elektronik ve mekanik parçaların yarattığı yapıya ait olmayan ve gürültü olarak adlandırılan bir miktar istenmeyen sinyalleri içinde bulundurur. Bu istenmeyen sinyaller geniş bir frekans bandını kapsar ve Fourier dönüşümünde birçok yapı ile alakası olmayan suni maksimumların oluşmasına sebep olur. Bu maksimumların yapının tabii frekanslarından oluşan maksimumlara etkisini azaltmak için Fourier dönüşümleri simetrik kayıcı pencereler kullanılarak düzleştirilir. Kayıcı pencerenin işlevi her hangi bir frekanstaki Fourier genlik değerini o frekans civarındaki genliklerin ağırlıklı ortalaması cinsinden yeniden hesaplamak olarak özetlenebilir. matematiksel olarak bu aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\bar{A}_f = \sum_{k=1}^{2m+1} W_k A_{f-m-1+k} \quad (3.3)$$

\bar{A}_f ve A_f düzleştirilmiş ve orijinal Fourier genliklerini, W ise $2m+1$ uzunluğundaki simetrik düzleştirme penceresini gösterir.

Kayıcı pencereler gürültüden olan maksimumların Fourier dönüşümündeki etkisini azaltır ve yapının modlarından doğan gerçek maksimumların daha net olarak tanımlanabilmesini sağlar. Düzleştirme pencerelerinin seçiminde en önemli parametre

pencere uzunluğudur. Çok kısa pencereler gürültü etkisini yeterince azaltmazken, çok uzun pencereler gürültünün yanı sıra yapının bazı modlarını da elimine edebilir. Optimum pencere uzunluğunu bulmak için basit bir yöntem Fourier genlik spektrumunun karesinin altındaki alanı hesaplamak ve bunun pencere uzunluğu ile değişimini izlemektir (Şafak, 1997). Genelde pencere uzunluğu arttıkça alanın değeri küçülür. Alandaki pencere uzunluğu ile düşüşü çizdiğimizde düşüş hızının ilk başlarda çok dik olduğunu, pencere uzunluğu arttıkça düzleştiğini görürüz. Bu eğrinin eğiminin en fazla değiştiği noktaya karşı gelen pencere uzunluğu optimum pencere uzunluğu olarak alınabilir.

3.1.6. Mod Şekilleri

Çok serbestlik dereceli ve elastik bir yapının dinamik hareketi yapının serbestlik derecesine eşit sayıdaki tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik hareketlerinin toplamı olarak ifade edilebilir.

Verinin Fourier genlik spektrumu vasıtası ile bulunan hakim frekansları yapıyı oluşturan tek serbestlik dereceli sistemlerin frekansları, yani yapının modal frekanslarıdır.

Mod şekilleri yapının her modal frekansta hangi geometrik konumda titreştiğini gösterir. Eğer yapıdaki sönüm yapının kütle ve/veya rijitliği ile lineer olarak orantılı ise yapının modal frekansları ve mod şekilleri nümerik olarak reel değerler cinsinden bulunabilir. Aksi takdirde modal frekanslar ve mod şekilleri ancak karmaşık değerler cinsinden ifade edilebilir. Orantılı sönüme sahip bir yapıda eğer herhangi bir mod şekli başlangıç yerdeğiştirmesi olarak verilirse, yapı bu şekli hiç bozmadan ve bütün noktalarda aynı oranda azalarak, duruncaya kadar titreşir.

Herhangi bir moda karşı gelen mod şeklini bulmak için yapının kayıtları bu modu tanımlayan frekans etrafında dar bantlı bir filtre kullanılarak filtre edilir. Filtre sonucu elde edilen sinyal frekansı modal frekansa eşit ve genliği zamanla değişen bir sinüs eğrisidir. Filtre ederken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta kayıttaki faz karakteristiklerini değiştirmemektir. Bunun için ya fazı sıfır olan filtreler kullanmak gerekir veya fazı sıfır değilse filtrelemeyi kaydı bir normal bir de tersten koyarak iki

defa yapmak gerekir. Eğer sistemde orantılı sönüm varsa, filtrelenmiş veriler alt alta çizildiğinde maksimum ve minimumların bütün noktalarda aynı zamanda oluşması gerekir. Aksi takdirde sönümün orantılı olmadığı ortaya çıkar. Genelde çok esnek yapılarda (örneğin gökdelenler, asma köprü tabliyeleri gibi) orantılı sönüm görülmez. Filtrelenmiş verideki sinüzoidlerin genlikleri ölçme noktalarındaki mod şeklinin genliğini verir.

3.1.7. Sönüm Oranları

Modal sönüm oranları her moda karşı gelen filtrelenmiş kayıtları kullanarak tayin edilebilir. Genelde sönüm çok nonlineer bir parametredir ve yapıya gelen deprem yükünün frekans karakteristikleri ve yapının yerdeğiştirmeleri ile değişir. Bu nedenle kaydın kuvvetli titreşim kısmını kullanarak modal sönüm hesaplamak uygun değildir ve stabil bir değer elde etmek zordur. Modal sönümü stabil olarak elde etmek için verinin kuyruk kısmını, yani deprem sona erdikten sonraki serbest titreşimleri gösteren kısmını kullanmak daha uygundur. Bu kısımdaki maksimumların azalma oranının kullanarak modal sönümü hesaplayabiliriz. Birbirine komşu iki maksimumu kullanarak ($n=1$, birinci denklem), veya birbirinden n maksimum uzaklıktaki maksimumları kullanarak modal sönüm aşağıdaki denklemlerden biriyle hesaplanabilir:

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \ln_e \left(\frac{P_k}{P_{k+1}} \right) = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx \xi \quad (3.4)$$

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

Bir başka yöntem, modal davranışı gösteren filtrelenmiş verinin Fourier spektrumunda maksimum genliğin genişliğini kullanmaktır. Eğer f_0 modal frekansı, ve f_1 ve f_2 genliğin 0.707 oranında azaldığı genliğe karşı gelen f_0 nun altında ve üstündeki frekansları gösterirse, modal sönüm aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (3.5)$$

Gürültünün yüksek olduğu küçük deprem, rüzgar, veya geliş güzel titreşim verileri için sönüm hesaplarını yaparken orijinal kayıtlar yerine kayıtların oto-korelasyon fonksiyonlarını kullanmak daha doğru sonuçlar verebilir.

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) \cdot x(t - \tau) \quad (3.6)$$

3.1.8. Burulma Titreşimleri

Yapılardaki burulma tipi titreşimler genelde birbirine paralel iki doğrusal ivmeölçer verilerinin farklarını alarak incelenir. Örneğin, çok katlı binalarda kat döşemesi kenarlarına konulan iki yatay ivmeölçerin kaydettiği hareketler arasındaki fark o kattaki burulma titreşimlerinin kaydı olarak düşünülebilir. Burulma titreşimlerinin özellikleri bu fark sinyalinin analizi sonucu elde edilir.

Kayıtlardaki gürültü burulma titreşimlerinin analizinde önemli bir sorun olabilir. Genelde, iki gürültülü sinyalin farkını aldığımızda farktaki gürültü oranı orjinal sinyallerdeki gürültü oranlarından çok daha fazladır. Eğer burulmanın hesaplandığı iki yatay ivmeölçerdeki gürültü fazla ise bunların arasındaki farkta, yani burulma sinyalinde, gürültü daha da fazla olacağı için bu sinyalden hesaplanan yapının burulma özellikleri doğru olmayabilir. Gürültü etkisini azaltmak için önce burulma titreşimlerinin frekansı yatay ivmeölçer verilerinin Fourier genlik spektrumunu kullanarak tayin edilmeli ve sonra yatay kayıtlar burulma frekansı etrafında dar bir bant kullanarak filtre edilmelidir. Burulma titreşimlerinin genlikleri filtre edilmiş kayıtları kullanarak hesaplanmalıdır.

Bir başka problem, burulma titreşimlerinin yatay titreşimlere hangi oranda katkı sağladığının hesaplanmasıdır. Bu burulma titreşimlerinin dönme merkezinin yerinin tespitini gerektirir. Eğer $x(t)$ yatay ivmeölçer kaydını, $\theta(t)$ de hesaplanan burulma

titreşimi kaydını gösterirse, dönme merkezinin yatay ivmeölçerden uzaklığı, c aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$c = \frac{\sum_t x(t) \cdot \theta(t)}{\sum_t \theta^2(t)} \quad (3.7)$$

Bu değer en az üç yatay ivmeölçer kullanarak hesaplanırsa elde edilen c değerlerinin kesim noktası dönme merkezinin yerini verir (Şafak ve Çelebi, 1990).

3.1.9. Öteleme Titreşimleri

Öteleme titreşimleri binanın temel etrafında rijit bir cisim şeklinde yaptığı titreşimlerdir. Öteleme titreşimlerinin analizi temel plakasında en az üç noktada düşey yönde titreşim kaydı almayı gerektirir. Öteleme titreşimlerinin verisi düşey kayıtların farkını alarak hesapla bulunur. Yatay titreşim kayıtları ile karşılaştırıldığında, düşey titreşim kayıtları genelde genliği düşük, gürültü seviyesi yüksek kayıtlardır. Dolayısı ile analiz sırasında yukarıda burulma titreşimleri için belirtilen filtreleme yöntemleri öteleme titreşimleri için de aynen kullanılmalıdır. Bina tipi yapılar için analiz sırasında yapılması gerekli bir ilave kontrol da temeldeki düşey titreşim kayıtlarından hesaplanan öteleme frekansının özellikle yukarı katlardaki yatay titreşim kayıtlarında da mevcut olduğunu göstermektir. Aksi takdirde hesaplanan frekans öteleme frekansını değil temel plakasının deformasyonundan doğan düşey hareketin frekansını gösteriyor demektir.

3.1.10. Yapı-Zemin Etkileşimi

Yapıların deprem davranışını etkileyen önemli bir faktör yapı-zemin etkileşimidir. Yapı-zemin etkileşimi deprem sırasında temel etrafındaki zeminin esnekliğinin yapı titreşimlerine olan katkısıdır. Özellikle yumuşak zeminlere oturan ağır

yapılarda yapı-zemin etkileşimi yapının deprem davranışını belirleyen önemli bir faktördür.

Yapı-zemin etkileşimi olmayan durumla karşılaştırıldığında (örneğin, kaya tabakası üzerine oturan yapı) yapı-zemin etkileşimi yapının ana frekansını küçültür, yapıdaki sönümü artırır ve yapıya etkiyen deprem hareketindeki yüksek frekanslı dalgaları filtre eder.

Deprem kayıtlarını kullanarak yapı-zemin etkileşiminin var olup olmadığını anlamak için önce yapının rijit temelli, yani yapı-zemin etkileşimi olmadığı zamandaki frekansını hesaplamamız gerekir. Bina tipi yapılar için bu frekans binanın tepesindeki (veya tepeye yakın bir kattaki) yatay ivmeölçer kaydının Fourier genlik spektrumunun temel seviyesindeki yatay ivmeölçer kaydının Fourier genlik spektrumuna bölünmesiyle görülebilir. Spektraların oranı binanın rijit temelli olması halinde, temelden çatıya olan transfer fonksiyonunu verir. Bu transfer fonksiyonun gösterdiği rezonans frekanslar rijit temel durumundaki modal frekanslardır. Buna karşılık, bina tepesindeki kaydın Fourier genlik spektrumundaki rezonans frekanslar binanın gerçek durumuna ait, yani varsa yapı-zemin iletişimini de içine alan, modal frekansları gösterir. Eğer bu frekanslar temelden çatıya olan transfer fonksiyonunun frekansları ile çakışmıyorsa (özellikle en düşük frekansta) yapı-zemin etkileşimi yoktur. Eğer çakışmıyorsa, yani bina tepesindeki kaydın Fourier genlik spektrumunun gösterdiği en düşük hakim frekans transfer fonksiyonunun gösterdiği en düşük hakim frekanstan düşükse, yapıda yapı-zemin etkileşimi var demektir.

Yukarıda verilen metotlar veri analizi konusundaki en basit yöntemlerdir. Daha karmaşık metotlar uygulanmadan önce veri her zaman önce bu basit metotları kullanarak analiz edilmelidir. Metotların kompleksitesi arttıkça kayıtlardaki gürültüden ve nümerik hatalardan dolayı yanlış sonuçlara varma ihtimali de artar. Yukarıdaki basit yöntemler veri analizi sonucu beklenen değerlerin mertebesi konusunda ilk bilgiyi verdiği için önemlidir.

Daha ileri ve karmaşık veri analiz metotları ile ilgili geniş bilgi literatürde mevcuttur. Bu metotların büyük bir kısmı ayırık-zamanlı dijital filtreleme ve en-küçük kareler yaklaşımına dayanır. Bina tipi yapılar için son yıllarda tavsiye edilen yeni bir sistem tanımlama metodu deprem dalgalarının bina içinde yayılma özelliklerini esas alır. Bu metotta yapının karakteristikleri modal frekanslar ve mod şekilleri yerine dalgaların bina içinde yayılma hızı ve kat seviyelerindeki yansıma ve geçiş katsayıları cinsinden

hesaplanır. Bu karakteristiklerdeki değişmeler binada hasar olasılığının bir göstergesi olarak alınır (Snider ve Şafak, 2006). Bilgisayar ve enstrümantasyon teknolojilerindeki hızlı gelişmeler yapıların deprem altındaki dinamik davranışlarını yapıya kurulan izleme sistemleri vasıtası ile incelemeyi laboratuvar ve analitik yöntemlere karşı kabul edilebilir bir alternatif haline getirmiştir.

Deprem mühendisliğinde kullanılan yapı izleme sistemlerinin amacı, uygulanması ve veri analiz yöntemleri teorik detaya girmeden basitleştirilerek verilmiştir. Yapı izleme sistemlerinin pratikte kullanılmasındaki en önemli adım alınan kayıtların doğru olarak analiz edilmesidir. Bu yöntemlerle yapının modal karakteristikleri (periyotlar, mod şekilleri, sönüm oranları), yapıdaki burulma ve öteleme titreşimlerinin genlik ve periyotları, ve yapıda yapı-zemin etkileşiminin olup olmadığı ve varsa mertebesi kolaylıkla tayin edilebilir.



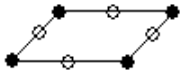
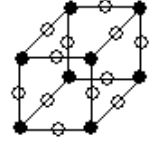
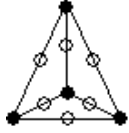
3.2. Sonlu Elemanlar Modeli (SEM)

Sonlu elemanlar modeli yapının bilgisayar ortamında hazırlanmış bir modelidir. Tez kapsamında titreşim analizleri için oluşturulan sonlu elemanlar modelleri tanıtılmış ve güncelleme uygulamalarında kullanılmıştır. Titreşim davranışının belirlenmesi sırasında yapı sürekli sistem olarak değil, ayrık sistem olarak modellenir. Ayrık sistem olarak modellemenin sonucunda yapının yay ve kütle özellikleri de kaçınılmaz olarak matrislerle temsil edilir.

Günümüze titreşim modellerinin oluşturulması için sonlu elemanlar yöntemi yoğun olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi sayesinde yapının geometrisi ne kadar karmaşık olursa olsun uygun sonlu elemanlarla titreşim modelleri oluşturulabilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde yapı şekil fonksiyonları bilinen basit elemanlara bölünür ve yapının davranışı bu elemanların toplam davranışı olarak belirlenir. Bu elemanların sınır noktaları düğüm noktaları ile belirlenmiştir. Komşu elemanlar aynı düğüm noktalarını paylaşırlar. Böylece bir elemandaki tepki komşu elemanlara da aktarılabilir ve yapı genelinde sürekli bir tepki elde edilebilir. Elemanların düğüm noktaları bilinen polinomik eğriler ve yüzeylerle bağlanmıştır. Günümüzde yoğun kullanılan eleman tiplerinde, elemanın içsel yer değiştirmelerini düğüm noktalarına bağlamak için de aynı polinomik ifadeler kullanılır. Bu

işlem genellikle şekil fonksiyonu etkileşimi olarak adlandırılır (Friswell ve ark., 1995). Sonlu elemanlar yönteminin matematiksel bağılıkları elemana bağlı bir Rayleigh-Ritz varyasyonlar hesabı ve şekil fonksiyonu etkileşimi ile oluşturulabilir. Aynı zaman da sonlu elemanlar bağılıkları Galerkin varyasyonel prensibi kullanılarak diferansiyel denklemlerden doğrudan elde edilebilir (Friswell ve ark., 1995). Sonlu elemanlar yönteminde yapının davranışı sonlu elemanların şekil değişiklikleri ve bu değişikliklerin elemanlar arasında aktarılması ile hesaplanmaktadır. Bu etkiler elemanların ortak düğüm noktaları üzerinden iletilmektedir. Bu durum kaçınılmaz olarak yapılan çözümün elemanın tanımlanma şekli kadar, düğüm noktasının da tanımlanma şekline bağlı olması sonucunu doğurmaktadır. İdeal durumda, düğüm noktalarının bütün temel eksenler yönünde hareket edebiliyor olması gerekir. Bazı eleman tiplerinde dönmeler ihmal edildiğinden, düğüm noktaları da sadece temel koordinat sisteminde hareket edebilecek şekilde tanımlanır. Bu tanımlama çözümün gerçek duruma yaklaşmasını etkilemektedir. Bu durum elemanların düğüm noktalarının serbestlik dereceleriyle anılmasına yol açmaktadır. Serbestlik derecesi herhangi bir zamanda bir sistemin bütün parçalarının konumlarının tamamen belli olması için gerekli birbirinden bağımsız en az koordinat sayısıdır (Sas ve ark., 1999) . Sonlu elemanlar sınıflara ayrılırken düğüm noktası sayısı, düğüm noktalarının serbestlik derecesi ve elemanın oluşturulduğu polinomların mertebesi ile anılır. Bu tanımlamada dikkat edilmesi gereken nokta düğüm noktası sayısı ile polinom mertebesinin birbirinden bağımsız oluşudur. Örneğin sadece iki düğüm noktası olan çubuk elemanlar genellikle Euler-Bernoulli ve Timoshenko çubuk formülleri kullanılarak hazırlanmaktadır. Dolayısı ile hem doğrusal yönde hem de açısız yönde hareket edebilmektedirler. Bu tip çubuk elemanlar iki düğüm noktalı ve kübik mertebeli elemanlardır (Fotsch, 2001). Çizelge 3.1’ de yaygın kullanıma sahip eleman tipleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yaygın kullanıma sahip sonlu eleman tipleri

| Tip | Düğüm Noktası Sayısı ve Serbestlik Derecesi | Mertebe | Şekil |
|------------------|--|------------------|--|
| Çubuk | 2 Düğüm Noktasında 6 Serbestlik Derecesi | Kübik |  |
| Üçgen Kabuk | 3 Düğüm Noktasında 6 Serbestlik Derecesi | Doğrusal Dörtgen |  |
| | 6 Düğüm Noktasında 6 Serbestlik Derecesi | | |
| Dörtgen Kabuk | 4 Düğüm Noktasında 5 Serbestlik Derecesi | Doğrusal Dörtgen |  |
| | 8 Düğüm Noktasında 5 Serbestlik Derecesi | | |
| Hekzahedron Katı | 8 Düğüm Noktasında 3 Serbestlik Derecesi | Doğrusal Dörtgen |  |
| | 20 Düğüm Noktasında 3 Serbestlik Derecesi | | |
| Tetrahedron | 4 Düğüm Noktasında 3 Serbestlik Derecesi | Doğrusal Dörtgen |  |
| | 10 Düğüm Noktasında 3 Serbestlik Derecesi | | |

3.2.1. Yapıların Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi

Sonlu elemanların bir yapının geometrik şekline uygun olarak bir araya getirilmiş şekline Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) denir. Oluşturulmuş sonlu elemanlar modeline bağlı olarak yapının rijitlik matrisi, kütle matrisi ve sönüm matrisi oluşturulmaktadır. Bu matrisler sonlu elemanlar modelinin bir sonucudur ve gerçek yapının yay ve kütle özelliklerini temsil etmekte kullanılmaktadır. Oluşturulan matrisler kare matrisler olup ve boyutları sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında kullanılan düğüm noktalarının toplam serbestlik derecesine eşittir. Rijitlik, kütle ve sönüm matrisleri kullanılarak oluşturulmuş hareket denklemi aşağıda verilmiştir (Kasımzade, 2005). Özdeğerler ise doğal frekansların karelerini göstermektedir. Özdeğer matrisinin her bir sütunu özvektör olarak adlandırılmaktadır ve sütun numarasına karşılık gelen doğal frekanstaki titreşim biçimini göstermektedir. Birçok ticari sonlu elemanlar yazılımı tekrarlı çözüm yöntemleri ile özdeğer ve özvektörleri hesaplamaktadır. Özdeğerler ve özvektörler

kullanılarak sonlu elemanlar modelinin FTF' ları elde edilebilmektedir. Böylece yapının modeli frekans tepki fonksiyonları cinsinden tanımlanabilir. Bir başka değişle sayısal modelin doğruluğu sonlu elemanlar modeli oluşturulurken yapılan varsayımların doğruluğu kadar olmaktadır.

Adı geçen metotla sistemlerin incelenmesi için, bilindiği gibi, sonsuz sayıda serbestlik derecesi olan sistemin sonlu sayıda (ubuk, zar, plak, kabuk, solid, vs...) elemanlara ayrılarak bu elemanların birbirleriyle sadece düğüm noktaları ile teması sağlanmaktadır. Böylelikle sonsuz serbestlik derecesi olan sistemin her birinin maksimum altı serbestlik derecesi olan sonlu sayıda düğüm noktalarında temas eden k_* sayıda sonlu elemanlar ile değiştirilmiş olur. Bu düzenle oluşturulmuş ayrıık sistemin çözme denklemleri genelde;

$$k_{**} = k_* \cdot (\text{eleman toplam düğüm serbestlik derecesi sayısı}) - (\text{sınır koşulları sayısı})$$

Sayıda bilinmeyen içermektedir. Bu bilinmeyenler sistemin ayrıık modelinin verilmiş sisteme eşdeğer olması koşulundan oluşturulmuş çözme denklemlerinden bulunur. Bilinmeyen olarak ayrıık sistemin düğüm yerdeğiştirmeleri $\{u\}$ kabul edilirse, statik yük etkileri için çözme denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$[k]\{u\} = \{F\} \quad (3.8)$$

Burada sistemin rijitlik matrisi $[k]$ ve dış kuvvetler vektörü aşağıdaki bilinen düzenle kurulmaktadır:

$$[k] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad \text{i. sınır koşulunun uygulanması}^{*1} \quad (3.9)$$

$$[k_+] = \sum_{k=1}^{k_*} [\bar{k}_{+k}] \quad (3.10)$$

$$[\bar{k}_{k+}] = [\tau_k]^T [\bar{k}_k] [\tau_k] \quad (3.11)$$

$$[\bar{k}_k] = [C_k] [\bar{k}_k] [C_k]^T \quad (3.12)$$

$$\{F\} = \{F_+^i\} \quad \text{i. sınır koşulunun uygulanması} \quad (3.13)$$

$$\{F_+\} = \sum_{k=1}^{k^*} \{\bar{F}_{+k}\} \quad (3.14)$$

$$\{\bar{F}_{+k}\} = [\tau_k]^T \{\bar{F}_k\} \quad (3.15)$$

$$\{\bar{F}_k\} = [C_k] \{F_k\} \quad (3.16)$$

$$\{F_k\} = \{F_{*k}\} + \{\bar{R}_{*k}\} \quad (3.17)$$

$$\{\bar{R}_{*k}\} = - \int_{A_k} [H_k(A)]^T q_k(A) dA \quad (3.18)$$

Burada $\bar{k}_k, \bar{k}_k, \bar{k}_{+k}$ -k. sonlu elemanın lokal, global ve ayrık sistemin tüm 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 topoloji matrisi; $\bar{F}_k, \bar{F}_k, \bar{F}_{+k}$ - k. sonlu elemanın lokal, global ve ayrık sistemin tüm serbestlik derecesine (k_{**}) kadar genişletilmiş düğüm kuvvetleri vektörü; \bar{R}_{*k} - k. sonlu elemanın lokal koordinat sisteminde (A) alanına etkileyen sürekli dağılmış $q(A)$ yükünden eşdeğer düğüm yükleri vektörü; $[H_k]$ - k. sonlu elemanın şekil fonksiyonudur.

Dinamik yük etkidiğinde verilmiş sistemin sonlu elemanlar ile ifade edilmiş ayrık sisteme eşdeğerlik (W. R. Hamilton varyasyon prensibi) koşulundan sistemin dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade olunur (Kasımzade, 2005):

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.19)$$

Burada $[c]$ sönüm matrisi klasik sönümlü sistemlerde sistemin rijitliği $[k]$ ve kütesine $[m]$ orantılı olduğundan kurulması da ona uygun yapılmaktadır. Dolayısı ile lokal koordinat sisteminde sonlu elemanın kütle matrisi düzenlenirse, (3.19) denkleminin içerdiği diğer matrisler sonlu elemanlar metodunun geleneksel (3.9-3.14), (3.13-3.18) bağılıkları ile kurulabilmektedir. k . sonlu elemanın l.k.s. –de kütle matrisi $[\bar{m}_k]$ eleman düğümlerinde her bir i . serbestlik derecesi doğrultusunda verilmiş $m_{\bullet kii}$ tekil kütlelerden oluşturulmuş eleman köşegen kütle $[m_{\bullet k}]$ matrisinden ve elemanın kendisinin sürekli dağılmış kütesinden oluşturulmuş eleman eşdeğer kütle $[m_{*k}]$ matrisinden oluşmaktadır:

$$[\bar{m}_k] = [m_{\bullet k}] + [m_{*k}] \quad (3.20)$$

$$[\bar{m}_{\bullet k}] = \begin{bmatrix} m_{\bullet k11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\bullet k22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{\bullet kii} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{\bullet kpp} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$p = (\text{sonlu eleman düğüm sayısı}) \cdot (\text{bir düğümün serbestlik derecesi sayısı})$

$$[m_{*k}] = \int_{V_k} \rho_k [H_k]^T [H_k] dV \quad (3.22)$$

Burada $[H_k]$, ρ_k , V_k sonlu elemanın şekil fonksiyonu, yoğunluğu ve hacmidir.

Birçok durumlarda elemanın dağıtılmış kütle eleman düğümlerine (3.21) şeklinde dağıtılarak, $[m_{*k}]$ ihmal edilebilmektedir. Dolayısı ile

$$[\bar{m}_k] \approx [m_{\bullet k}] \quad (3.23)$$

Bakılan durumda verilmiş sistem ne kadar fazla sonlu elemana bölünürse, (3.23) yaklaşımının hatası da bir o kadar az olur.

(3.20) formülü ile lokal koordinat sisteminde kurulmuş eleman kütle matrisine dayalı sistemin kütle matrisi aşağıdaki şekilde kurulur:

$$[m] = [m_{+i}] \quad \text{i. sınır koşulunun uygulanması} \quad (3.24)$$

$$[m_{+}] = \sum_{k=1}^{k^*} [\bar{m}_{+k}] \quad (3.25)$$

$$[\bar{m}_{+k}] = [\tau_k]^T [\bar{m}_k] [\tau_k] \quad (3.26)$$

$$[\bar{m}_k] = [C_k] [\bar{m}_k] [C_k]^T \quad (3.27)$$

$$[\bar{m}_k] = [\bar{m}_{\bullet k}] + [\bar{m}_{*k}] \quad (3.28)$$

$$[\bar{m}_{*k}] = -\int \rho_k [H_k]^T [H_k] dv \quad (3.29)$$

Sistemin sönüm matrisi $[c]$ (3.30) formülü ile sistemin rijitlik $[k]$ ve kütle $[m]$ matrisleri ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$[c] = [m] \left(\sum_{i=1}^J \frac{\xi_i \omega_{oi}}{M_i} \{\Phi_i\} \{\Phi_i\}^T \right) [m] \quad (3.30)$$

$$M_i = \{\Phi_i\}^T [m] \{\Phi_i\} \quad (3.31)$$

$$\Phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\{a_j\} [m] \{a_j\}}} \quad (3.32)$$

Burada ω_{oi} , $\{a_i\}$ sönümsüz sistemin i . doğal titreşim modunun serbest titreşim frekansı, mod şeklidir ve uygun özdeğer probleminin çözümünden bulunmaktadır:

$$[d]\{\ddot{u}\} + \{u\} = \{0\} \quad (3.33)$$

$$\{u\} = \{a\} \sin(\omega_o t + \varphi_o) \quad (3.34)$$

$$\left. \begin{array}{l} [d]\{a\} = \frac{1}{\omega_o^2} \{a\} \\ \text{veya} \\ [\bar{d}]\{a\} = \bar{\lambda} \{a\} \end{array} \right\} \Rightarrow \omega_{oi}, \{a_i\} \quad (3.35)$$

Burada

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

Eğer sisteme dinamik yükler sadece düğüm ve elemanları üzerinde etkilerse zamana bağlı dış dinamik kuvvet vektörü statik çözümdeki (3.13-3.18) düzenine uygun şekilde aşağıdaki gibi kurulur:

$$\{F(t)\} = \{F_{\bullet}^i(t)\} \quad \text{i. sınır koşulunun uygulanması} \quad (3.36)$$

$$\{F_+(t)\} = \sum_{k=1}^{k^*} \{\bar{\bar{F}}_{+k}(t)\} \quad (3.37)$$

$$\{\bar{\bar{F}}_{+k}(t)\} = [\tau_k]^T \{\bar{\bar{F}}_k(t)\} \quad (3.38)$$

$$\{\bar{\bar{F}}_k(t)\} = [C_k] \{F_k(t)\} \quad (3.39)$$

$$\{F_k(t)\} = \{F_{*k}(t)\} + \{R_{*k}(t)\}$$

(3.40)

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

(3.41)

Dip not ^{*1} : i simgesi ile verilmiş sınır koşullarının uygulanması (örneğin istemi sabitleştiren i . mesnete uygun satır ve sütun elemanları yerine 0, çakışma noktasına 1 yazılması) prosedürü gösterilmiştir.

3.2.2. Çok Dinamik Serbestlik Dereceli Yapıların Hareket Denklemlerinin Düzenlenmesi

Sistemin dinamik dengesine bakılarak hareket denklemi aşağıdaki düzenle oluşturulur:

$$\{F_e\} + \{F_c\} + \{F_I\} = \{F(t)\} \quad (3.42)$$

Burada $\{F_e\}$ sisteme etkiyen elastik kuvvetler olup i . elemanı (yani k.s.d. doğrultusundaki u_i yer değişmesine sistemin tepkisi) süperpozisyonla aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_{ei} = k_{i1}u_1 + k_{i2}u_2 + \dots + k_{ij}u_j + k_{in}u_n \quad (3.43)$$

k_{ij} j . Kinematik serbestlik derecesi (k.s.d.) doğrultusunda birim yerdeğiştirmeden ($u_j = 1$) i . k.s.d.' si doğrultusunda oluşmuş kuvvettir. $i = 1, n$ k.s.d.' si için sisteme etkiyen elastik kuvvet aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\{F_e\} = [k]\{u\} \quad (3.44)$$

Burada $[k]$ sistemin rijitlik matrisidir, simetrik matristir. Basit sistemler için yapı mekaniğinden belli direk dengeler (yerdeğiştirmeler yöntemi temelinde) yöntemi ile karmaşık sistemler için Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile kurulmaktadır.

$\{F_c\}$ Sisteme etkiyen sönüm kuvvetleridir. Titreşim sırasında sistemdeki enerji itkisi eşdeğer viskoz sönüm teorisine dayalı kabul edilerek, i . elemanı süperpozisyonla aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_{ci} = c_{i1}\dot{u}_1 + c_{i2}\dot{u}_2 + \dots + c_{ij}\dot{u}_j + \dots + c_{in}\dot{u}_n \quad (3.45)$$

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 etkiyen sönüm kuvveti aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\{F_c\} = [c][\dot{u}] \quad (3.46)$$

Burada $[c]$ sistemin sönüm matrisidir. Uygulamalarda daha önce de gösterildiği gibi sönüm matrisinin elemanları yani sönüm katsayıları c_{ij} , sonlu serbestlik dereceli sistemin sönüm oranlarına bağlı oluşturulur. Dolayısı ile sönüm (katsayıları) matrisi belli sönüm oranlarına dayanılarak bulunur. Sönüm oranları tek d.s.d. sistemlerde görüldüğü gibi deneylerle bulunur.

$\{F_I\}$ Sisteme etkiyen atalet kuvvetleridir ve i . elemanı (yani i . k.s.d. doğrultusunda \ddot{u}_i ivmesine sistemin tepkisi) süperpozisyonla aşağıdaki gibi bulunur:

$$F_{ii} = m_{i1}\ddot{u}_1 + m_{i2}\ddot{u}_2 + \dots + m_{ij}\ddot{u}_j + \dots + m_{in}\ddot{u}_n \quad (3.47)$$

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

$i = 1, n$ k.s.d.' si için sisteme etkiyen atalet kuvveti aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\{F_I\} = [m]\{\ddot{u}\} \quad (3.48)$$

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

Dış dinamik kuvvetler sisteme sadece k.s.d.' si doğrultusunda uygulanmış dinamik yükler ise, şöyle ifade edilir:

$$\{F(t)\} = \{e_0\}^T \{f(t)\} \quad (3.49)$$

Burada e_0 tesir vektörü olup, k.s.d. doğrultusunda dinamik kuvvet varsa 1, yoksa 0 değerini içeren vektördür.

Dış dinamik kuvvetler sistem mesnedinin kinematik uyarılmasından oluşmuş yer ivmesi ($\ddot{\Delta}$) ise, dış kuvvet vektörü aşağıdaki şekilde oluşturulur:

$$\{F(t)\} = \{F(t)\}_{etik} = -[m]\{e_*\}\ddot{\Delta}(t) \quad (3.50)$$

Burada $\{e_*\}$ tesir vektörü olup, sistemin tabanının statik $\Delta = 1$ yerdeğişmesinden kütlelerin k.s.d.' si doğrultusundaki yerdeğişmesidir. Sistem tabanının kinematik uyarılmasından sistemin k.s.d.' si doğrultusunda oluşmuş kuvvetlere etkin kuvvet denir.

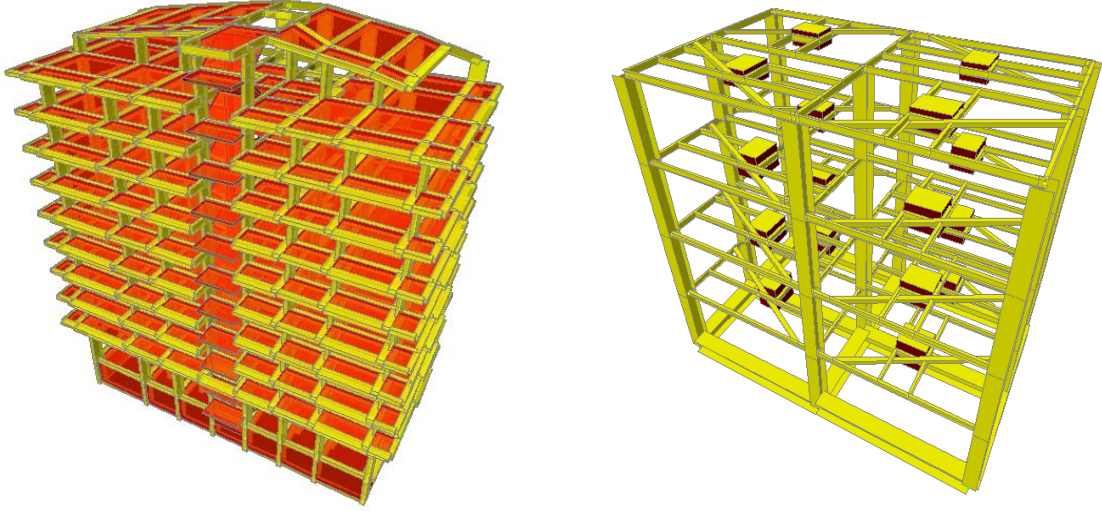
Yer hareketinin burulma bileşenine ($\varphi(t)$) bakılacak olursa aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\{F(t)\} = \{F(t)\}_{etik} = -[m]\{e_{**}\}\ddot{\varphi}(t) \quad (3.51)$$

Burada $\{e_{**}\}$ tesir vektörü elemanları sistem tabanının $\varphi = 1$ dönmesinden k.s.d.' si doğrultusundaki yerdeğişmelerdir.

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

Sistemin hareket denklemlerinden görüldüğü gibi $[k]$, $[c]$, $[m]$ matrisleri aynı boyutta (sistemin k.s.d.' ne eşit) olup $[k]$ matrisinin boyutuna orantılı değişmektedir. Dolayısı ile hareket denklemlerinin boyutlarının küçültülmesi prosedüre $[k]$ matrisi için düzenlenmiş olursa, $[c]$, $[m]$ matrislerinin boyutlarının küçültülmesi aynı işleme tabi tutulacaktır. Tezde kullanılmış betonarme bina ve çelik deney yapısına ait sonlu elemanlar modelleri şekil 3.4' te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Betonarme bina ve çelik deney yapısının sonlu elemanlar modeli

3.2.3. Sonlu Elemanlar Modelinin Gerçek Yapı ile Uyumsuzlukları

Pratik uygulamalarda sayısal modelin gerçek yapıyı her zaman istenilen oranda temsil edemediği bilinmektedir. Sayısal modelin gerçek yapı ile olan uyumsuzluklarının sebepleri temelde iki başlık altına toplanabilir.

Sayısal modellemenin pratik sınırlarından kaynaklanan uyumsuzluklar

Sayısal modeldeki sayısal değerlerden kaynaklanan uyumsuzluklar

3.2.3.1. Sayısal Modellemenin Pratik Sınırlarından Kaynaklanan Uyumsuzluklar

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasından sonra bu modelden elde edilen matrisleri kullanılarak çözüm elde edilmesi büyük hesap yükü gerektirmektedir. Çözüm için gerekli olan hesap yükü matrislerin boyutuna bağlıdır. Sistem matrisleri kare matrisler olup boyutları sonlu elemanlar modelinin toplam serbestlik derecesine eşittir. Bu durum eldeki sonlu elemanlar modelinde kullanabileceğimiz düğüm noktası miktarını eldeki hesap kapasitesi sınırlamaktadır. Sınırlı düğüm noktası sayısı ise karmaşık yapıdaki geometrik şekillerin tamamının sonlu elemanlar modeline aktarılmasına engel olabilmektedir. Özetle sayısal modelin oluşturulması sırasında yapının tüm geometrik özellikleri gerek geometrik ayrıntıların çokluğu gerekse hesap kapasitesinin sınırları sebebiyle sonlu elemanlar modeline aktarılamayabilir. Sonlu elemanlar modeli ile ulaşılan çözümler gerçek yapıdan aktarılamayan ayrıntılar oranında farklı olmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında hesap kapasitesindeki sınırlamalar nedeniyle sonlu elemanlar modelinde basitleştirmeler yapılmaktadır. Basitleştirmeler yapının ilgilenilen frekans aralığında titreşim davranışına katkısı ihmal edilebilecek kadar az olan kısımlarının ihmal edilmesi veya daha basit elemanlarla temsil edilmesidir. Basitleştirmeler de yapı hakkındaki genel bilgiler ve mühendislik tecrübeleri kullanılmaktadır. Basitleştirmelerin titreşim davranışını değiştirmedeği kabul edilmektedir. Basitleştirme ve ihmaller titreşim davranışını önemli oranda etkilediği durumlarda model güncelleme yaklaşımı da bu hataları gidermeye yeterli olmayabilir.

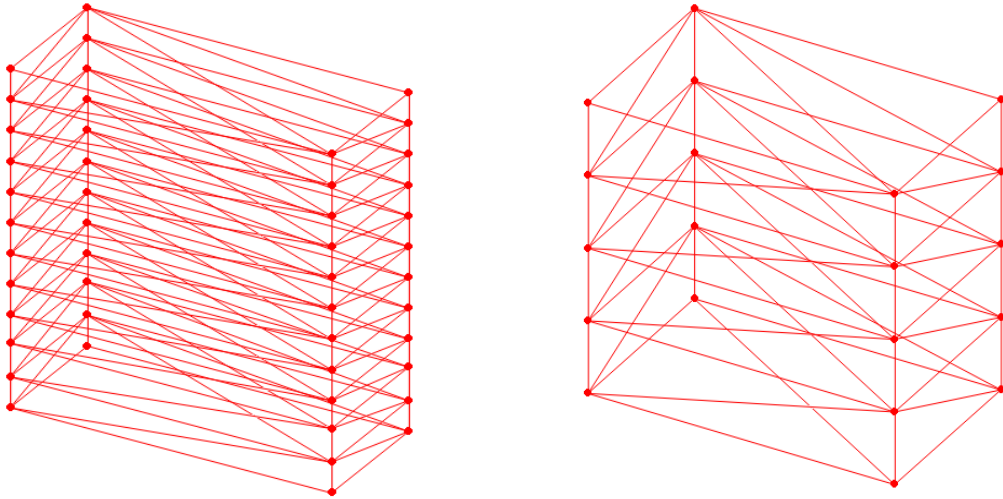
3.2.3.2. Sayısal Modeldeki Sayısal Değerlerden Kaynaklanan Uyumsuzluklar

Sonlu elemanlar modelinde tanımlanan sabitlerin bir kısmını sayısal olarak ölçmek mümkün olmayabilir. Örneğin; birden fazla malzeme olduğu durumlarda elastisite modülü, yoğunluk, poisson oranı, vb... malzeme özelliklerini ölçmek mümkün olmayabilir. Ölçülmesi zor olan sabitlerin dışında da, ölçülebilir olmasına rağmen yanlış tanımlanmış sabitler olabilir. Örneğin; kalınlıklar veya benzer geometrik uzunluklar. Tanımlanan bu sabitlerin değerleri doğrudan oluşturulan matrisleri etkilediğinden sayısal modelin yapının titreşim

davranışından belirgin şekilde sapmasına yol açmaktadır. Model güncelleme için uygun bir sayısal model kullanılarak, yanlış tanımlanmış bu sabitler güncellenebilir ve olması gereken değere kabul edilebilir ölçüde yaklaştırılabilmektedir.

3.3. Deneysel Model (DM)

Bölüm 3.1’ de detaylı olarak anlatılmış olan bilgiler çerçevesinde deneysel model kurulur. Deneysel model yapı üzerinden belirlenmiş noktalardan alınan ölçümle yapının titreşim davranışını gösteren modeldir. Ölçümler zaman alanında alınmaktadır. Zaman alanında alınan ölçümler frekans alanına dönüştürülüp işlenerek Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) elde edilmektedir. Frekans tepki fonksiyonları modal analiz yöntemleriyle işlenerek modal alana dönüştürülmektedir. Böylece deneysel model temsil edilebilmektedir. Teoride mümkün olmasına rağmen, pratikte bütün serbestlik derecelerini ölçmek mümkün olmamaktadır. Deneysel modelin oluşturulması için ölçümlerin, deneysel ölçüm yöntemlerine uygun şekilde ölçümlerin alınması ve uygun modal analiz yöntemleriyle ölçüm verilerinin işlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.5. Betonarme bina ve çelik deney yapısının deneysel modelleri

3.4. Sonlu Elemanlar Modeli ile Deneysel Modelin Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar modeli ve deneysel modelin karşılaştırılması, model geçerliliğinin sağlanması işleminin ilk adımı olarak değerlendirilmektedir. Model geçerliliğinin sağlanması bir sonraki adım olan sistem tanımlama adımına geçişi sağlamaktadır. Model geçerliliğinin sağlanmasının ikinci adımı, deneysel model ile sonlu elemanlar modeli arasındaki farkların bulunmasıdır (Ewins, 2000). Tepki ölçümlerine göre elde edilmiş deneysel modelin sonlu elemanlar modeliyle birebir uyumlu olması pratikte mümkün değildir. Ancak burada iki modelin koordinatları ve boyutları yanında modal parametrelerinin de uyumu söz konusudur. Ancak, modal parametrelerin çakışması ve bunların güncellenmesi konu başlığı olarak ayrıca ele alınmıştır. Burada sadece koordinat ve boyut çakışmasına bakılıp uyum var ise sistem tanımlama aşamasına geçilir.

3.5. Sistem Tanımlamanın Genel İlkeleri

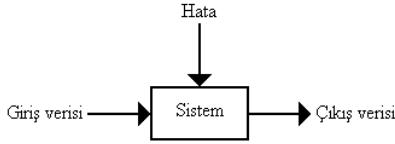
Gerçek dünyadaki bir olayın, sürecin veya birimlerden oluşan ve birimleri arasındaki iç ilişkiler yanında çevre ile dış ilişkilere göre işleyen bir sistemin belli bir anlatımına model denir. Anlatım sözle, çizimle, belli bir ölçekte fiziki benzer oluşturmak veya başka bir şekilde yapılmakla birlikte en geçerli anlatım, bilimin ortak dili olan matematik ile yapılmaktadır. Sistemler, gerek birimleri arasındaki ilişkiler gerekse çevre ile ilişkileri bakımından genellikle çok karmaşık yapıdadırlar. Bunlar, bazı basitleştirmeler (ihmalller) ve kabuller altında modellenmektedir.

Bir sistemi incelemedeki amaç, sistemin davranışını öğrenmek, sistemi denetlemek, sistemi yenilemek veya korumak olabilir. Bazı durumlarda bilinen girdiler için sisteme bağlı olarak çıktıların ne olacağı hakkında veya girdi ve çıktılar gözlenerek (bilindiğinde) sistemin kendisi (sistem parametreleri) hakkında bilgi çıkarılması istenebilir.

Bazı sistemlerde istenilen çıktıları elde etmek için çıktılar üzerindeki gözlemlere bağlı olarak sisteme girdiler verilmektedir. Bu tür denetlemeye geri bildirim

denmektedir. 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. Birçok durumlarda ölçmenin nasıl yapılacağı belirlenmesi, ölçü biriminin ve bazı durumlarda da ölçü aletinin (terazi, ölçek, metre, termometre, anket, test, vb) bulunması araştırmanın en zor aşamalarından birisidir.

Bir ölçme sonucu elde edilen değer, ölçülen özelliğin modeldeki karşılığı olan değişkenin aldığı değer olarak ele alınmaktadır. Ölçülen özellik rasgelelik içerdiğinde modelde karşılık gelen değişken de doğal olarak rasgele değişken olarak ele alınacaktır.



Şekil 3.6. Sistem tanımlama şeması

Sistem tanımlamadaki matematiksel modeller aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Lineer ve lineer olmayan modeller
- Sürekli-zaman ve kesikli-zaman modeller
- Stokastik ve deterministik matematiksel modeller
- Dinamik ve statik modeller

3.5.1. Lineer Durum-Uzay Modelleri

3.5.1.1. Sürekli Zaman Lineer Durum Uzay Modelleri

$A:n \times n$, $B:n \times m$, $C:r \times n$, $D:r \times m$ reel sayı elemanlı matrisler olmak üzere sürekli zaman deterministik lineer durum-uzay modeli

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) \quad (\text{durum denklemi}) \quad (3.52)$$

$$\underline{y}(t) = C\underline{x}(t) + D\underline{u}(t) \quad (\text{uzay, çıktı denklemi}) \quad (3.53)$$

$$\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0 \quad (3.54)$$

Bişimindedir. Burada $\underline{x}(t)$ durum vektörünü, $\underline{u}(t)$ sistem girdi vektörünü, $\underline{y}(t)$ sistem çıktı ya da gözlem vektörünü göstermektedir. t_0 Anındaki $\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0$ başlangıç değerine bağlı olarak

$$\dot{\underline{x}}(t) = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t)$$

Denkleminin çözümü

$$\underline{x}(t) = e^{A(t-t_0)} \underline{x}_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B\underline{u}(\tau) d\tau \quad (3.55)$$

dır. Burada,

$$e^{As} = I + \frac{s}{1!} A + \frac{s^2}{2!} A^2 + \frac{s^3}{3!} A^3 + \dots \quad (3.56)$$

ve A matrisinin spektral ayrışımı

$$A = P\Lambda P^{-1} = P \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & d_n \end{bmatrix} P^{-1} \quad (3.57)$$

olmak üzere

$$e^{As} = P e^{\Lambda s} P^{-1} = P \begin{bmatrix} e^{d_1 s} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{d_2 s} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & e^{d_n s} \end{bmatrix} P^{-1} \quad (3.58)$$

dır (Λ ile P matrisleri A 'nın özdeğer ve özvektörlerinin oluşturduğu matrislerdir).

3.5.1.2. Kesikli Zaman Lineer Durum Uzay Modeli

$$\underline{x}(k+1) = A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k) \quad (3.59)$$

$$\underline{y}(k) = C\underline{x}(k) + D\underline{u}(k) \quad (3.60)$$

$$\underline{x}(k_0) = \underline{x}_0 \quad (3.61)$$

olmak üzere, $\underline{x}(k_0) = \underline{x}_0$ başlangıç değerine bağlı olarak

$$\underline{x}(k+1) = A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k)$$

indirgeme bağıntısının çözümü,

$$\underline{x}(k_0 + k) = A^k \underline{x}(k_0) + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B\underline{u}(k_0 + j - 1) \quad (3.62)$$

ve $k_0 = 0$ için

$$\underline{x}(k) = A^k \underline{x}_0 + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B\underline{u}(j-1) \quad (3.63)$$

dır.

Yukarıda A, B, C, D matrisleri zaman parametresine bağlı olarak değiştiklerinde dinamik modeller söz konusudur. Bu durumda A, B, C, D matrisleri yerine sürekli-zaman modellerinde $A(t), B(t), C(t), D(t)$ ve kesikli zaman modellerinde $A(k), B(k), C(k), D(k)$ gelecektir.

3.5.2. Kontrol Edilebilme, Gözlemlenebilme, Kararlı Olabilme ve Teşhis Edilebilme Kavramları

Bazı sistemlerde istenilen çıktıları elde etmek için çıktılar üzerindeki gözlemlere bağlı olarak sisteme girdiler verilmektedir. Bu tür kontrole geri bildirim denmektedir. Kesikli zaman durum uzay modeli

$$\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k$$

$$\underline{y}_k = H\underline{x}_k \quad (3.66)$$

$$\underline{x}_{k_0} = \underline{x}_0$$

olmak üzere,

$$\underline{x}(k_0 + k) = A^k \underline{x}(k_0) + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B\underline{u}(k_0 + j - 1) \quad (3.67)$$

ve $k_0 = 0$ için

$$\underline{x}(k) = A^k \underline{x}_0 + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B\underline{u}(j-1) \quad (3.68)$$

dır. Burada $\underline{x}(k)$ ile \underline{x}_k gösterimleri birlikte kullanılmıştır.

Başlangıçta $\underline{x}_0 = \underline{x}_a$ durumunda olan sistemi uygun girdiler vererek j adım sonunda \underline{x}_b durumuna getirmek istenmektedir.

3.5.2.1. Kontrol Edilebilme

Herhangi $\underline{x}_a, \underline{x}_b$ vektörleri için bir i pozitif tamsayısı ve $\underline{u}_0, \underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots, \underline{u}_{i-1}$ girdileri için durum denklemi, $\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k$, $\underline{x}_0 = \underline{x}_a$ olan sistem i . adımda $\underline{x}_i = \underline{x}_b$ durumuna gelebiliyorsa sisteme kontrol edilebilir denir.

Sistemin kontrol edilebilir olması sadece A, B matrislerine bağlıdır. Bu sebepten dolayı “sistem kontrol edilebilir” yerine “ A, B kontrol edilebilir” denir.

Kalman rank koşulu ile açıklanırsa:

A, B kontrol edilebilir $\Leftrightarrow \text{rank}[B:AB:A^2B:\dots:A^{n-1}B]_{n \times mn} = n$ ’ dir.

3.5.2.2. Gözlemlenebilme

$$\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k$$

$$\underline{y}_k = H\underline{x}_k \quad (3.69)$$

$$\underline{x}_{k_0} = \underline{x}_0$$

ve

$$\underline{y}_k = H \left(A^k \underline{x}_0 + \sum_{j=1}^k A^{k-j} B \underline{u}_{j-1} \right) \quad (3.70)$$

Olmak üzere, \underline{y}_k değeri \underline{x}_0 ile $\underline{u}_0, \underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots, \underline{u}_{k-1}$ ’ lerin bir fonksiyonudur. Girdiler (kontrol) sıfır olursa veya alınırsa, \underline{y}_k sadece \underline{x}_0 ’ ın bir fonksiyonudur $\underline{y}_k(\underline{x}_0)$.

$\underline{y}_k(\underline{x}_0)$, \underline{x}_0 başlangıç değeri ve sıfır kontrol için sistem denklemlerinin çözümü olsun. İstekselsel \underline{x}_0 vektörü için bir k adımı vardır, öyle ki $\underline{y}_1(\underline{x}_0), \underline{y}_2(\underline{x}_0), \dots, \underline{y}_k(\underline{x}_0)$ çıktı değerlerinden \underline{x}_0 belirlenebiliyorsa sisteme gözlemlenebilir denir.

Sistemin gözlemlenebilir olması sadece A, H matrislerine bağlıdır. Bu sebepten dolayı “sistem gözlemlenebilir” yerine “ A, H gözlemlenebilir” denir.

Kalman rank koşulu ile açıklanırsa:

$$A, H \text{ gözlemlenebilir} \Leftrightarrow \text{rank} \begin{bmatrix} H \\ HA \\ HA^2 \\ \vdots \\ HA^{n-1} \end{bmatrix} = n \text{ ' dir.}$$

3.5.2.3. Kararlı Olabilme

Eğer $\underline{u}_k = f(\underline{x}_k)$ gibi \underline{x}_k ' nın bir fonksiyonu ise durum geri-beslemesi söz konusudur. Durum geri beslemesi $\underline{u}_k = K\underline{x}_k$ biçiminde ise durum denklemi, $\underline{x}_{k+1} = (A + BK)\underline{x}_k$ biçimindedir. Durum değerlerinin $\underline{x}_0, \underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_k, \dots$, Dizisinin birçok özelliği $A + BK$ matrisinin özdeğerleri ile ifade edilir. Buradaki mesele K geri besleme matrisinin uygun bir seçimiyle $A + BK$ matrisinin özdeğerlerinin istekselsel değerlere getirilebilir olup olmamasıdır. Bu özelliğe sahip sistemlere veya (A, B) matrislerine özdeğer atanabilir denir. (A, B) özdeğer atanabilir olması demek, her reel katsayılı $p(\lambda) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + a_{n-2}\lambda^{n-2} + \dots + a_1\lambda^1 + a_0$ polinomu için, karakteristik polinomu $p(\lambda)$ olacak şekilde $A + BK$ matrisi, yani K matrisi vardır demektir.

Birçok modelde, \underline{x} durum vektöründeki bileşenler, sistemin arzu edilen durum değerlerinden sapmalarını ifade etmektedir. Bu sistem modellerinde, $\underline{x}_0, \underline{x}_1, \dots$, sapmalarının uygun kontrol seçerek zaman içinde azalması amaçlanmaktadır. Böyle

sistemlere veya (A, B) matrislerine kararlı olabilen denir. Bu durum $A + BK$ matrisinin kararlı matris olması durumunda söz konusudur. Bu durumda,

$$\underline{x}_k = (A + BK)^k \underline{x}_0 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \text{ ' dir.}$$

$A + BK$ matrisi kararlı olacak şekilde K matrisi varsa (A, B) ye kararlı olabilen (veya sisteme kararlı olabilen) denir.

3.5.2.4. Ortaya Çıkarılabilme, Teşhis Edilebilme

Sistem girişi bulunmayan durum için

$$\underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k \tag{3.71}$$

$$\underline{y}_k = H\underline{x}_k$$

Sistemi için \underline{x}_0 başlangıç değeri bilinmesin. ‘‘Uygun seçilen’’ bir K matrisi için durum vektörünün tahminleri olan,

$$\hat{\underline{x}}_{k+1} = A\hat{\underline{x}}_k + K(\underline{y}_k - H\hat{\underline{x}}_k) \tag{3.72}$$

$$\hat{\underline{x}}_0 = 0$$

Göz önüne alınır \underline{x}_k durum vektörlerinin tahminleri olan $\hat{\underline{x}}_k$ ' lara gözlemci denir.

Gerçek \underline{x}_k durumu yerine $\hat{\underline{x}}_k$ alındığında ortaya çıkan hata $\hat{\underline{e}}_k = \underline{x}_k - \hat{\underline{x}}_k$ ve

$$\hat{\underline{e}}_{k+1} = \underline{x}_{k+1} - \hat{\underline{x}}_{k+1} = A\underline{x}_k - A\hat{\underline{x}}_k - K(\underline{y}_k - H\hat{\underline{x}}_k) = A\underline{x}_k - A\hat{\underline{x}}_k - K(H\underline{x}_k - H\hat{\underline{x}}_k)$$

olmak üzere,

$$\hat{\underline{e}}_{k+1} = (A - KH)\hat{\underline{e}}_k$$

(3.73)

$$\hat{\underline{e}}_0 = \underline{x}_0, \quad (\hat{\underline{x}} = 0)$$

İndirgeme bağıntısı yazılabilir. İsteksiz \underline{x}_0 başlangıç değeri için hatanın sıfıra gitmesi, $A - KH$ matrisi kararlı olacak şekilde K matrisinin seçilmesi demektir. Bu ise (H, A) 'nin ortaya çıkarılabilir olması demektir. Ortaya çıkarılabilme, durum vektörünün (\underline{x}_k) , hatası sıfıra giden uygun düzenlenmiş bir gözlemcinin çıktısı olarak ortaya çıkarılabilmesidir.

3.5.3. Kalman Filtresi

Bir sistemin durumu ile ilgili rasgele değişkenler bir \underline{X} rasgele vektörünün bileşenleri ve sistem çıktısı \underline{Y} olmak üzere k zaman indisine bağlı olarak,

$$\underline{X}_{k+1} = A(k)\underline{X}_k + C(k)\underline{W}_k \quad (3.74)$$

$$\underline{Y}_k = H(k)\underline{X}_k + G(k)\underline{W}_k$$

Kesikli zaman lineer durum uzay modelinde, birinci denkleme durum denklemi ve ikinci denkleme çıktı veya konum denklemi denir. Bu durum uzay modelinde:

(\underline{X}_k) Dizisi $n \times 1$ boyutlu gözlenemeyen rasgele vektörlerin dizisi,

(\underline{Y}_k) Dizisi $r \times 1$ boyutlu gözlenebilen rasgele vektörlerin dizisi,

(\underline{W}_k) Dizisi $l \times 1$ boyutlu gözlenemeyen rasgele hata vektörlerinin dizisi

ve $A(k) : n \times n, H(k) : r \times n, C(k) : n \times l, G(k) : r \times l$ ($l \geq r$) model parametrelerinin matrisleri olmak üzere, bu matrisler zamana bağlı olduğunda modele dinamik model, aksi halde statik model denir.

Sistem girdisi bulunmayan, (3.74) durum uzay modelini göz önüne alarak, amacımız sistemin çıkış verisinin, $\underline{Y}_0, \underline{Y}_1, \dots, \underline{Y}_{k-1}$ gözlemlerine dayalı olarak \underline{X}_k durumunu

tahmin etmektir. Belli bir ana kadar ki, gözlemlere dayalı olarak bir adım ilerisi için durum vektörünün alacağı değerin tahmini:

$$\underline{Y}^{k-1} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 \\ \underline{Y}_2 \\ \vdots \\ \underline{Y}_{k-1} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Gözlemlerinin $\hat{\underline{X}}_{k/k-1} = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) = \underline{\alpha}'\underline{Y}^{k-1}$ lineer birleşimi olarak yapılır. Bu tahmin, $E[\underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/k-1}]'(\underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/k-1})$ ' nin minimum olması anlamında en iyi tahmindir. Kalman filtresi $\hat{\underline{X}}_{k/k-1}$ ' nin tahmini için geliştirilmiş indirgemeli bir algoritmadır.

$$\hat{\underline{X}}_{k/k-1} = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) \quad (3.76)$$

$$\tilde{\underline{X}}_{k/k-1} = \underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/k-1}$$

$$\hat{\underline{Y}}_{k/k-1} = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{Y}_k) = H\hat{\underline{X}}_{k/k-1} \quad (3.77)$$

$$\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1} = \underline{Y}_k - \hat{\underline{Y}}_{k/k-1} = \underline{Y}_k - H\hat{\underline{X}}_{k/k-1} = H\tilde{\underline{X}}_{k/k-1} + G\underline{W}_k$$

$P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(H\underline{X}_k + G\underline{W}_k) = HP_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k)$ olduğunu göz önünde tutarak

$$\begin{aligned} \hat{\underline{X}}_{k/k} &= P_{L(\underline{Y}^k)}(\underline{X}_k) = P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) + P_{L(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1})}(\underline{X}_k) \\ &= \hat{\underline{X}}_{k/k-1} + E(\underline{X}_k(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1})')(Cov(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}))^{-1}\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1} \end{aligned} \quad (3.78)$$

şeklinde ifade edilir.

Böylece,

$$\begin{aligned}\underline{\hat{X}}_{k+1/k} &= A \left[\underline{\hat{X}}_{k/k-1} + P(k)H'(HP(k)H' + GG')^{-1} \tilde{Y}_{k/k-1} \right] + CG' [HP(k)H' + GG']^{-1} \tilde{Y}_{k/k-1} \\ &= A \underline{\hat{X}}_{k/k-1} + (AP(k)H' + CG')(HP(k)H' + GG')^{-1} (Y_k - H \underline{\hat{X}}_{k/k-1})\end{aligned}\quad (3.79)$$

elde edilir.

$K(k) = (AP(k)H' + CG')(HP(k)H' + GG')^{-1}$ ifadesi yerine konularak, (3.79) eşitliği

$\underline{\hat{X}}_{k+1/k} = A \underline{\hat{X}}_{k/k-1} + K(k)(Y_k - H \underline{\hat{X}}_{k/k-1})$ şeklinde yazılabilir.

Buradaki, $K(k)$ matrisi, Kalman kazanç matrisi olarak adlandırılır.

$$P(k+1) = AP(k)A' + CC' - [AP(k)H' + CG'] [HP(k)H' + GG']^{-1} [AP(k)H' + CG'] \quad (3.80)$$

indirgeme bağıntısına Riccati denkleminin denir.

Durum uzay modeli,

$$\underline{X}_{k+1} = A \underline{X}_k + \underline{W}_k \quad (3.81)$$

$$\underline{Y}_k = H \underline{X}_k + \underline{V}_k$$

olmak koşulu ile Kalman filtresi şu şekilde ifade edilir:

$$P_{L(\underline{Y}^k)}(\underline{X}_{k+1}) = AP_{L(\underline{Y}^k)}(\underline{X}_k) + P_{L(\underline{Y}^k)}(\underline{W}_k) = A \left[P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{X}_k) + P_{L(\tilde{Y}_{k/k-1})}(\underline{X}_k) \right] + 0 \quad (3.82)$$

$$\underline{\hat{X}}_{k+1/k} = A \left[\underline{\hat{X}}_{k/k-1} + E(\underline{X}_k \tilde{Y}_{k/k-1}') Cov(\tilde{Y}_{k/k-1})^{-1} \tilde{Y}_{k/k-1} \right]$$

Burada,

$$\tilde{Y}_{k/k-1} = \underline{Y}_k - \hat{Y}_{k/k-1} = \underline{Y}_k - P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(\underline{Y}_k) = \underline{Y}_k - P_{L(\underline{Y}^{k-1})}(H \underline{X}_k + \underline{V}_k) = H(\underline{X}_k - \underline{\hat{X}}_{k/k-1}) + \underline{V}_k \quad (3.83)$$

$$\tilde{Y}_{k/k-1} = H \underline{\hat{X}}_{k/k-1} + \underline{V}_k$$

$$\text{Cov}(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}) = \text{Cov}(H \tilde{\underline{X}}_{k/k-1} + \underline{V}_k) = H \text{Cov}(\tilde{\underline{X}}_{k/k-1}) H' + \text{Cov}(\underline{V}_k) \quad (3.84)$$

$$\text{Cov}(\tilde{\underline{Y}}_{k/k-1}) = HP(k)H' + R_k$$

$$E(\underline{X}_k \tilde{\underline{Y}}'_{k/k-1}) = E(\underline{X}_k (H \tilde{\underline{X}}_{k/k-1} + \underline{V}_k)') = \text{Cov}(\tilde{\underline{X}}_{k/k-1}) H' \quad (3.85)$$

$$E(\underline{X}_k \tilde{\underline{Y}}'_{k/k-1}) = P(k)H'$$

ifadeleri eşitlikte yerine konular ise,

$$\begin{aligned} \hat{\underline{X}}_{k+1/k} &= A \left[\hat{\underline{X}}_{k/k-1} + P(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1} \tilde{\underline{Y}}_{k/k-1} \right] \\ &= A \hat{\underline{X}}_{k/k-1} + \underbrace{AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}}_{K(k)\text{Matrisi}} [H \tilde{\underline{X}}_{k/k-1} + \underline{V}_k] \end{aligned} \quad (3.86)$$

elde edilir.

$K(k) = AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}$ matrisinde bulunan $P(k)$ ' ları elde edebilmek için aşağıdaki eşitlikleri taraf tarafa toplayarak,

$$\underline{X} = A\underline{X}_k + \underline{W}_k$$

$$-\hat{\underline{X}}_{k+1/k} = -A\hat{\underline{X}}_{k/k-1} - K(k)[H \tilde{\underline{X}}_{k/k-1} + \underline{V}_k] \quad (3.87)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\underline{X}}_{k+1/k} &= A(\underline{X}_k - \hat{\underline{X}}_{k/k-1}) + \underline{W}_k - K(k)H \tilde{\underline{X}}_{k/k-1} - K(k)\underline{V}_k \\ &= (A - K(k)H) \tilde{\underline{X}}_{k/k-1} + \underline{W}_k - K(k)\underline{V}_k \end{aligned}$$

elde edilir. Her iki tarafa kovaryans operatörünün uygulanması ile,

$P(k+1) = (A - K(k)H)P(k)(A - K(k)H)' + Q_k + K(k)R_k K(k)'$ olarak elde edilir.

Bu indirgemeli denklemde $K(k)$ matrisi yerine $AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}$ konarak,

$P(k+1) = AP(k)A' + Q_k - AP(k)H'[HP(k)H' + R_k]^{-1}HP(k)A'$ elde edilir.

(P_k ve M simetrik matrislerdir) tüm bunlara göre Kalman filtresi:

$$\hat{\underline{X}}_0 = m_0$$

$$P(0) = P_0$$

$$\hat{\underline{X}}_{k+1/k} = A\hat{\underline{X}}_{k/k-1} + K(k)\left[\underline{Y}_k - H\hat{\underline{X}}_{k/k-1}\right] \quad (3.88)$$

$$K(k) = AP(k)H'(HP(k)H' + R_k)^{-1}$$

$$P(k+1) = AP(k)A' + Q_k - AP(k)H'[HP(k)H' + R_k]^{-1}HP(k)A'$$

Şeklinde ifade edilir.

3.5.3.1. Zamandan Bağımsız Riccati Denklemi

Zamandan bağımsız Riccati denklemi,

$$P = APA' + CC' - (APH' + CG')(HPH' + GG')^{-1}(APH' + CG') \quad (3.89)$$

olmak üzere, P_0 başlangıç kovaryans matrisi Riccati denklemini sağlarsa, her k için

$P(k) = P$ olur ve bu durumda $K(k)$ Kalman kazanç matrisi zamandan bağımsız olur.

Bu durum, $\{\underline{X}_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ sürecinin ($\underline{u}_k = 0$ durumunda) durağan olmasını gerektirmez.

$\{\underline{X}_k, k = 0, 1, 2, \dots\}$ sürecinin durağan olması durumu:

$Cov(\underline{X}_{k+1}) = Cov(A\underline{X}_k + C\underline{W}_k) = ACov(\underline{X}_k)A' + CC'$, $Cov(\underline{X}_0) = P_0$ olmak üzere,

A kararlı ve $P_0 = AP_0A' + CC'$ ise $Cov(\underline{X}_k) = P_0$ Riccati denklemi iki karşıt etki arasında bir uzlaşmadır. Bir taraftan gözlemler geldikçe ve biriktikçe \underline{X}_k hakkında bilgi artmakta, diğer taraftan ise başlangıçtan uzaklaştıkça \underline{X}_k durumunun konumu daha belirsiz olmaktadır, yani (3.80) indirgeme bağıntısı ile hesaplanan $P(k+1)$ ' ler iraksayabilir. Riccati denklemini sağlayan başlangıç kovaryansı bu iki belirsizliğin dengelendiği bir değerdir.

Riccati denkleminin çözümünün varlığı ve tekliği, durum-uzay modelindeki kararlılık ve ortaya çıkarılabilirlik özelliklerine bağlıdır.

$$\hat{A} = A - CG'(GG')^{-1}H \quad (3.90)$$

$$\hat{C} = C[I - G'(GG')^{-1}G]G$$

olmak üzere:

a) (H, A) ortaya çıkarılabilir ise Riccati denkleminin negatif olmayan en az bir çözümü vardır.

b) (\hat{A}, \hat{C}) kararlı ise çözüm tektir ve $P(k) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} P$ dir. $P(k)$ keyfi bir P_0 başlangıç değeri ile üretilmiştir. Ayrıca, K Kalman kazancı, $K = (APH' + CG')(HPH' + CG')^{-1}$ olmak üzere, $A - KH$ kararlıdır.

c) Eğer sistem ortaya çıkarılabilirlik ve kararlılık özelliklerini sağlıyorsa, başlangıç kovaryans matrisi pozitif tanımlı ve \bar{P} Riccati denkleminin çözümü olmak üzere, $P(k) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \bar{P}$ dir.

d) Eğer sistem gözlemlenebilirlik özelliğini sağlıyorsa ve başlangıç kovaryans matrisi P_0 pozitif tanımlı ise $P(k) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} P_0$ dir.

3.5.3.2. Lineer Olmayan Durum Uzay Modeli ve Genişletilmiş Kalman Filtresi

Bir sistem ile ilgili durum değişkeni, n -boyutlu \underline{X} rasgele vektörü ve gözlem değişkeni, m -boyutlu \underline{Z} rasgele vektörü olmak üzere $f: R^n \rightarrow R^n$ ve $h: R^n \rightarrow R^m$ fonksiyonları sürekli türevlere sahip olmak üzere, bu sistem için zamana bağlı olarak durum denklemi,

$$\frac{d}{dt}\underline{X}(t) = f(\underline{X}(t), t) + \underline{W}(t) \quad (3.91)$$

ve $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$ kesikli zamanlarda alınan gözlemlere göre ölçüm denklemi (uzay denklemi),

$$\underline{Z}_k = h(\underline{X}(t_k), t_k) + \underline{V}_k \quad (3.92)$$

Buradaki hata terimleri ile ilgili kabuller aşağıdaki gibidir.

$$E(\underline{W}(t)) = \underline{0}, \text{Cov}(\underline{W}(t), \underline{W}(\tau)) = Q(t)\delta(t - \tau) \quad (3.93)$$

$$E(\underline{V}_k) = \underline{0}, \text{Cov}(\underline{V}_k, \underline{V}_j) = R_k \delta_{kj}$$

iki denklem arasındaki hata terimleri ilişkisizdir. Durum vektörünün başlangıç değeri $\underline{X}(t_0)$ için, $E(\underline{X}^{nom}(t_0)) = \underline{m}_0$, $\text{Cov}(\underline{X}(t_0)) = P_0$ olup, $\underline{X}(t_0)$ ile her iki denklemdeki hata terimleri ilişkisizdir.

$\{\underline{X}(t) : t \geq 0\}$ bir zaman serisi olmak üzere, bunun bir gerçekleşmesi sistem durumunun bir yörüngesi olmaktadır. Durum denklemindeki lineer olmayan f fonksiyonu, “nominal” veya “referans” yörünge denen ve $\frac{d}{dt}\underline{x}^{nom}(t) = f(\underline{x}^{nom}(t), t)$ durum denklemini sağlayan, $\underline{x}^{nom}(t_0) = E(\underline{X}(t_0)) = \underline{m}_0$ başlangıçlı $\{\underline{x}^{nom}(t) : t \geq 0\}$ gibi bir yörünge etrafında Taylor serisine açılarak lineerleştirilebilir.

Taylor açılımında iki ve daha yüksek dereceden türevleri içeren terimlerin ihmal edilmesiyle şu şekilde yazılabilir.

$$f(\underline{X}(t), t) \approx f(\underline{x}^{nom}(t), t) + \left. \frac{\partial f(\underline{x}(t), t)}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}(t)=\underline{x}^{nom}(t)} (\underline{X}(t) - \underline{x}^{nom}(t)) \quad (3.94)$$

Böylece,

$$\frac{d}{dt} \underline{X}(t) - \frac{d}{dt} \underline{x}^{nom}(t) = f(\underline{X}(t), t) - f(\underline{x}^{nom}(t), t) + \underline{W}(t) \text{ ve } \underline{\tilde{X}}(t) = \underline{X}(t) - \underline{x}^{nom}(t) \quad (3.95)$$

$$A(t) = \left. \frac{\partial f(\underline{x}(t), t)}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}(t)=\underline{x}^{nom}}$$

olmak üzere,

$$\frac{d}{dt} \underline{\tilde{X}}(t) = A(t) \underline{\tilde{X}}(t) + \underline{W}(t) \quad (3.96)$$

lineer sürekli zaman durum denkleminde ulaşılır. Bu lineer durum denklemindeki durum vektörü için,

$$E(\underline{\tilde{X}}(t_0)) = E(\underline{X}(t_0)) - \underline{x}^{nom}(t_0) = \underline{0} \text{ ve } Cov(\underline{\tilde{X}}(t_0)) = Cov(\underline{X}(t_0)) = P_0 \text{ olmak üzere}$$

Ölçüm denklemindeki h fonksiyonu da benzer biçimde Taylor serisine açılarak,

$$h(\underline{X}(t_k), t_k) \approx h(\underline{x}^{nom}(t_k), t_k) + \left. \frac{\partial h(\underline{x}(t), t)}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}(t)=\underline{x}^{nom}(t_k)} (\underline{X}(t_k) - \underline{x}^{nom}(t_k))$$

kabulü yapılarak

$$\underline{\tilde{Z}}_k = \underline{Z}_k - h(\underline{x}^{nom}(t_k), t_k), H_k = \left. \frac{\partial h(\underline{x}(t), t)}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}(t)=\underline{x}^{nom}(t_k)} \text{ gösterimi ile,}$$

$$\underline{\tilde{Z}}_k = H_k \underline{\tilde{X}}(t_k) + \underline{V}_k \quad (3.97)$$

lineer ölçüm denklemine ulaşılır. Her ikisi de lineerleştirilen, ancak durum denklemini sürekli-zaman, ölçüm denklemini kesikli-zaman olan,

$$\frac{d}{dt} \underline{\tilde{X}}(t) = A(t) \underline{\tilde{X}}(t) + \underline{W}(t) \quad (3.98)$$

$$\underline{\tilde{Z}}_k = H_k \underline{\tilde{X}}(t_k) + \underline{V}_k$$

durum-uzay modelinde, kesikli olarak elde edilen ölçümlerden faydalanmak için durum denkleminin de kesikli hale getirilmesi gerekmektedir. $\frac{d}{dt} \underline{\tilde{X}}(t) = A(t) \underline{\tilde{X}}(t) + \underline{W}(t)$ durum denkleminin $\underline{\tilde{X}}(t_k)$ değeri ile başlayan t_{k+1} anındaki çözümü

$$\underline{\tilde{X}}(t_{k+1}) = \Phi(t_{k+1}, t_k) \underline{\tilde{X}}(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}, \tau) \underline{W}(\tau) d\tau$$

olmak üzere,

$$\underline{\tilde{X}}_k = \underline{\tilde{X}}(t_k), A_k = \Phi(t_{k+1}, t_k) \quad (3.99)$$

$$\underline{\tilde{X}}_{k+1} = A_k \underline{\tilde{X}}_k + \underline{W}_k$$

biçiminde kesikli-zaman lineer bir durum denklemini yazılırsa, \underline{W}_k hata terimi için,

$$E(\underline{W}_k) = \underline{0} \quad (3.100)$$

$$Cov(\underline{W}_k) = Q_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}, \tau) Cov(\underline{W}(\tau)) \Phi'(t_{k+1}, \tau) d\tau$$

olması durumunda,

$$E(\tilde{\underline{X}}(t_{k+1})) = E(\tilde{\underline{X}}_{k+1}) \text{ ve } Cov(\tilde{\underline{X}}(t_{k+1})) = Cov(\tilde{\underline{X}}_{k+1}) \text{ olur.}$$

Bu anlamda bir kesikleştirme ile

$$\tilde{\underline{X}}_{k+1} = A_k \tilde{\underline{X}}_k + \underline{W}_k \quad (3.101)$$

$$\tilde{\underline{Z}}_k = H_k \tilde{\underline{X}}_k + \underline{V}_k$$

elde edilir. Lineer kesikli-zaman durum-uzay modeline ulaşılır. Bu model için kalman filtresi ile $\tilde{\underline{X}}_k$ durum vektörünün tahminleri elde edilir ve $\underline{X}_k = \tilde{\underline{X}}_k + \underline{x}^{nom}(t_k)$ eşitliği göz önüne alınarak $\underline{X}(t_k) = \underline{X}_k$ durumu tahmin edilir.

$$x_0^{nom} = E(x_0) = m_0 \text{ ve } x_k^{nom} = f(x_{k-1}^{nom}, k-1) \quad , \quad k = 1, 2, \dots$$

olmak üzere $\{x_k^{nom} : k = 0, 1, 2, \dots\}$ dizisine nominal yörünge denir, lineer durum-uzay modeline ulaşılır.

Başlangıç değerlerine bağlı olarak

$$P_{k|k-1} = \left[\frac{\partial f_{k-1}}{\partial x_{k-1}}(\hat{x}_{k-1}) \right] P_{k-1} \left[\frac{\partial f_{k-1}}{\partial x_{k-1}}(\hat{x}_{k-1}) \right]' + Q_{k-1}, \hat{x}_{k|k-1} = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1})$$

$$K_k = P_{k|k-1} \left[\frac{\partial h_k}{\partial x_k}(\hat{x}_{k|k-1}) \right] \left[\left[\frac{\partial h_k}{\partial x_k}(\hat{x}_{k|k-1}) \right] P_{k|k-1} \left[\frac{\partial h_k}{\partial x_k}(\hat{x}_{k|k-1}) \right]' + R_k \right]^{-1} \quad (3.102)$$

$$P_k = \left[I - K_k \left[\frac{\partial h_k}{\partial x_k}(\hat{x}_{k|k-1}) \right] \right] P_{k|k-1}, v\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \left[z_k - h_k(\hat{x}_{k|k-1}) \right]$$

Alışılmış gösterimdeki genişletilmiş Kalman filtresi elde edilir.

3.6. Sistem Tanımlama Metodu

Genel ilkeleri bölüm 3.5' te verilmiş olan olan sistem tanımlama metodu tez çalışmasına özgünlük katacak şekilde düzenlenmiş ve aşağıdaki düzen dahilinde sunulmuştur.

Sistemin geçerli bir matematik modelinin elde edilmesi başından sonuna kadar dikkat ve titizlik gerektiren bir işlemdir. Sistem tanımlama işlemi, sistemi uyaracak uygun giriş sinyalinin seçimi ile başlar. Sistemden elde edilen tanımlamaya uygun veri ile bir model belirlenir ve belirlenen bir yöntemle parametreler kestirilir (Kasımzade ve Tuhta, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, Peeters, 2000, Ljung, 1998). Bu yolla elde edilen model geçerlilik testlerini geçemezse algoritmada yukarıdan aşağıya doğru hareket edilir. Önce parametre kestirim yöntemi değiştirilir. Eğer model çeşitli denemelere rağmen yine geçersizse model yapısı değiştirilir ve algoritmada aşağıya doğru hareket edilir. Model yapısını da değiştirmenin bir sonuca varmadığı durumlarda sistemin deneysel planlamasına geri dönülür. Sistemin lineer bir modelle temsil edilemediği veya tanımlamanın (hata ölçülerine göre) yeteri kadar başarılı bulunmadığı sonucuna varılırsa akıllı sistemlerin de içinde bulunduğu lineer olmayan modelleme yapılarına başvurulur. Sistem tanımlamada iki yaklaşım bulunmaktadır.

Gri Kutu: İncelenen sistemin yapısı hakkında bir önbilginin mevcut olması neticesinde kullanılan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda içeriği hakkında bir önbilgiye sahip olduğumuz bir sisteme bilinçli girişler yapılarak ve bunun sonucunda çıkan çıkışları izleyerek bir model oluşturulur.

Kara Kutu: İncelenen sistemin yapısı hakkında hiçbir bilgiye sahip olunmadığında kullanılan yaklaşımdır. Bu yaklaşımda, içeriğinden haberdar olmadığımız bir sisteme çeşitli girişler yapılarak ve bunun sonunda çıkan çıkışları da izleyerek bir model oluşturulur.

3.6.1. Karakutu Modelinin Tanımlanması

Titreşim analizinde gerçek sistemin-mevcut yapının (kara kutu modeli) tanımlanması, dolayısı ile deneysel ölçmelere dayanarak $[\bar{A}]$, $[\bar{B}]$, $[\bar{C}]$ sistem matrislerinin bulunması öncelikli olarak ortaya çıkmaktadır (Kasimzade A. A. 2006).

Bu hedef doğrultusunda analitik inceleme aşağıdaki düzenle yapılır:

Sürekli sistemin hareket denklemi düzenlenir.

$$[m]\{\ddot{u}(t)\} + [c]\{\dot{u}(t)\} + [k]\{u(t)\} = \{F(t)\} = [d]\{\delta(t)\} \quad (3.103)$$

Sürekli sistemin durgunlaşmış denklemi düzenlenir:

$$\{\dot{z}(t)\} = [A_c]\{z(t)\} + [B_c]\{\delta(t)\} \quad (3.104)$$

$$\{y(t)\} = [C]\{z(t)\} + [D]\{\delta(t)\}$$

$$[A_c] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[m]^{-1}[k] & -[m]^{-1}[c] \end{bmatrix} \quad [B_c] = \begin{bmatrix} [0] \\ [m]^{-1}[B] \end{bmatrix} \quad (3.105)$$

Giriş etki kuvvetinin $\{F(t)\} = [d]\{\delta(t)\}$ beyaz gürültü veya zamana bağlı itme uyarması olduğu kabul edilerek, ayrık zamanda stokastik durgunlaşmış model oluşturulur:

$$\{u_{k+1}\} = [A]\{u_k\} + [B]\{\delta_k\} + \{w_k\} \quad (3.106a)$$

$$\{y_k\} = [C]\{u_k\} + [D]\{\delta_k\} + \{v_k\} \quad (3.106b)$$

Burada,

$\{u_k\} = \{u(k\Delta t)\}$ Ayrık zaman durgunlaşmış yerdeğiştirme vektörüdür;

$[A] = e^{[A_c]\Delta t}$ Ayrık-zamanda sistem matrisidir;

$[B] = [[A] - [I]][A_c]^{-1}[B_c]$ Ayrık-zamanda giriş matrisidir; $[I]$ birim matristir;

$\{w_k\}$ Arıza ve modelleme eksikliklerinden dolayı ortaya çıkabilecek sistem oluşum gürültüsüdür;

$\{v_k\}$ Aygıt hatalarından dolayı ölçme gürültüsüdür;

$\{y_k\}$ Boyutu $N_{ayg} \times N_{örnek}$ çarpımına eşit olan çıkış vektörü olup, yapı üzerinde yerleştirilmiş aygıtlarla kayıt olunur (burada N_{ayg} -aygıt sayısı, $N_{örnek}$ -örnek (örnekleme) nokta sayısıdır).

$\{w_k\}$, $\{v_k\}$ vektörleri ölçülemiyor, ancak biz onların sıfır ortalaması olan beyaz gürültü olarak kabul edilir.

Bakılan problemde $[A],[B],[C]$ sistem karakteristiklerinin yaklaşık değerlerinin $[\hat{A}],[\hat{B}],[\hat{C}]$ bulunması için stokastik kara kutu modeline Kalman teorisi uygulanır.

Ölçmeler (3.106) bağılıkları ile yapılarak $[\hat{A}]$, $[\hat{C}]$ matrisleri belirlenir.

Ölçmeler sonucu yapı karakteristik noktalarında $\{y_{k+s}\}$ ve $\{y_s\}_{ref}$ referans noktalarındaki kayıt sonuçlarına dayanarak korelasyon matrisleri hesaplanır:

$$[R_k] = \frac{1}{S-k} \sum_{s=0}^{S-k-1} \{y_{k+s}\} \{y_s\}_{ref}^T \quad (3.107)$$

Bu korelasyon matrislerinden uygun Hankel matrisleri oluşturulur:

$$[H_{p,q}] = \begin{bmatrix} [R_1] & [R_2] & \dots & [R_q] \\ [R_2] & [R_3] & \dots & [R_{q+1}] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [R_p] & [R_{p+1}] & \dots & [R_{p+q-1}] \end{bmatrix} \quad (3.108)$$

Hankel matrislerinin öz değerlerine ayrıştırılarak bileşenleri bulunur.

$$[H_0] = [U][\Sigma][V]^T \quad (3.109)$$

Sıfıra yakın öz değerler $[\Sigma]$ matrisinden kaldırılarak rankı (n) bulunur ve uygun olarak $[U_n], [\Sigma_n], [V_n]$ matrisleri oluşturulur.

Birinci yaklaşım için sistem $[\hat{A}]$, sönüm $[\hat{C}]$ ve etki $[\hat{B}]$ matrisleri hesaplanır:

$$[\hat{A}] = [\Sigma_n]^{-1/2} [U_n] [H(1)] [V_n] [\Sigma_n]^{-1/2} \quad (3.110)$$

$$[\hat{B}] = [\Sigma_n]^{-1/2} [V_n]^T [E_r] \quad (3.111)$$

$$[\hat{C}] = [E_r]^T [U_n] [\Sigma_n]^{-1/2} \quad (3.112)$$

$$[E_r]^T = ([I_r] \quad [0_r] \quad \dots \quad [0_r]) \quad (3.113)$$

Burada r -giriş sayısı; $[I_r]$ - r . derece eşdeğerlik matrisi; $[0_r]$ - r . derece sıfır matrisidir.

$[\hat{A}]$ Matrisinin öz problemi çözülür:

$$[\Psi, \Lambda] = \text{eig}(\hat{A}) \quad (3.114)$$

Hankel matrisinin bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$[H_0] = \left[[U_n] [\Sigma_n]^{1/2} [\Psi] \right] \left[[\Psi]^{-1} [\Sigma_n]^{1/2} [V_n]^T \right] \approx [\bar{P}] [\bar{Q}] \quad (3.115)$$

Riccati denklemi oluşturulur:

$$[P] = [\hat{A}] [P] [\hat{A}]^T - [\hat{A}] [P] [\hat{C}]^T \left[[U_n] + [\hat{C}] [P] [\hat{C}]^T \right]^{-1} [\hat{C}] [P] [\hat{A}]^T + [\bar{Q}] \quad (3.116)$$

Buradan $[P] = [\hat{P}]$ bulunarak, Kalman kazancı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$[\hat{K}] = [\hat{A}][\hat{P}][\hat{C}]^T \left[[U_n][\hat{P}][\hat{C}]^T \right]^{-1} \quad (3.117)$$

Kalman filtresi denklemleri oluşturulur.

$$\{\hat{u}_{k+1}\} = \left[[\hat{A}] - [\hat{K}][\hat{C}] \right] \{\hat{u}_k\} + \left[[\hat{B}] - [\hat{K}][\hat{D}] \right] \{\delta_k\} + [\hat{K}] \{y_k\} \quad (3.118)$$

$$\{y_k\} = [\hat{C}] \{\hat{u}_k\} + [\hat{D}] \{\delta_k\} + \{\varepsilon_k\} \quad (3.119)$$

Kalman filtresi denklemleri, sistemin birinci aşamada modellendiği denklem ile

$$\{u_{k+1}\} = [A] \{u_k\} + [B] \{\delta_k\} + \{w_k\} \quad (3.120)$$

$$\{y_k\} = [C] \{u_k\} + [D] \{\delta_k\} + \{v_k\} \quad (3.121)$$

Karşılaştırılarak, hata durumu belirlenir.

$\{e_k\} = \{u_k\} - \{\hat{u}_k\}$; $\{E(e_k)\} = \{0\}$ olması gerekir.

$$\{e_{k+1}\} = \left[[\hat{A}] - [\hat{K}][\hat{C}] \right] \{e_k\} - [\hat{K}] \{v_k\} + \{w_k\} \quad (3.122)$$

Dış artık

$\{\varepsilon_k\} = [\hat{C}] \{e_k\} + \{v_k\}$; $\{E(e_k)\} = \{0\}$ olması gerekir.

Son durum sağlanmazsa, hesaplar tekrarlanır. Gösterilen incelemeler sonucunda gerçek sistemin $[A], [B], [C]$ parametreleri netleştirilerek durumu tanımlanmış olur.

3.7. Hassaslık Değerlendirmesi

Modal güvence kriteri (MGK) iki mod şekli arasındaki açının kosinüsün karesi olup, bu modlar arasındaki korelasyonu ifade etmektedir. İlk kez 1982 yılında Allemang ve Brown tarafından kullanılmıştır. Sayısal (sonlu elemanlar modeli) ve deneysel mod şekilleri arasında MGK aşağıdaki ifade ile hesaplanır:

$$MGK(\psi_{sem}, \psi_{dm}) = \frac{|\{\psi_{sem}\}^T \{\psi_{dm}\}|^2}{(\{\psi_{sem}\}^T \{\psi_{sem}\})(\{\psi_{dm}\}^T \{\psi_{dm}\})} \quad (3.123)$$

Sayısal (sonlu elemanlar modeli) ve deneysel modların mümkün olabilen tüm kombinasyonları arasındaki bağlantı ölçütleri, MGK matrisinde kayıt edilir. MGK matrisinin hesabı hızlıdır ve bu hesaplama da kütle veya rijitlik matrislerine ihtiyaç yoktur. MGK matrisindeki köşegen dışı elemanlar modlar arasındaki lineer bağımsızlığın kontrolü anlamına gelir. 1'e eşit değerdeki iki mod şekli aynı modları (veya tam korelasyonu) gösterir. MGK değeri serbestlik derecelerindeki deneysel ve sayısal olarak elde edilen modal yerdeğiştirmeler çarpılarak hesaplanır. Esas serbestlik derecelerinin yeterli sayısı uzaysal oluşumu (mod şekilleri için) sağlamak için gereklidir. MGK matrisi genelde en iyi aygıt yerleşimini belirlemede ve otomatik mod şekli eşleşmesinde kullanılır.

3.7.1. Korelasyon Katsayıları

Çeşitli korelasyon katsayıları hesaplanabilir (C_c). Bu hesap, tepkiler (rezonans frekansları, modal yerdeğiştirmeler), global korelasyon bilgisi (MGK) veya kütle gibi diğer tepki verileri olarak seçilen tekil modal parametrelerdeki hatalara dayalıdır. Farklı bileşenler, tepki değerlerinde beklenen rölatif hata C_{Ri} kullanılarak birbirlerine göre ağırlaştırılırlar. Örnek verilirse, deneysel rezonans frekanslarındaki beklenen rölatif hata %1 dir.

Rezonans frekansları arasındaki ağırlıklı rölatif fark ($C_c Ort.$):

$$C_c Ort. = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{Ri} \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (3.124)$$

Rezonans frekansları arasındaki ağırlıklı mutlak rölatif fark ($C_c Mut.$):

$$C_c Mut. = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{Ri} \frac{|\Delta f_i|}{f_i} \quad (3.125)$$

Ortalama MGK değerleri ($MGK Ort.$):

$$C_c = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N C_{Ri} MGK_i \quad (3.126)$$

Bu, tepkiler olarak seçilen N rezonans frekanslarıyla uyumlu olan eşleşmiş mod şekilleri için MGK değerlerinin ortalama sınırlandırmasıdır. Güven değerleri rezonans frekanslarınıninkidir.

Ortalama MGK değerleri ($C_c MGK Ort.$):

$$C_c = \frac{1}{C_R} \sum (1 - C_{Ri} MGK_i); C_R = \sum_{i=1}^N C_{Ri} \quad (3.127)$$

Bu, tepki olarak seçilen MGK değerlerinin ortalama sınırlandırmasıdır.

Modal yerdeğişiklikler arasındaki ağırlıklı mutlak fark ($C_c Yer.$):

$$C_c = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{Ri} \frac{\Delta \psi_i}{\psi_i}; C_R = \sum_{i=1}^N C_{Ri} \quad (3.128)$$

$N = N_m N_N N_D$ ' dir. N_m Seçilmiş toplam moddur, N_N seçilmiş toplam düğümdür (noktadır) ve N_D seçilmiş toplam serbestlik derecesidir.

Tam kütle ve hesaplanmış kütle arasındaki ağırlıklı mutlak fark (C_c Küüt.):

$$C_C = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{Ri} m_i; C_R = \sum_{i=1}^N C_{Ri} \quad (3.129)$$

m_i Eleman veya eleman gruplarıyla ilgili i . kütle tepkisi.

Toplam ağırlıklı rölatif farklar

$$C_C = C_C Mut. + k_1 C_C MGK + k_2 C_C Yer. + k_3 C_C Küüt. \quad (3.130)$$

Bu denklemden N seçilmiş tepki sayısıdır ve beklenen rölatif hatalar C_{Ri} aşağıdaki gibi kullanılır:

$$C_C = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N (1 - C_{Ri} MGK_i); C_R = \sum_{i=1}^N C_{Ri} \quad (3.131)$$

C_R : tepkiler için ağırlık matrisi

m : kütle

f : rezonans frekansları (Hz)' dir.

3.7.2. Hassaslık Analizi

Hassaslık analizi, bir analizcinin sınır koşulları, malzeme rijitliği ve geometri gibi özelliklerin düzenlenmesiyle modelin yapısal tepkilerinin nasıl etkilendiği fikrini elde edebildiği bir tekniktir (Jung, 1992, Juang, 1994). Hassaslık katsayıları, belirli tepki miktarı R ' nin parametre olarak da bilinen analiz model özelliği P ' deki değişme oranı olarak tanımlanır. Parametreler, eleman malzemesi veya geometrik özellikler ve yay rijitliği, sınır koşulları ve toplanmış kütle özellikleri olabilir. Tepkiler, rezonans frekansları veya kütle özellikleri olabilir (Friswelli ve ark., 1995).

Hassaslık katsayılarını hesaplamak için iki ana yaklaşım kullanılır:

- Diferansiyel hassaslık analizi
- Sonlu farklar hassaslık analizi

Sonlu farklar hassaslık analizi, eleman matrislerinin iki durumu arasındaki farkı kullanırken diferansiyel hassaslıklar eleman matrislerinin türevine ihtiyaç duyar. Mevcut hassaslık tipi ayrıca parametre tipine dayalıdır, çünkü artan ölçümsel farklar yüzünden tüm parametre tipleri diferansiyel hassaslık analizine izin vermez.

3.7.3. Hassaslık Analizi İçin Parametre Seçimi

Parametre, gerçek yapıyı modellemek için kullanılan ve incelemeyi yapan kişi tarafından tahmin edilen fiziksel bir miktardır (Kasımzade ve Tuhta, 2004, 2007, Kasımzade ve ark. 2006, Andersen ve ark. 2007, Brownjohn ve ark. 2007). Hangi parametrenin seçileceği uygulama tipine dayanır. Eğer hassaslık analizi model güncelleme için parametrelerin seçimine yardımcı bir araç olarak kullanılırsa, kullanıcı maksimum parametre sayısı ile başlamalı, hassaslığı ve hassas olmayan bölgeleri tanımlamalı ve düşük hassaslıktaki parametreleri elemelidir. Hassaslığı yüksek parametreler model güncelleme için uygun bir seçime ulaşmada hata sınırlama metodlarını kullanarak daha iyi değerlendirilebilir. Hassaslık analizi için parametre seçimi yapılırken, aşağıdakiler göz önüne alınmalıdır:

- Parametre tipinin farklılığı hesaba katılmalıdır.
- Parametrenin geometrik tahminlere veya tolerans, güvenilirlik, hassaslık gibi özelliklere dayalı nasıl gruplandırılabilir tahmin edilmelidir.
- Hassaslık analiz sonuçları hata sınırlama sonuçlarıyla karşılaştırılmalıdır.

Model güncelleme için parametre seçiminden çok hassaslık analizi uygulamaları için parametre seçimi uygulamayla birlikte direk olarak normal şekilde karşılaştırılacaktır (Jung, 1992). Seçilebilen parametre sayısı ve çeşidi kullanılan eleman tipi ve ağ yoğunluğunun bir fonksiyonudur.

3.7.4. Hassaslık Analizi İçin Tepki Seçimi

Parametrelerle ilgili olarak, tepki seçimi, uygulamayla yürütülür. Eğer tasarımı en iyi hale getirmek için bilgi istenirse, hedef hareket örneğinin frekans rezonansları veya kütle gibi yapısal tepkilerin terimlerine bakılmalıdır. Eğer uygulama, model güncelleme ise, tüm deneysel olarak elde edilen tepki değerleri seçiminde hesaba katılmalıdır.

Ayrıca aşağıdakiler göz önüne alınır:

- Güvenli olmayan deney verisi hesaba katılmamalıdır.
- Deney tepkileri analitik olanlarla eşleştirilmelidir, aksi halde kullanılmamalıdır.

Veri tabanında deneysel veri olmama olasılığına karşı, ya analitik sonuçlar tepki olarak seçilmeli ya da analitik veri tabloları tepki seçiminden önce deneysel veritabanına kopyalanmalıdır. İlk durumda, hiç model güncelleme olmaz çünkü korelasyon katsayısı sıfır olacaktır.

3.8. Model Güncelleme

2. bölümde konuyla ilgili yapılmış çalışmalardan detaylı olarak bahsedilmiştir. Bu bölümde modal veriyi kullanan metotlar açıklanmıştır. Modal veriyi kullanan metotlar iki ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar doğrudan metotlar ve tekrarlı metotlardır.

3.8.1. Doğrudan Metotlar

Doğrudan metotların etkisini anlamak için, bu metotların ne yaptığını, hataların nerede oluştuğunu ve güncellenen modele nasıl etki ettiğini anlamak gerekir. Konu başlığından da anlaşılacağı gibi bu metotlar iterasyona gerek kalmadan büyük avantaj sağlar, ırsaklık olasılıkları ve çok sayıdaki hesap ortadan kalkar.

Bu metotların en önemli özelliklerinden biri ölçüm verilerini çoğaltmasıdır. Benzer ölçüm verilerini yapabilen modeller temsili olarak adlandırılır. Diğer yandan, ölçüm hatası ve model yetersizliğinden dolayı ölçüm ve sayısal verilerin eşit olması olasılık dışıdır. Güncelleme, modeldeki parametreleri en iyi şekilde kullanmak için yapılır. Eğer güncellenen model, hatalı ölçümleri tam olarak çoğaltırsa, sonraki her analiz hatalı olabilir. Bu yüzden, doğrudan metotlarda gerçek modelleme ve yüksek kaliteli ölçümlere gereksinim vardır. Bir yapının doğal frekansları doğru olarak ölçülebilmektedir.

Mod şekli verilerinde önemli bir problem, sonlu eleman modeli serbestlik derecesi sayısı için vektörlerin çoğaltmaya ihtiyaç duymasındır. Modeldeki hatalardan dolayı bu çoğaltma güncelleme algoritmasıyla verideki hataları açıklar.

Deneysel modellerin en önemli eksikliği, güncellenen kütle ve rijitlik matrislerinin çok az fiziksel anlama sahip olması ve sonlu elemanlar modelindeki fiziksel değişimlerle ilgili olamamasıdır. Düğümlerin bağılıkları kesin değildir ve genellikle güncellenen matrisler tamamen doldurulmuştur, oysa başlangıç matrisleri seyrek ve köşegen şeklinde bir sıra halinde sıfır olmayan elemanları içerir. (Kabe, 1985), rijitlik matrisinin sadece sıfır olmayan elemanlarını güncellemek için Lagrange çarpanı metodunu geliştirmiştir. (Smith ve ark. 1991), rijitlik güncellemesi için “yarı-Newton” metotlarını dikkate almıştır. Sonuçları yorumlamak karmaşıktır, çünkü düşük frekans modları ölçülmüştür, oysa rijitlik matrisine en fazla katkıda bulunan frekanslar yüksek frekans modlarıdır.

3.8.1.1. Lagrange Çarpanları Metodu

Lagrange çarpanları metodu, bağımsız değişkenler üzerindeki sınırlara bağlı olan bir fonksiyonun en aza indirilmesinin uygun bir anlamıdır. Bu tanımlama metotlarının önemli mühendislik özellikleri, azaltılmış fonksiyonlar ve maruz kalınan sınırlardır. Tüm metotlar üç niceliği ele alır: ölçüm modal verisi, sayısal kütle ve rijitlik matrisleri. Ölçüm özvektörleri kütle matrisine göre ortogonal olması için doğrulanır ve sonra sayısal matrisle uyuşan fakat ölçüm modal modelini artıran güncellenmiş rijitlik matrisi hesaplanır.

Bir yapıdan alınan ölçüm verisi, onun sayısal modelinden farklıdır. Ölçüm mod şekillerinin arttırılmış veya sayısal matrislerin azaltılmış olması gerektiğinden, algılayıcı sayısı, sonlu eleman modelindeki serbestlik derecesi sayısından çok daha az olacaktır. Ölçüm verisindeki olağan hatalarla birleştirilen bu problemler, ölçüm modlarının analitik kütle matrisine göre ortogonal olmayacağı anlamına gelir. Eğer kütle matrisi kesin olarak alınırsa, özvektör matrisi ortogonalliği sağlamak için doğrulanabilir. Doğrulanmış özvektör matrisi, ölçüm matrisiyle uyumlu fakat kütle matrisine göre ortogonal bulunur. Matematik olarak bu, bir ağırlıklı Euclidean normunu en aza indiren Φ matrisini belirleyerek:

$$J = \|N(\Phi - \Phi_m)\| = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \left[\sum_{j=1}^n [N]_{ij} \left([\Phi]_{jk} - [\Phi_m]_{jk} \right) \right]^2 \quad (3.132)$$

ortogonal durum uygulanarak ifade edilir:

$$\Phi^T M_a \Phi = I \quad (3.133)$$

burada

$$N = M_a^{1/2}$$

M_a : sayısal kütle matrisi

Φ_m : ölçüm özvektör matrisi

$[N]_{ij}$, $[\Phi]_{ij}$, $[\Phi_m]_{ij}$ N , Φ , Φ_m Matrislerinin (i, j) elemanları

m : ölçüm özvektör matrisi sayısı

n : sayısal modeldeki serbestlik derecesi sayısıdır

Lagrange çarpanı metodunda kullanılan bu sınır denklemleri artış fonksiyonu en aza indirmek için aşağıdaki gibi kullanılır:

$$J = \sum_{i,j,h=1}^n \sum_{k=1}^m \left\{ [N]_{ij} \left([\Phi]_{jk} - [\Phi_m]_{jk} \right) [N]_{ih} \left([\Phi]_{hk} - [\Phi_m]_{hk} \right) \right\}$$

(3.134)

$$+ \sum_{i,h=1}^m \gamma_{ih} \left\{ \sum_{j,k=1}^n \left([\Phi]_{ji} [M_a]_{jk} [\Phi]_{kh} - \delta_{ih} \right) \right\}$$

burada δ_{ij} Kronecker deltasını gösterir. Dikkat edilirse, birinci terimdeki karesel ifade çarpılır. İkinci terimdeki parantez ifadesi, ortogonalite denklemlerinden türetilmiş denklemleri gösterir. γ_{ih} Lagrange çarpanlarıdır ve Γ Lagrange çarpanı matrisinde yer alır. (3.133) denklemindeki simetri, olası bir m^2 'nin dışında sadece $\frac{1}{2}m(m+1)$ bağımsız denklem olduğu anlamına gelir. Γ Lagrange Çarpanı matrisi, simetri sınırının belirtilmesiyle tek hale getirilir.

$$\Gamma = \Gamma^T \quad (3.135)$$

(3.134) denkleminde verilen artırılmış fonksiyon şimdi, düzeltilen $[\Phi]_{rs}$ özvektörünün nm elemanlarına göre en aza indirilir. (3.134) denkleminin bu elemanların her birine göre diferansiyelinin alınırsa;

$$\frac{\partial J}{\partial [\Phi]_{rs}} = \sum_{i,h=1}^n [N]_{ir} [N]_{ih} \left([\Phi]_{hs} - [\Phi_m]_{hs} \right) + \sum_{i,j=1}^n [N]_{ij} \left([\Phi]_{js} - [\Phi_m]_{js} \right) [N]_{ir} \quad (3.136)$$

$$+ \sum_{h=1}^m \gamma_{sh} \left\{ \sum_{k=1}^n [M_a]_{rk} [\Phi]_{kh} \right\} + \sum_{i=1}^m \gamma_{is} \left\{ \sum_{j=1}^n [\Phi]_{ji} [M_a]_{jr} \right\} = 0$$

İlk iki terim N 'nin tanımını ve simetri anlamını kullanarak basitleştirilebilir ve birleştirilebilir. Böylece $\sum_{i=1}^n [N]_{ir} [N]_{ih} = [M_a]_{rh}$ dir. Burada $[M_a]_{rh}$ M_a kütle matrisinin (r, h) elemanlarıdır. Γ ve M_a 'nın simetriğini kullanarak (3.136) denklemindeki son iki terim birleştirilebilir:

$$\frac{\partial J}{\partial [\Phi]_{rs}} = 2 \sum_{h=1}^n [M_a]_{rh} \left([\Phi]_{hs} - [\Phi_m]_{hs} \right) + 2 \sum_{h=1}^m \sum_{k=1}^n [M_a]_{rk} [\Phi]_{kh} \gamma_{hs} = 0 \quad (3.137)$$

(3.137) denkleminin birinci terimi $2M_a(\Phi - \Phi_m)$ matrisinin (r, s) elemanlarını, ikinci terimi ise $2M_a\Phi\Gamma$ matrisinin (r, s) elemanlarını gösterir. Böylece (3.137) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$2M_a(\Phi - \Phi_m) + 2M_a\Phi\Gamma = 0$$

veya kütle matrisi tekil değilse,

$$\Phi - \Phi_m + \Phi\Gamma = 0 \quad (3.138)$$

Tüm terimleri toplayarak,

$$\Phi[I + \Gamma] = \Phi_m \quad (3.139)$$

$(I + \Gamma)$ yi tekil değil kabul edilirse,

$$\Phi = \Phi_m [I + \Gamma]^{-1} \quad (3.140)$$

(3.140) denkleminde verilen Φ ifadesini (3.133) kütle ortogonallik sınırında yerine koyup $(I + \Gamma)$ ile çarpılırsa,

$$[I + \Gamma] = [\Phi_m^T M \Phi_m]^{1/2} \quad (3.141)$$

(3.141) denklemini (3.140) denkleminde yerine yazarsak düzeltilmiş özvektör matrisi elde edilir.

$$\Phi = \Phi_m [\Phi_m^T M \Phi_m]^{-1/2} \quad (3.142)$$

Düzeltilmiş modal matris şimdi analitik rijitlik matrisini düzeltmede kullanılabilir. M_a kütle matrisi kesin olarak kabul edilir. Düzeltilmiş rijitlik matrisinde iki sınır vardır: ölçüm modal verisini çoğaltmalı ve simetrik olmalı. K Doğrulanmış rijitlik matrisini gösterirse, hareket denkleminde,

$$K\Phi = M_a \Phi \Delta \quad (3.143)$$

Burada $\Delta, (m, m)$ boyutlu köşegen ölçüm doğal frekans matrisidir. K 'nin simetrisi $\frac{1}{2}n(n+1)$ bağımsız sınır denklemini türetir.

$$K^T = K \quad (3.144)$$

Lagrange çarpanı metodu ile fonksiyon artışı en aza indirilmelidir:

$$j = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \left[\sum_{h,k=1}^n [N^{-1}]_{ih} ([K]_{hk} - [K_a]_{hk}) [N^{-1}]_{kj} \right]^2 + \sum_{i,j=1}^n \gamma_{k_{ij}} ([K]_{ij} - [K]_{ji})$$

$$+ 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{\Delta_{ij}} \sum_{h=1}^n ([K]_{ih} [\Phi]_{hj} - [M]_{ih} [\Phi]_{hj} \omega_{mj}^2) \quad (3.145)$$

Burada ω_{mj} j . ölçüm doğal frekansı ve $\gamma_{\Delta_{ij}}, \gamma_{k_{ij}}$ sırasıyla $\Gamma_{\Delta}, \Gamma_K$ Lagrange çarpanı matrislerinin elemanlarıdır.

(3.145) denkleminin (r, s) elemanlarına göre diferansiyeli alınırsa

$$M_a^{-1} (K - K_a) M_a^{-1} + 2\Gamma_{\Delta} \Phi^T + 2\Gamma_K = 0 \quad (3.146)$$

Γ_K 'nin eğri simetrisi ($\Gamma_K = -\Gamma_K$), (3.146) denkleminde Γ_K 'yi kaldırmak için kullanılıp bazı düzenlemeler yapılırsa K denklemi elde edilir:

$$K = K_a - M_a \Gamma_{\Delta} \Phi^T M_a - M_a \Phi \Gamma_{\Delta}^T M_a \quad (3.147)$$

Gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$K = K_a - K_a \Phi \Phi^T M_a - M_a \Phi \Phi^T K_a + M_a \Phi \Phi^T K \Phi \Phi^T M_a + M_a \Phi \Delta \Phi^T M_a \quad (3.148)$$

Tüm mod şekilleri ölçüldüğünde hesaplamalar limit durumunda gözden geçirilebilir. Bütün modlar ölçülmüşse bu şekilde Φ özdeğer vektörü için aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$M_a \Phi \Phi^T = \Phi^T M_a \Phi = \Phi \Phi^T M_a = I \quad (3.149)$$

Güncellenen rijitlik matrisi için ifade basitleştirilebilir.

$$K = M_a \Phi \Delta \Phi^T M_a = \Phi^{-1} \Delta \Phi^{-T} \quad (3.150)$$

(Berman, 1983) Baruch' un yukarıda gösterilen metoduna benzer bir metot kullanmıştır. Kütle matrisi, ölçüm modlarının ortogonallığını sağlamak için güncellenir. Yukarıda (3.149) denkleminin kullanarak rijitlik matrisi güncellenir.

Kütle matrisi için güncelleme problemi şöyle belirtilir: Φ_m ölçüm özdeğer matrisi ve M_a kütle matrisinin analitik yorumu verilir ve M güncellenen kütle matrisi en aza indirilerek bulunur:

$$J = \frac{1}{2} \left\| M_a^{-1/2} (M - M_a) M_a^{-1/2} \right\| \quad (3.151)$$

Ortogonal sınır:

$$\Phi_m^T M \Phi = I \quad (3.152)$$

Kütle matrisinin elemanları çok geniş olarak farklı büyüklüklere sahip olduğu için, güncellenen ve analitik kütle matrisleri arasındaki fark direkt olarak en aza indirilemez.

$$M_a^{-1} (M - M_a) M_a^{-1} + \Phi_m \Gamma \Phi_m^T = 0 \quad (3.153)$$

Burada Γ Lagrange çarpanı matrisidir. Bu denklem kütle ortogonalılığıyla birleştirilirse güncellenmiş kütle matrisi elde edilir.

$$M = M_a + M_a \Phi_m \overline{M_a^{-1}} (I - \overline{M_a}) \overline{M_a^{-1}} \Phi_m^T M_a \quad (3.154)$$

Burada $\overline{M_a} = \Phi_m^T M_a \Phi_m$, (m, m) boyutlu, sonlu eleman serbestlik derecesine göre artırılmış ölçüm modları ve analitik kütle matrisinden elde edilmiş genelleştirilmiş kütle matrisidir.

3.8.1.2. Lanczos Altküme Metodu

Özdeğer çıkarılması için Lanczos metodu, en az iterasyon sayısı ile sistemin özdeğerlerinin en az sayısını çıkarmada kullanılır.

Lanczos algoritması birkaç hesap basamağına ayrılır:

— Orijinal dinamik denklemi değiştirmek

$$([A] - \lambda[I])\Phi = 0, \lambda = 1/\omega^2 \quad (3.155)$$

Burada,

$$[K] \text{ rijitlik matrisi } [K] = [L][L]^T$$

$$\Phi \text{ kütle normlu özvektör } \Phi = ([L]^T)^{-1} \Psi$$

Ψ özvektör

$$[A] = [L]^{-1} [M] ([L]^T)^{-1}$$

— Lanczos ikili ortogonal metoduyla $[A]$ matrisinin üçlü köşegenleştirilmesi

$$[C] = [V]^T [A] \{V\} \quad (3.156)$$

$$[V]^T [V] = 1$$

Burada,

$[C]$ köşegen matris, $[V]$ (n, m) boyutlu ve $m < n$ olan matris (n toplam serbestlik derecesi). Φ 'nin yaklaşımından:

$$[\Phi] = [V][Y]$$

Problem şu şekilde çözülür:

$$([C] - \lambda[I])[\Phi] = 0 \quad (3.157)$$

— QR ayrışımıyla özdeğerleri çıkarmak,

$$[C] = [Q][R] \quad (3.158)$$

Burada,

$[Q]$ bir ortogonal matris, $[R]$ derecesi daha yüksek üçgen matristir.

Ters kuvvet metoduyla $[C]$ çıkarılıp, orijinal Ψ özvektörleri hesaplanır.

3.8.1.3. Modal Hessenberg Metodu

Modal Hessenberg metodu, karmaşık modları hesaplamada da kullanılabilen özdeğerleri çıkarmak için kullanılan çok hızlı bir yöntemdir. Sadece viskoz değil, ayrıca

yapısal sönüme de olanak verir. Bu metot, gerçek modların elde edilebilir olmasını gerektirir ve gerçek mod sayısından daha çok mod çıkartmamaktadır.

Lineer titreşimsiz bir sistemin hareket denkleminde:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (3.159)$$

Modal koordinatlara standart dönüşümden sonra (3.159) denklemi aşağıdaki şekli alır:

$$(-\omega^2[m] + i\omega[c] + [k])\{p\} = 0 \quad (3.160)$$

Yapısal sönümle:

$$(-\omega^2[m] + i\omega[c] + ([k] + i[d]))\{p\} = 0 \quad (3.161)$$

Burada:

$$[m] = [\Psi]^T [M] [\Psi] \quad \text{modal kütle matrisi}$$

$$[c] = [\Psi]^T [C] [\Psi] \quad \text{modal viskoz sönüm matrisi}$$

$$[k] = [\Psi]^T [K] [\Psi] \quad \text{modal rijitlik matrisi}$$

$$[\Psi]: \text{özvektör matrisi}$$

$$\{u\} = [\Psi]\{p\}: [\Psi] \text{ normal mod şekli matrisi ve } \{p\} \text{ modal koordinatlarıdır.}$$

(3.161) denklemi matris formunda yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} k + id & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i\omega \end{bmatrix} \{p\} + \begin{bmatrix} c & m \\ m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\omega \\ -\omega^2 \end{bmatrix} \{p\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.162)$$

(3.162) denklemi orjinal boyutlu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$[B]\{y\} = \lambda\{y\}$$

Burada λ kompleks özdeğerler ve

$$[B] = \begin{bmatrix} k + id & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c & m \\ m & 0 \end{bmatrix} \quad (3.163)$$

$$\{y\} = \begin{bmatrix} 1 \\ i\omega \end{bmatrix} \{p\} \quad (3.164)$$

Karmaşık özdeğerlerin çözümünden sonra, özfrenanslar aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$f = -i \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.165)$$

Modal veriyi kullanan özproblemin direkt metotları Lagrange çarpanı metodu ve kontrol teorisi metotları (Hankel matrisi, Kalman kazancı) ile Lanczos altküme metodu ve Modal Hessenberg metodu bu bölümde ele alınmıştır.

Metotlar ölçülmüş özdeğerleri ve mod şekillerini tam olarak türettiği için, 3.1 bölümündeki direkt metotlar geçerlidir. Bu metotlar bazen Lagrange çarpanı metodunun yapmadığını açıkça yaparak bir güncellenen sönüm matrisi hesaplar.

Modal veriyi kullanan metotların dört ana dezavantajı vardır: Geniş miktarda hesaplamaya gerek duyarlar (özellikle lineer olmayan optimizasyonda), bazı veya tüm girdi ve çıktı matrisleri belirlenmelidir, güncellenen matrisleri elde etmek için neyin en aza indirilmesi gerektiğiyle ilgili fiziksel bilgi yoktur, güncellenen matrislerin pozitif ve kesin olacağıyla ilgili bir garanti yoktur.

3.8.1.4. Kontrol Teorisi Metotları

Kontrol yöntemlerine dayalı güncellemede, özyapı eşlemesi ve kutup konumlama gibi kontrol yöntemleri sayısal model güncellemeye uygulanmaktadır. Yöntemde kalman kazanç matrisi tekrarlı olarak çözülmektedir ve başlangıç değerleri olarak güncellenmeden önceki değerler kabul edilmektedir. Burada amaç fonksiyonu simetrik olarak güncellenmiş bir sayısal modele ulaşmaktır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için deneysel modeldeki serbestlik derecelerini sayısal modele indirgeyen dönüşüm matrisleri oluşturulmuştur. Böylece mod açılımına gerek kalmamıştır. Yöntemin amaç fonksiyonu, yer değiştirme değerlerini ve hız değerlerinin türev terimlerini içermektedir. Amaç fonksiyonu türev terimlerini içerdiğinden, fonksiyonun oluşturulması göreceli olarak zordur ve uygulaması pratikte uzmanlık gerektirmektedir. Metodun detayları 3.6.1. başlığı altındaki “kara kutu modelinin tanımlanması” içeriğinde anlatılmıştır.

3.8.2. Tekrarlı Metotlar

Tüm güncelleme tekniklerinde olduğu gibi, iterasyon metotlarının amacı, modal veriyi kullanarak ölçüm verisi ve analitik model arasındaki korelasyonu geliştirmektir. Mod şekli ve özdeğer verisini gerektiren bir “penaltı” fonksiyonu tarafından belirlenen korelasyonda, genellikle tahmin edilen ve ölçülen özdeğerler arasındaki farkın kareleri toplamı kullanılır. Bu penaltı fonksiyonunun yapısından dolayı, çözüm problemin yinelemeli olarak lineerleştirilmesi ve optimize edilmesini gerektirir. Bu metotlar, güncellenecek parametrelerin geniş ölçüde seçilmesine ve ölçüm verisi ile başlangıç analitik parametrelerinin her ikisinin de ağırlıklı olarak yorumlanmasına imkan verir.

Penaltı fonksiyonları, genelde parametrelerin lineer olmayan fonksiyonlarıdır ve bu yüzden, olası ilgili yaklaşım problemleriyle bir yinelenen işleyiş gerekir. Ayrıca her yinelemede analitik modal verinin değerlendirilmesi için bir yinelenen şema gerekir. Ard arda gelen iterasyonlar arasındaki parametrelerdeki değişim küçükse, modal verinin daha iyi bir yorumuna erişilir.

Bu bölüm, yalnızca modal model verisiyle ilgilidir. Özdeğerlerin ölçümleri (doğal frekanslara ve sönüm oranlarına karşılık) ve mod şekillerinin deneylerden elde edildiği kabul edilir. Bu ölçülen özellikler, bir ölçüm vektöründe toplanabilir. Sonlu eleman modelinde hiç sönüm yoksa bu vektör aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$z_m^T = (\lambda_{m1}, \Phi_{m1}^T, \lambda_{m2}, \dots, \lambda_{mr}, \Phi_{mr}^T)^T \quad (3.166)$$

Burada λ_{mi} , ölçülen i . özdeğer (doğal frekans kareli) ve Φ_{mi} ilgili gerçek mod şeklidir. Analitik modelde, ölçüm özelliklerine karşılık özdeğerler ve mod şekli vektörleri bir “tahmin edilmiş” z ölçüm vektörü içinde kabul edilebilir:

$$z^T = (\lambda_1, \Phi_1^T, \lambda_2, \dots, \lambda_r, \Phi_r^T)^T \quad (3.167)$$

z formu, özdeğerler ve mod şekilleri sayısının eşit olmasını önerse de, bu gerekli değildir. Örneğin z genelde sadece doğal frekansları içermesine rağmen, mod şekli bilgisi gerekirse içerilir.

Ölçüm verisi ve uygun analitik yorumlarla ilgili üç önemli problemle karşılaşılır. Birincisi, deneysel ve teorik verideki doğal frekanslar ve mod şekilleri aynı modla ilgili olmalıdır. İki mod birbirine yakın olduğu zaman frekansları artış sırasına göre düzenlemek yeterli değildir. Örneğin, doğru olmayan parametre yorumları yüzünden, en düşük frekanslı analitik mod, yapının eğilme modu olabilir fakat en düşük frekansla ölçülen mod burulma modu olabilir. Mod eşleşmesinde diğer bir problem, tüm deneysel modların doğru olarak ölçülememesidir. Çünkü genelde kuvvet etkisi veya algılayıcı, belirli bir modun bir düğümüne yakın yerleştirilir. Mod şekli eşleşmesi, modal güvenlik kriterini (MGK) kullanarak kolayca çözülebilir. Deneysel ve analitik mod arasındaki MGK 1' e yakınsa, modların bu eşleşmesi güncelleme algoritmasında güvenle kullanılabilir. Yeterli güvenle eşleşmeyen her mod, güncelleme algoritmasında kullanılmamaktadır.

MGK matrisi global mod şekli korelasyonunda kullanılır. Modal güvence kriteri (MGK), iki mod şekli arasındaki açının karesel kosinüsünün bir ölçüsüdür. Analitik ve deneysel mod şekli arasındaki ilişkiyi karakterize eden MGK matrisini hesaplamak için (3.123) denklemini kullanılır.

Analitik ve test modlarının tüm mümkün kombinasyonları arasındaki MGK, MGK matrisinde biriktirilir.

MGK matrisinin köşegen dışı kısımları, modlar arasındaki lineer bağımsızlığın kontrolünü sağlar. 1' e eşit değerdeki iki mod şekli, özdeş modları (tam kombinasyon) gösterir. MGK değerleri sayısal çarpımlardan ve deneysel olarak elde edilen modal yerdeğişirmelerden hesaplanır.

Deneysel ve analitik veri karşılaştırmada ikinci problem, mod şekli ölçeklendirmedir. Sonlu eleman modelindeki kütle dağılımı ve gerçek yapının farklı olabilmesinden dolayı, mod şekilleri sürekli ölçeklendirilmeyebilir.

Sonlu eleman modelindeki kütle dağılımı ve gerçek yapının farklı olabilmesinden dolayı, mod şekilleri sürekli ölçeklendirilmeyebilir. Modal ölçek faktörü kullanılarak (MÖF), ölçüm mod şekli analitik mod şekliyle çarpılarak ölçeklendirilebilir (Allemang, 1982).

Üçüncü problem, sönümle ilgilidir. Sonlu eleman modelinde sönüm mevcut değilse, ölçüm doğal frekansları (3.166) ve (3.167) denklemlerindeki ölçüm ve tahmin edilmiş tepkilere dahildir. Bu durumda λ_i terimleri, doğal frekans kareleriyle gösterilir ve gerçek modlar, ölçüm karmaşık modlarına göre yorumlanabilir.

4. BULGULAR

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

4.1. Betonarme Binanın Deneysel İnceleme Sistemi ile İncelenmesi

4.1.1. Binanın Özellikleri

Bina, betonarme çerçeve taşıyıcı sistemli olarak bodrum+10 kat şeklinde 2000 yılında yapılmıştır. Binada A1, B2, B3 düzensizlikleri mevcuttur. Bina 12.75 x 29.4 m boyutlarındadır. Bodrum katın yüksekliği 2.75 m, zemin katın (1.katın) yüksekliği 3 m, galeri katın yüksekliği 2.5 m ve diğer katların yükseklikleri 2.75 m' dir. Döşemeler asmolen (nervürlü) tiptedir (6.25 KN/m²), duvarlar 0.15 m kalınlıkta gaz beton blok elemandır (2.0 KN/m), deney yapılan binada yapı elamanlarının üzerinde sıva bulunmamaktadır. Bina temeli, her iki yönde sürekli kirişli ve 40 cm kalınlığında radye plaktan oluşmaktadır. Bina ölü yükleri uygun şekilde alınmıştır. Hareketli yük bina faaliyete geçmediği için göz önüne alınmamıştır. Binada bulunan perde elemanlar 4 düğümlü membran sonlu eleman olarak sistemde modellenmiştir. Katlar rijit diyafraim olarak kabul edilmiştir. Binanın kütle ve rijitlik merkezi katlara bağlı şekilde aşağıda gösterilmiştir.

Betonarme elastisite modülü (dönüştürülmüş-eşdeğer*) $E = 34000 \text{ MPa} = 3.4 \cdot 10^7 \text{ KPa}$

Betonarme birim hacim ağırlığı $\rho = 25 \text{ KN/m}^3$

Beton Poisson oranı $\mu = 0.2$

Çelik çekme dayanımı

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa} = 20000 \text{ KPa}$$

Çelik akma dayanımı

$$f_{yk} = 420 \text{ MPa} = 420000 \text{ KPa}$$

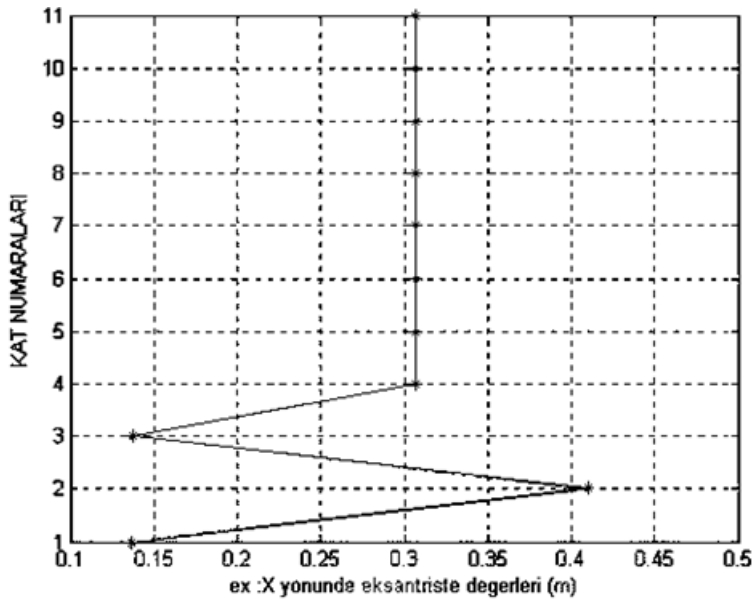
alınmıştır. Not* : $E_{eş} = E_b + \rho E_ç$ (Odabaşı, 1997)

Burada E_b : Beton elastisite modülü

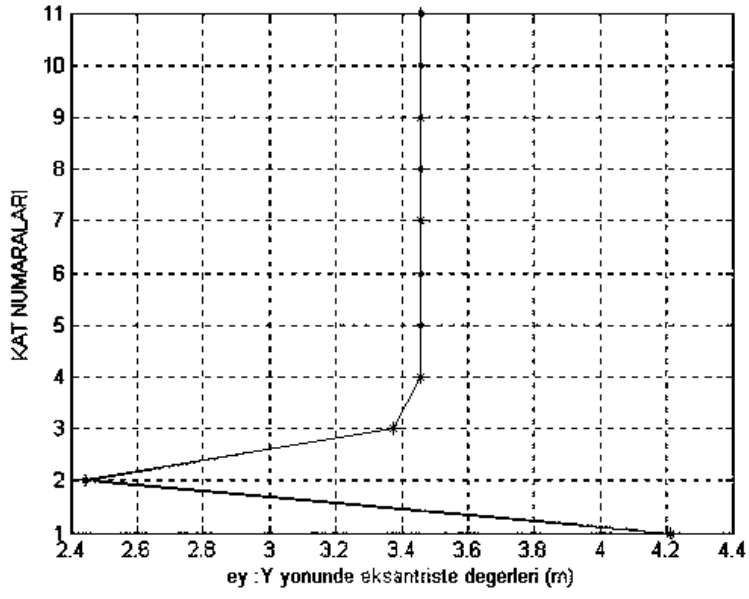
ρ : Donatı oranı (pursantaj)

$E_ç$: Çelik elastisite modülü

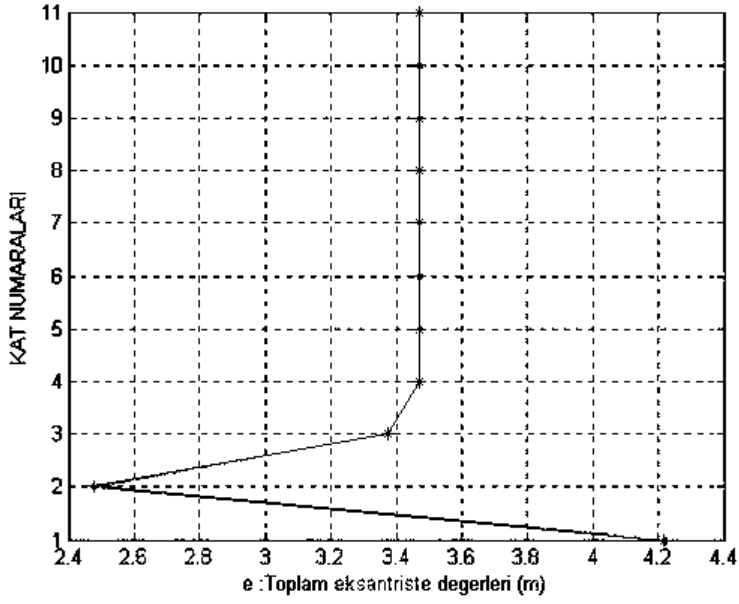
$E_{eş}$: Dönüştürülmüş-eşdeğer elastisite modülü



Şekil 4.1. X yönünde eksantrisitenin katlara göre dağılımı



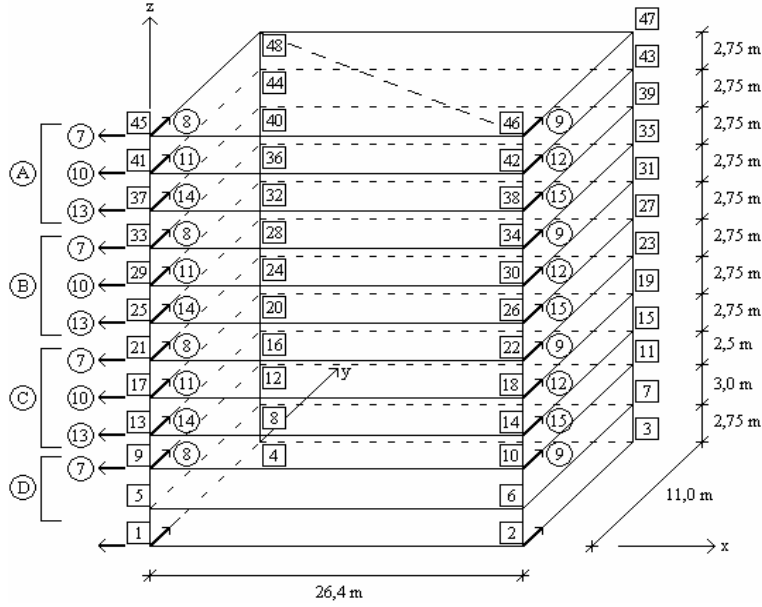
Şekil 4.2. Y yönünde eksantrisitenin katlara göre dağılımı



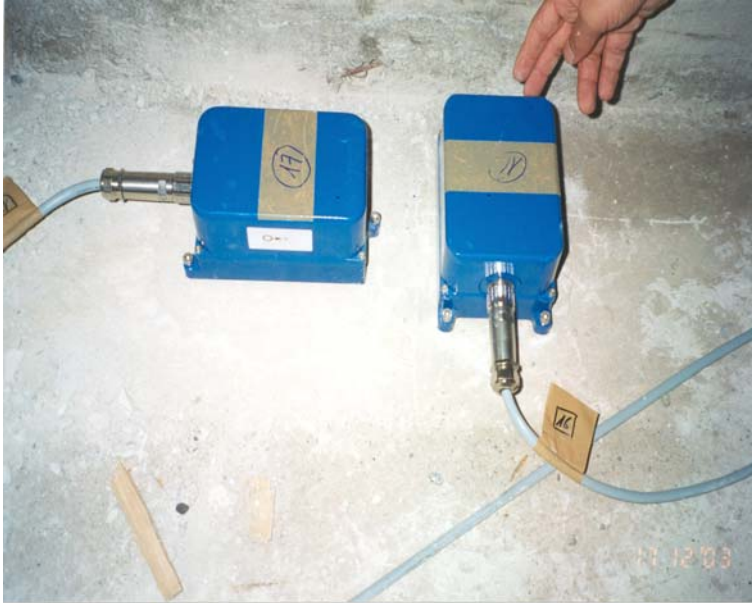
Şekil 4.3. Toplam eksantrisitenin katlara göre dağılımı

4.1.2. Deneysel Ölçüm ve Sonuçları

Şekil 4.4.' te gösterilmiş düzene göre ölçüm yapılmıştır. Bir adet sismometre binanın temel tabanına yerleştirilmiş, diğer bir sismometre ise binanın dışında mikrotremor ölçümlerini kayıt etmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.4.a. Binaya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni (1)



Şekil 4.4.b. Binaya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni (2)



Şekil 4.4.c. Binaya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni (3)

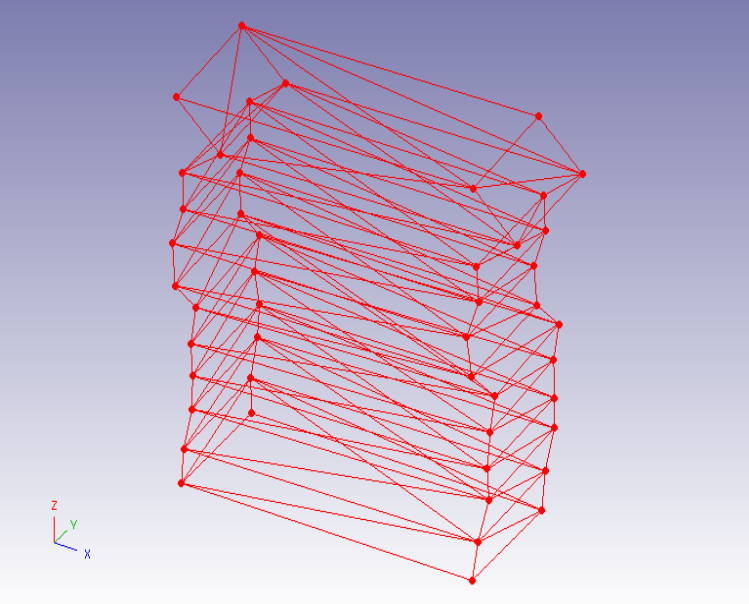


Şekil 4.4.d. Binada ölçüm yapılışı (1)

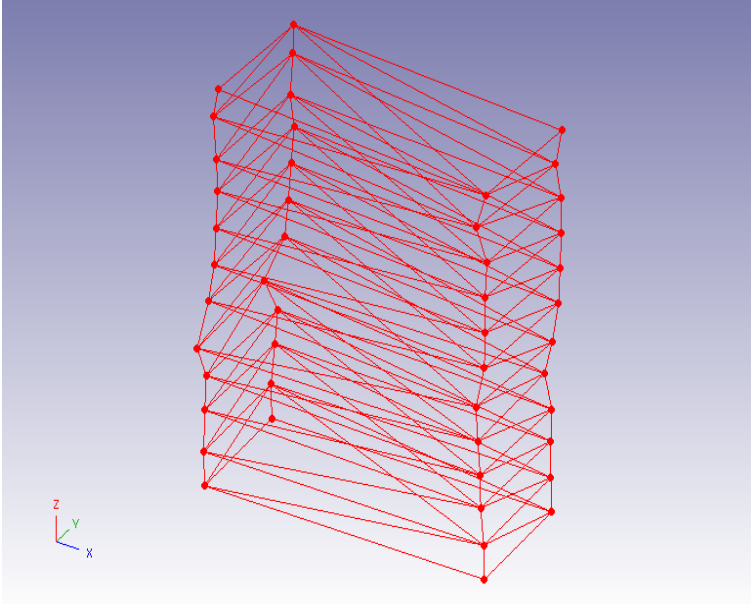


Şekil 4.4.e. Binada ölçüm yapılışı (2)

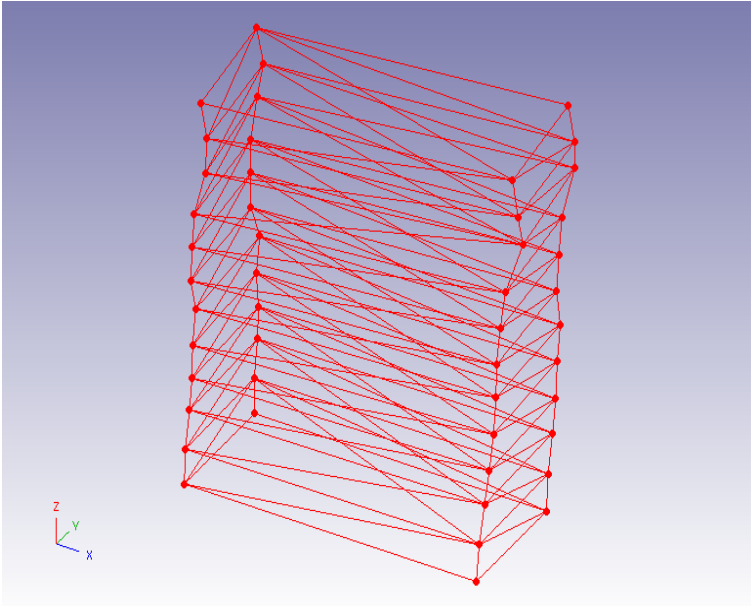
Binanın deneysel modelinden mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenir.



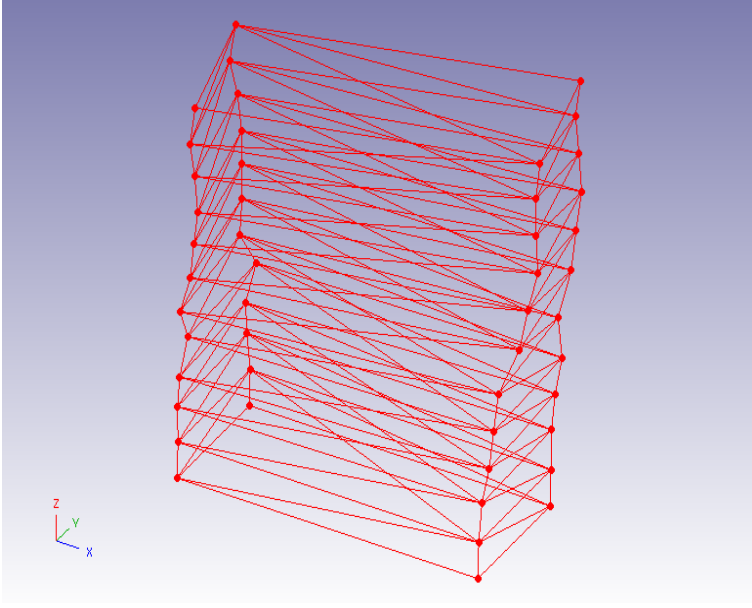
Şekil 4.5. DM 1. mod şekli



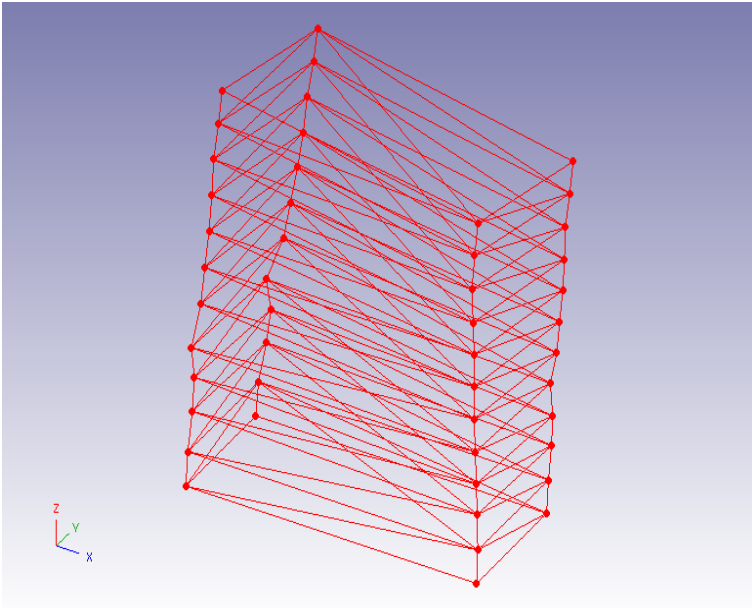
Şekil 4.6. DM 2. mod şekli



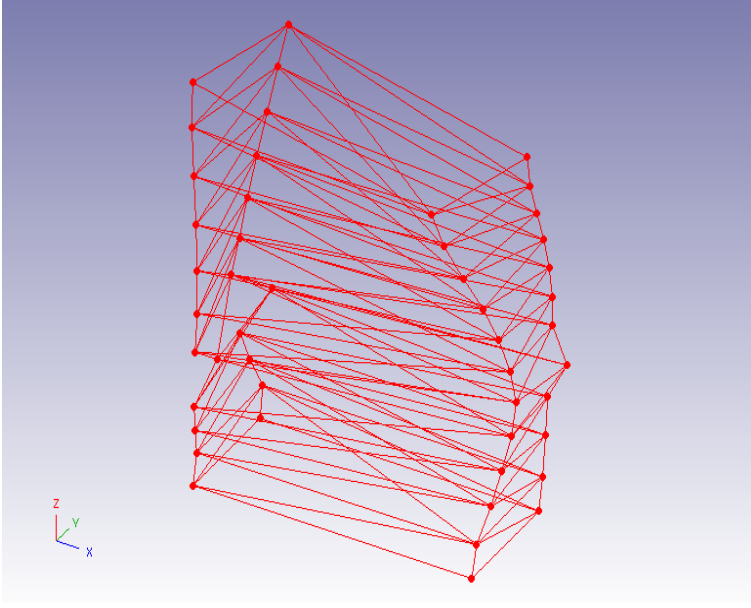
Şekil 4.7. DM 3. mod şekli



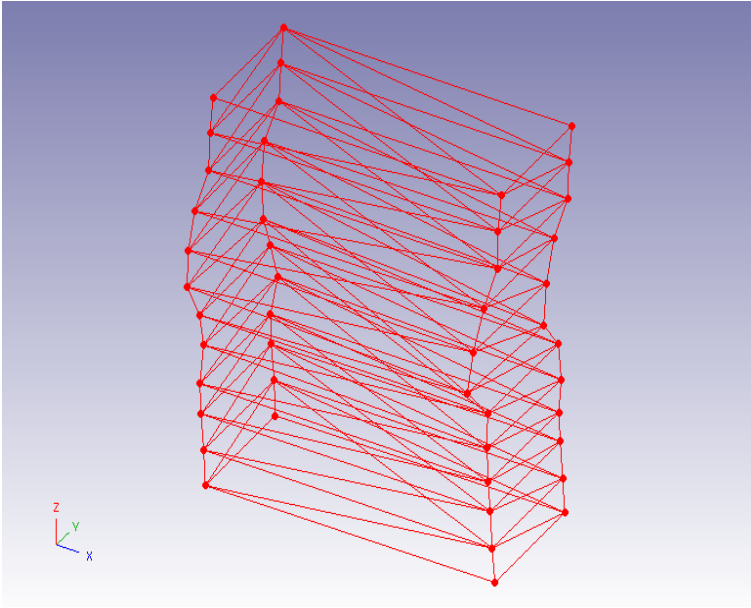
Şekil 4.8. DM 4. mod şekli



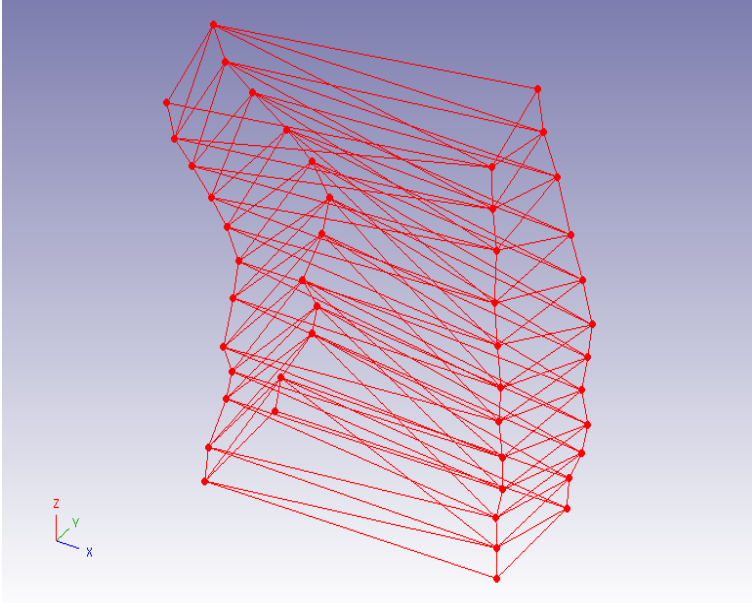
Şekil 4.9. DM 5. mod şekli



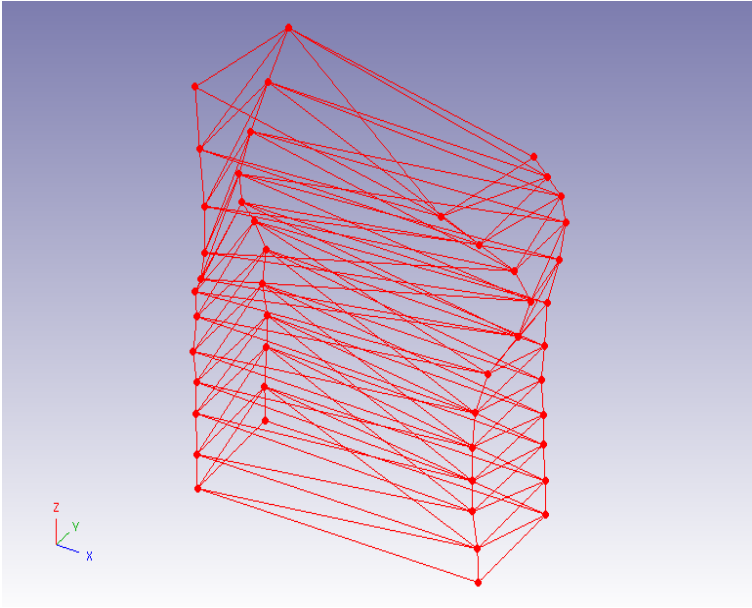
Şekil 4.10. DM 6. mod şekli



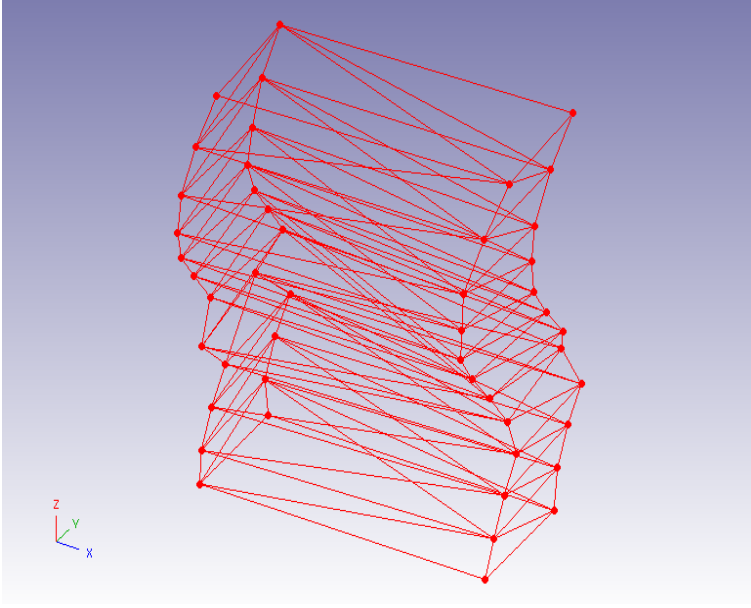
Şekil 4.11. DM 7. mod şekli



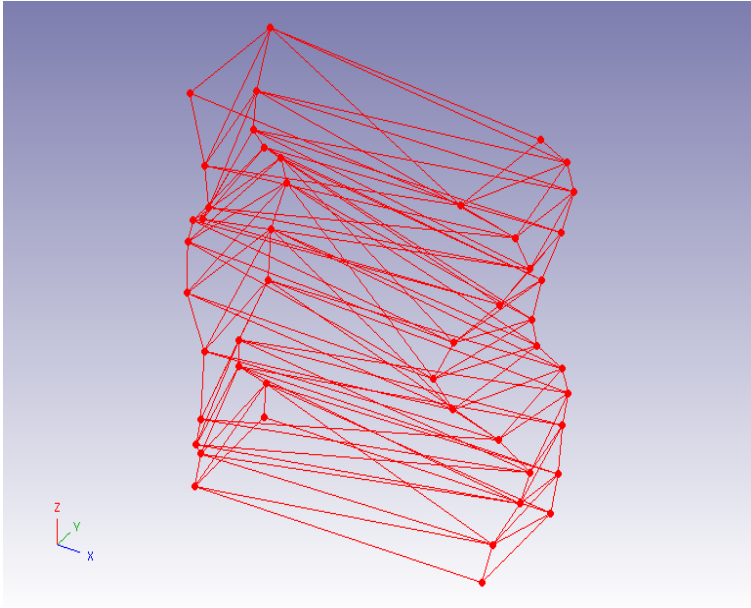
Şekil 4.12. DM 8. mod şekli



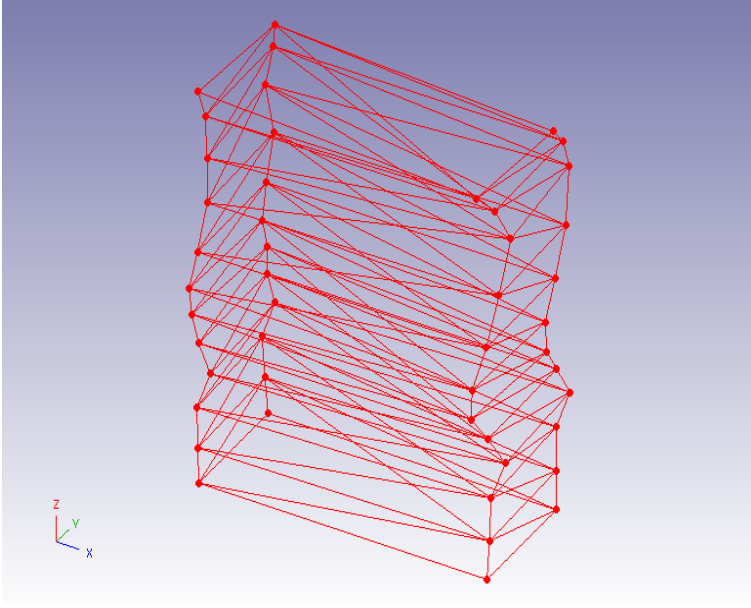
Şekil 4.13. DM 9. mod şekli



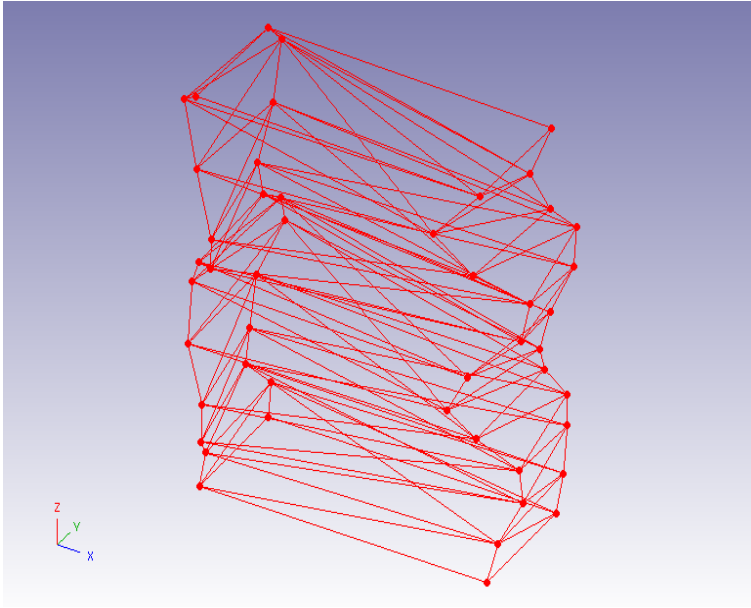
Şekil 4.14. DM 10. mod şekli



Şekil 4.15. DM 11. mod şekli



Şekil 4.16. DM 12. mod şekli



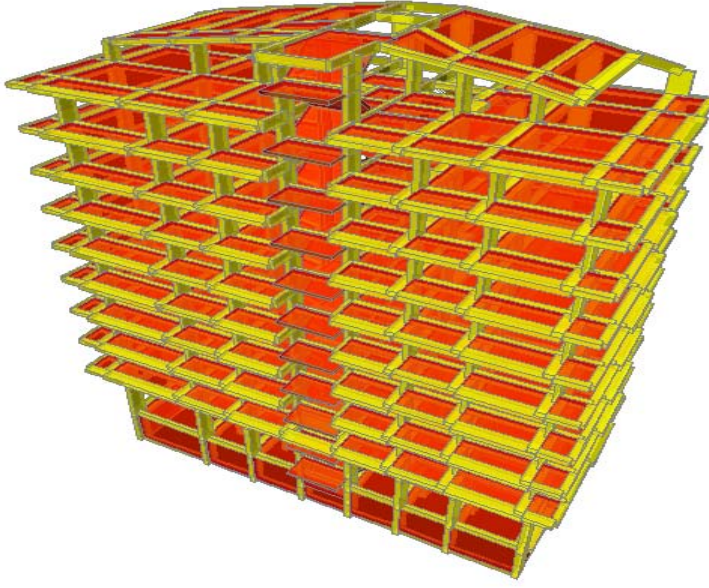
Şekil 4.17. DM 13. mod şekli

Çizelge 4.1. Deneysel modelin doğal titreşim periyotları

| Mod Şekli | Periyot (sn) |
|------------------|---------------------|
| 1 | 1.0454 |
| 2 | 0.8345 |
| 3 | 0.8103 |
| 4 | 0.7932 |
| 5 | 0.5349 |
| 6 | 0.2470 |
| 7 | 0.2089 |
| 8 | 0.1487 |
| 9 | 0.1356 |
| 10 | 0.1078 |
| 11 | 0.0924 |
| 12 | 0.0757 |
| 13 | 0.0691 |

4.1.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz Sonuçları

Bina materyal ve metot kısmında detaylı olarak anlatılmış sonlu elemanlar metodu ile modellenerek mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenmiştir. Binanın sonlu elemanlar modelinde; 752 adet düğüm noktası, 1364 adet çubuk eleman, 469 adet membran– kabuk eleman bulunmaktadır. Çubuk elemanlar 28 farklı kesite, plak elemanlar 4 farklı kesite, membran elemanlar ise tek kesite sahiptir.



Şekil 4.18. Binanın sonlu eleman modeli

Çizelge 4.2. Sonlu eleman modelinin doğal titreşim periyotları

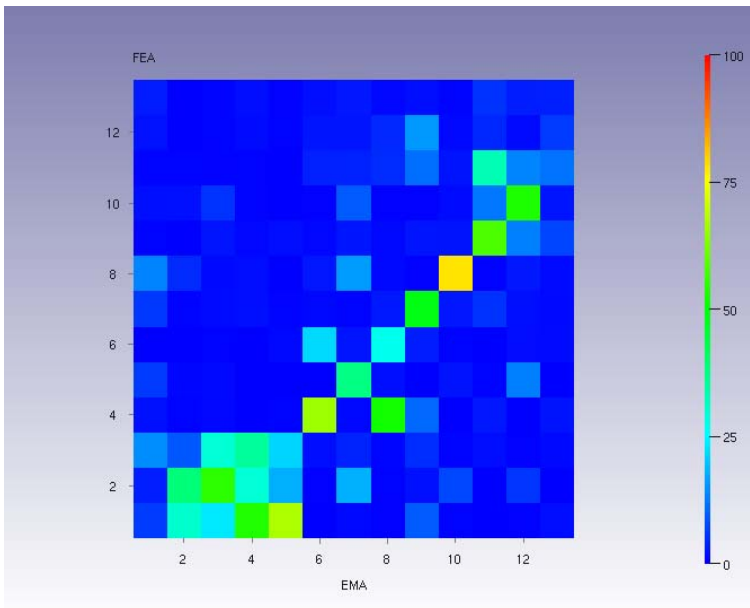
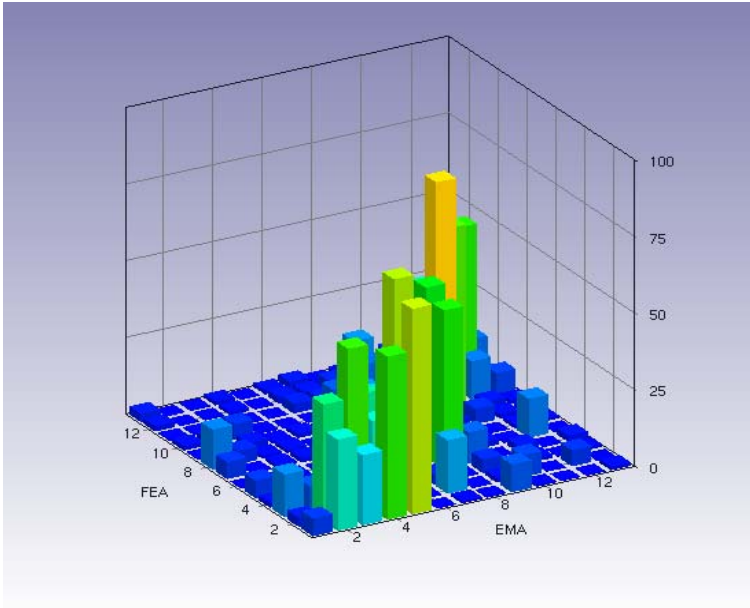
| Mod Şekli | Periyot (sn) |
|-----------|--------------|
| 1 | 0.9541 |
| 2 | 0.9301 |
| 3 | 0.5881 |
| 4 | 0.3057 |
| 5 | 0.2903 |
| 6 | 0.1870 |
| 7 | 0.1749 |
| 8 | 0.1683 |
| 9 | 0.1221 |
| 10 | 0.1138 |
| 11 | 0.1109 |
| 12 | 0.1049 |
| 13 | 0.0999 |

(3.123) formülüne göre Modal güvence kriteri (MGK) matrisi oluşturulur.

$$MGK(\psi_{sem}, \psi_{dm}) = \frac{|\{\psi_{sem}\}^T \{\psi_{dm}\}|^2}{(\{\psi_{sem}\}^T \{\psi_{sem}\})(\{\psi_{dm}\}^T \{\psi_{dm}\})}$$

Mod şekli eşleşmesi, modal güvence kriterini (MGK) kullanarak kolayca yapılabilir.

Deneysel ve sayısal mod arasındaki MGK değeri 1'e yakınsa, modların bu eşleşmesi güncelleme algoritmasında güvenle kullanılabilir. Yeterli güvenle eşleşmeyen her mod, güncelleme algoritmasında kullanılmaz. MGK matrisi global mod şekli korelasyonunda kullanılır. Modal güvence kriteri (MGK) iki mod şekli arasındaki açının karesel kosinüsünün bir ölçüsüdür. MGK matrisinin köşegen haricindeki elemanları, modlar arasındaki lineer bağımsızlığın kontrolünü sağlar. MGK değerinin "1" olması iki mod şeklinin özdeş modlar (tam birleşim) olduğunu gösterir.

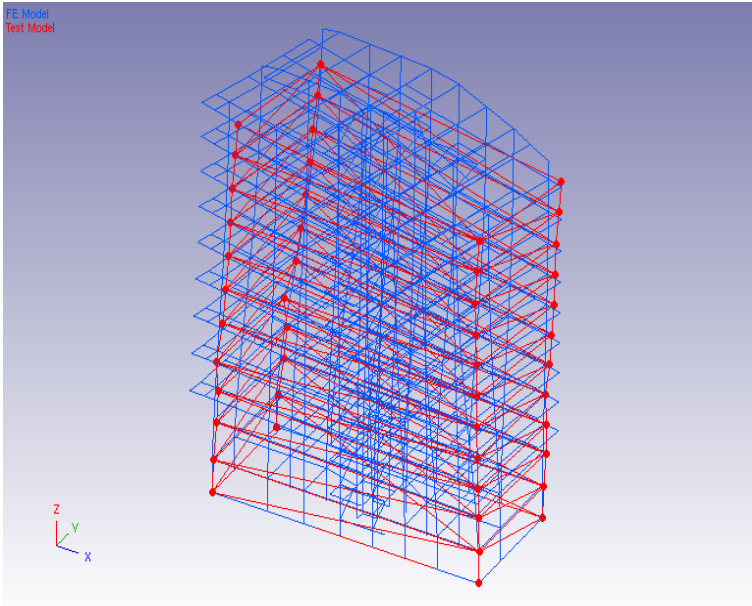


Şekil 4.19. Güncelleştirme öncesi MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

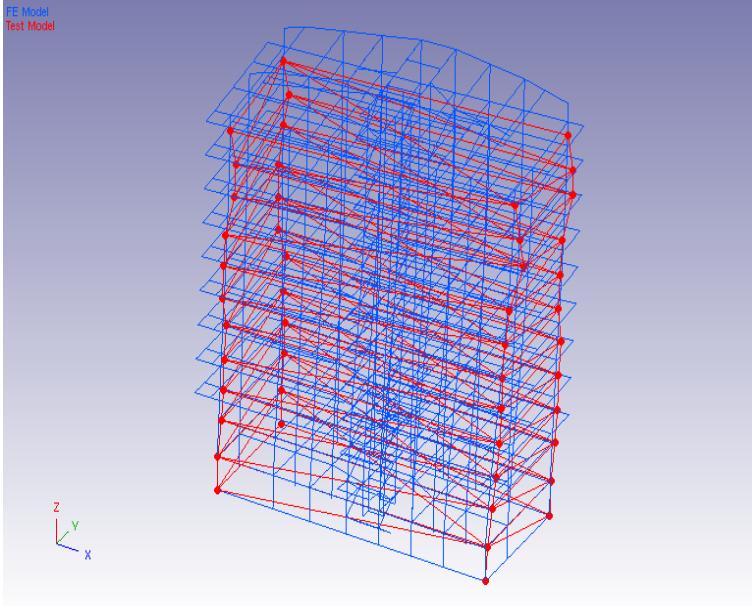
Şekil 4.19’ da mevcut bina için bulunmuş MGK matrisinin 3-boyutlu ve düzlem grafiksel şekilleri verilmiştir. Sayısal modele ait modlar (FEA) ile deneysel modele ait modlar (EMA) % olarak karşılaştırılmıştır. Burada özdeş mod olması durumu 100 ile gösterilmektedir. Sayısal ve deneysel modların MGK matrisinin köşegeninde yoğunlaştığı görülmektedir. MGK değeri en fazla sayısal modelin 8. mod şekli ile deneysel modelin 10. mod şekli arasında çıkmıştır.

Deneysel model ile sonlu eleman modelinin mod şekilleri eşleştirilir (sadece yapısal titreşim modları dikkate alınmıştır).

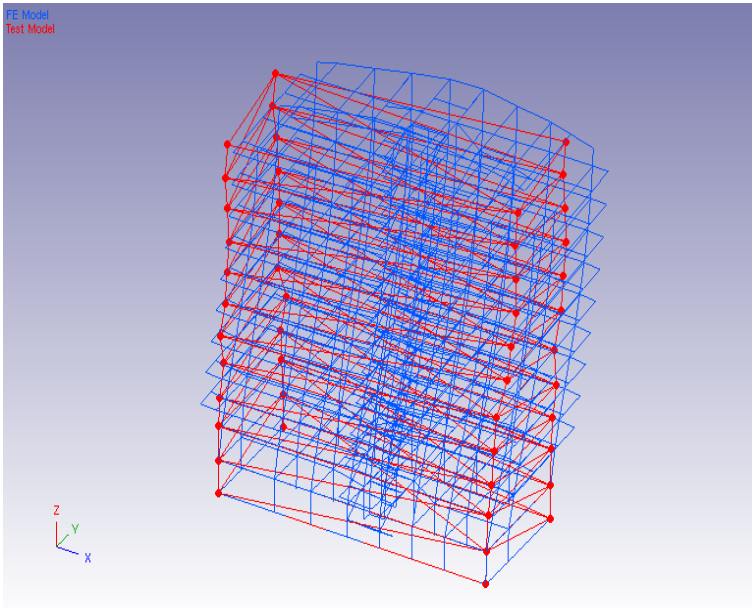
Mavi renkle gösterilen SEM, kırmızı renkle gösterilen DM’ dir.



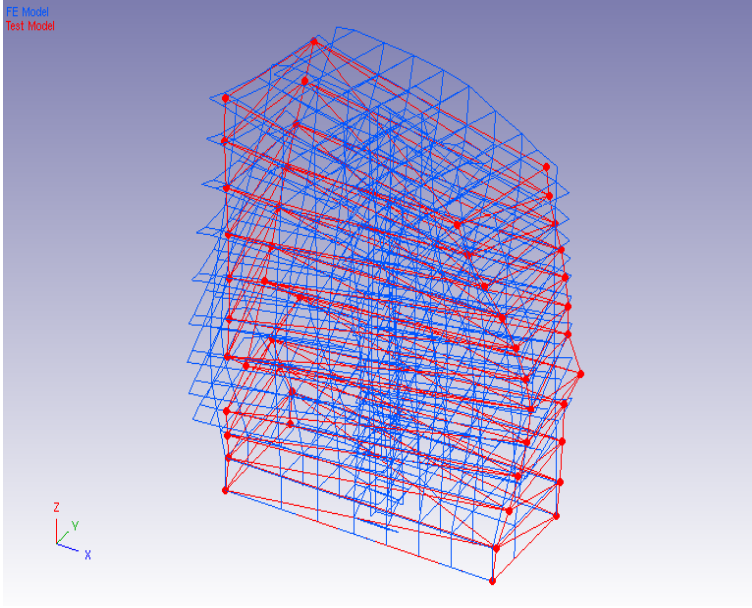
Şekil 4.20. Eşleşme-1 SEM1-DM5



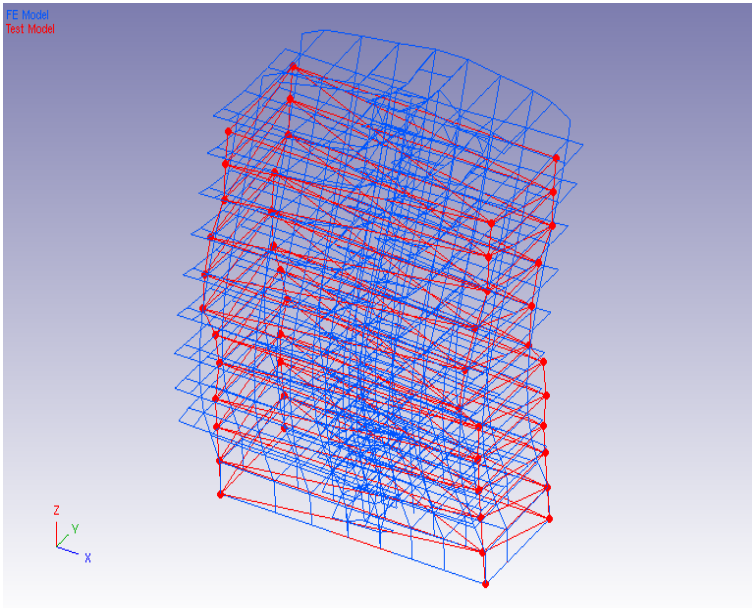
Şekil 4.21. Eşleşme-2 SEM2-DM3



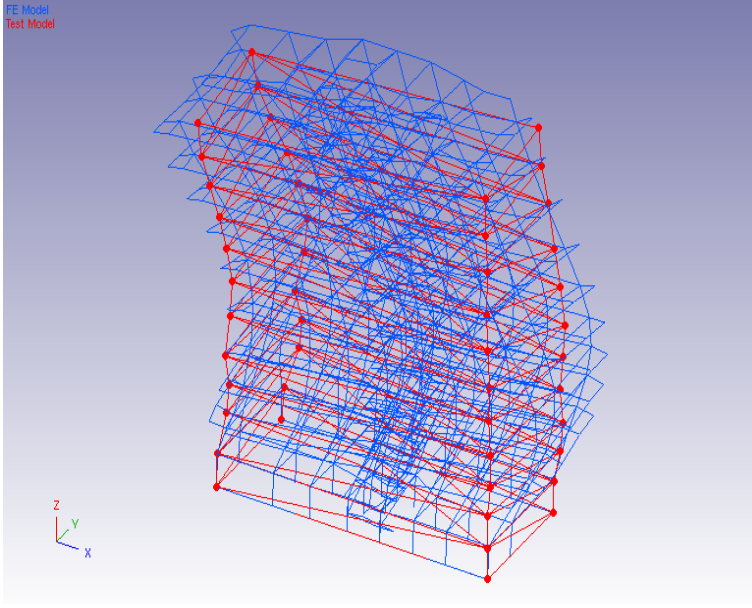
Şekil 4.22. Eşleşme-3 SEM3-DM4



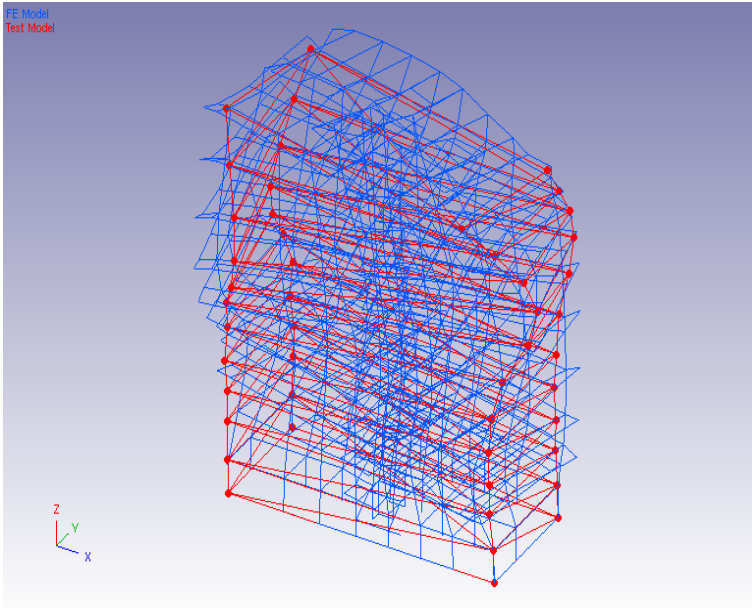
Şekil 4.23. Eşleşme-4 SEM4-DM6



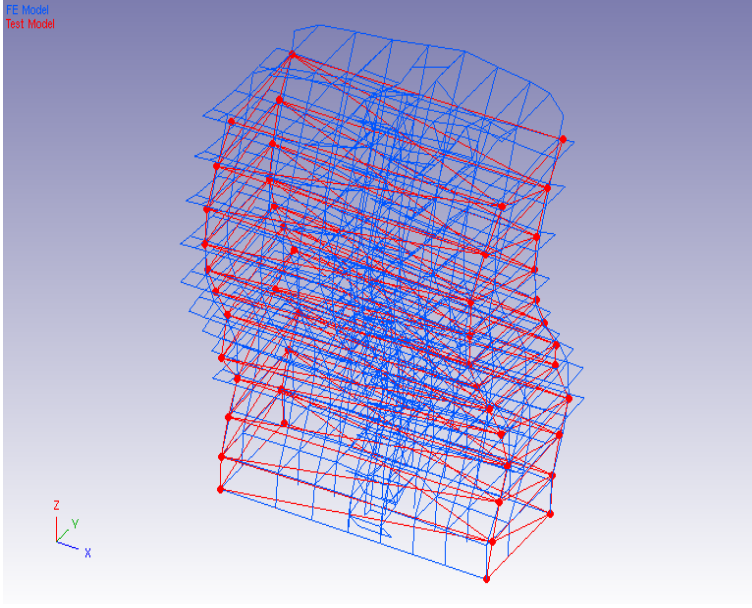
Şekil 4.24. Eşleşme-5 SEM5-DM7



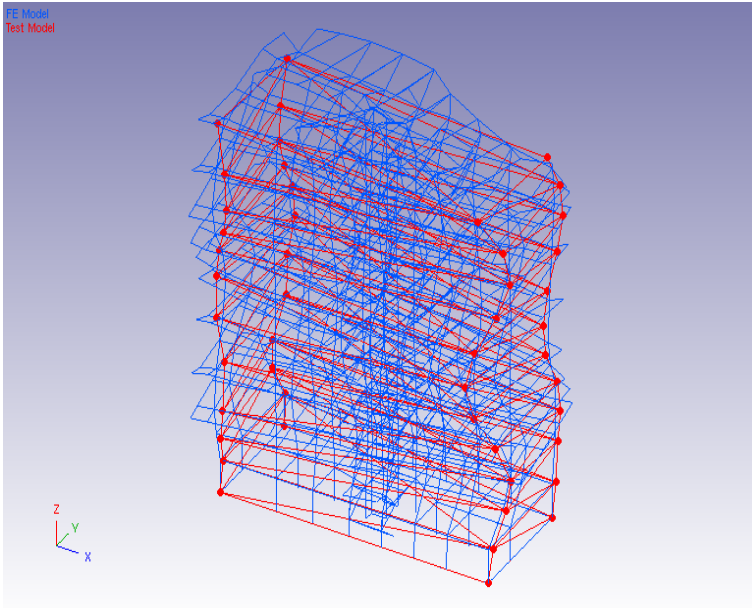
Şekil 4.25. Eşleşme-6 SEM6-DM8



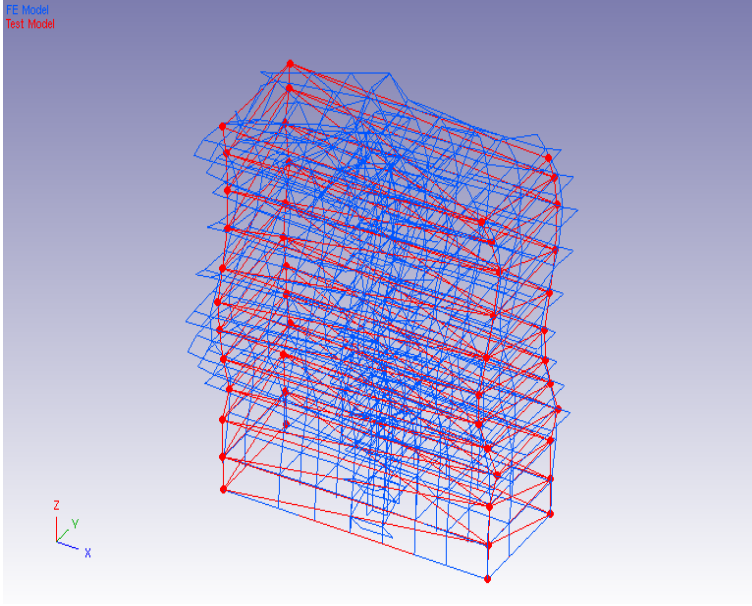
Şekil 4.26. Eşleşme-7 SEM7-DM9



Şekil 4.27. Eşleşme-8 SEM8-DM10



Şekil 4.28. Eşleşme-9 SEM9-DM11



Şekil 4.29. Eşleşme-10 SEM10-DM12

Çizelge 4.3. Güncelleştirme öncesi MGK matrisi değerleri

| SEM | Hz | DM | Hz | Fark | MGK |
|-----|------|----|-------|--------|------|
| 1 | 1.05 | 5 | 1.87 | -43.93 | 67.0 |
| 2 | 1.08 | 3 | 1.23 | -12.88 | 54.4 |
| 3 | 1.70 | 4 | 1.26 | 34.88 | 34.7 |
| 4 | 3.27 | 6 | 4.05 | -19.20 | 65.5 |
| 5 | 3.44 | 7 | 4.79 | -28.06 | 37.2 |
| 6 | 5.35 | 8 | 6.73 | -20.46 | 26.7 |
| 7 | 5.72 | 9 | 7.37 | -22.48 | 48.1 |
| 8 | 5.94 | 10 | 9.27 | -35.92 | 77.5 |
| 9 | 8.19 | 11 | 10.82 | -24.34 | 57.5 |
| 10 | 8.79 | 12 | 13.21 | -33.49 | 52.9 |

Binanın sayısal (SEM) ile deneysel modelinin (DM) tepki karşılaştırması için binanın doğal titreşim mod şekilleri, periyotları ve sönüm oranları seçilir.

Korelasyon analizi yapılır. Bu analiz, analitik ve deneysel olarak elde edilen modal parametreler arasındaki benzerlik ve farklılıkları nicelik ve nitelik olarak inceler. Kısaca, korelasyon analizinde analitik ve deneysel olarak elde edilen tepkiler analiz edilir.

Güncelleme için parametre seçimi yapılır. Ele alınan binada üç çeşit güncelleme yapılmıştır. Bu güncellemelerde parametre olarak sırasıyla betonarme elastisite modülü

(E), betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ve betonarme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı birlikte ($E + \rho$) seçilmiştir.

4.1.4. Betonarme Elastisite Modülü (E) Parametresine Göre Güncelleme

Tüm elemanlar için parametre olarak öncelikle betonarme elastisite modülü (E) seçilir. Betonarme elastisite modülü için güncelleme aralığı belirlenir. Güncelleme aralığı dönüştürülmüş-eşdeğer elastisite modülü hesaplanarak bulunur:

$$E_{eş} = E_b + \rho E_ç$$

Burada E_b : Beton elastisite modülü

ρ : Donatı oranı (pursantaj)

$E_ç$: Çelik elastisite modülü (Odabaşı, 1997)

$E_{eş}$: Dönüştürülmüş-eşdeğer elastisite modülü

ρ minimum değer olarak 0.01 alınmıştır, E_b BS20' ye göre alınır;

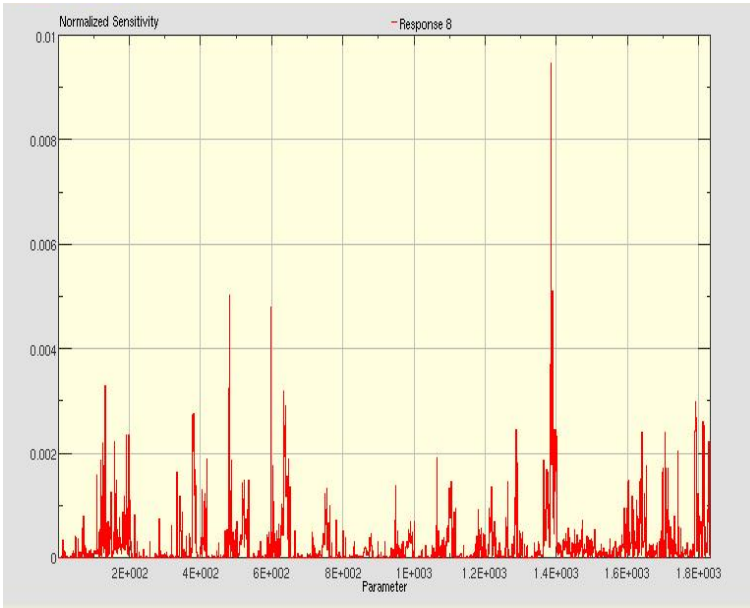
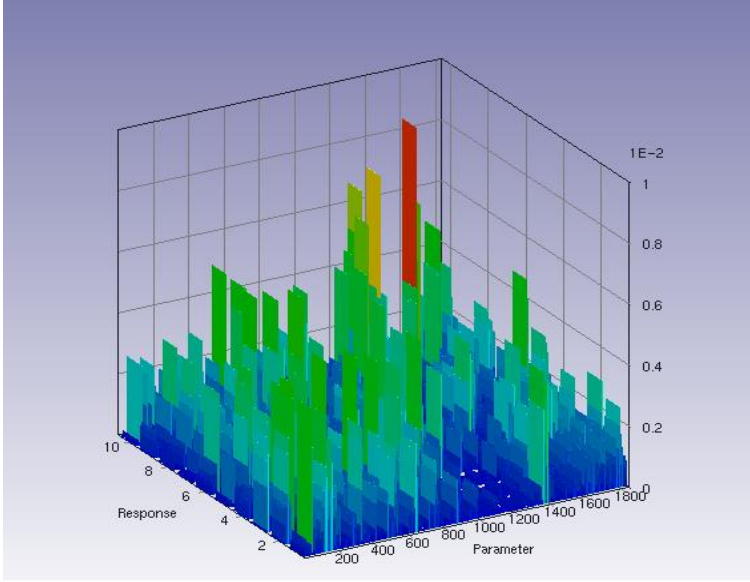
$$E_{eş} = 28 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2 + 0.01 \times 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

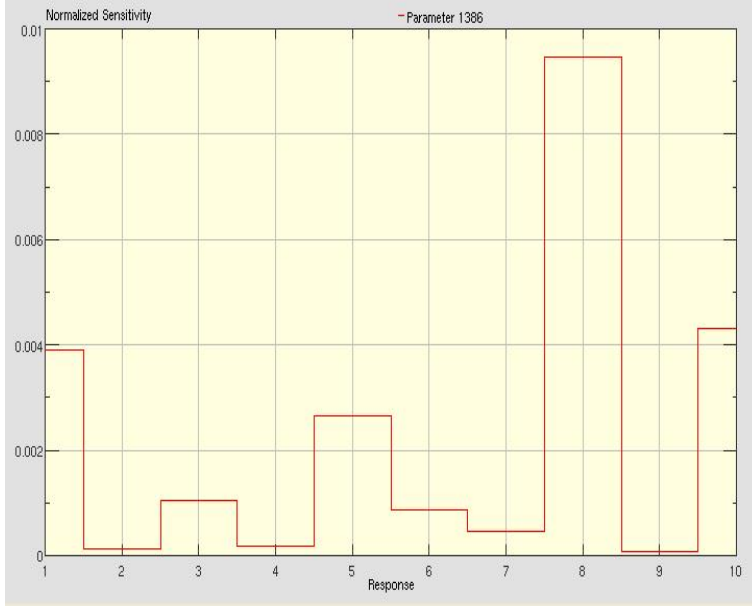
$$E_{eş} = 30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

Çizelge 4.4. Betonarme elastisite modülünün (E) güncelleştirme aralığı

| Eleman Türü | Güncelleştirme Aralığı (N/m ²) | Değişim Yüzdesi (%) |
|--------------------------------|---|------------------------|
| Tüm kat kirişleri | 30·10 ⁹ – 34·10 ⁹ | -11.7647 |
| Tüm kat kolonları | | |
| Tüm kat merdiven döşemeleri | | |
| Tüm kat döşemeleri | | |

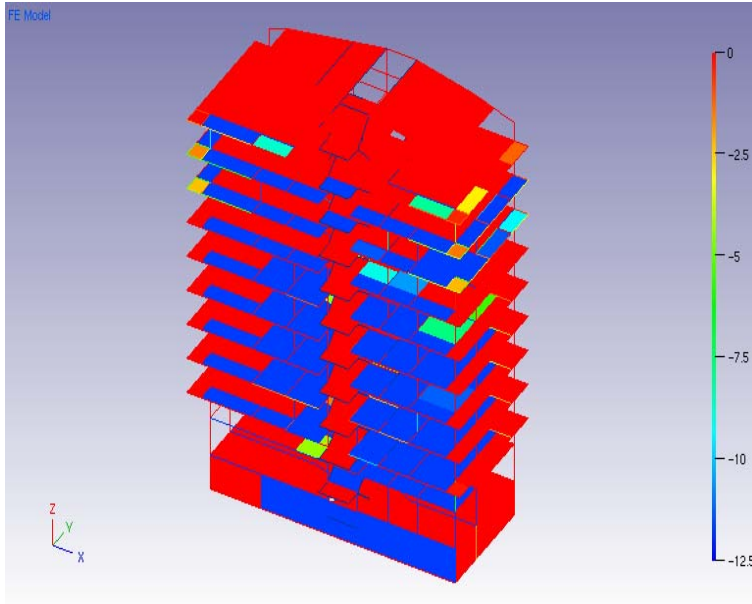
Seçilen parametreye göre hassaslık analizi yapılır. Hassaslık analizi neticesinde binanın elemanlarındaki parametre değişimleri ve hassas bölgeleri belirlenir.





Şekil 4.30. Bina elemanlarının betonarme elastisite modülü (E) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

Şekil 4.30' da görüldüğü gibi hassaslığa ait maksimum değer 8. mod eşleşmesinde $Z = 11.00 - 13.75$ m kotları arasındaki 1556 no' lu perde elemana aittir. Seçilmiş olan parametreye göre sonlu eleman modeli güncellenir.



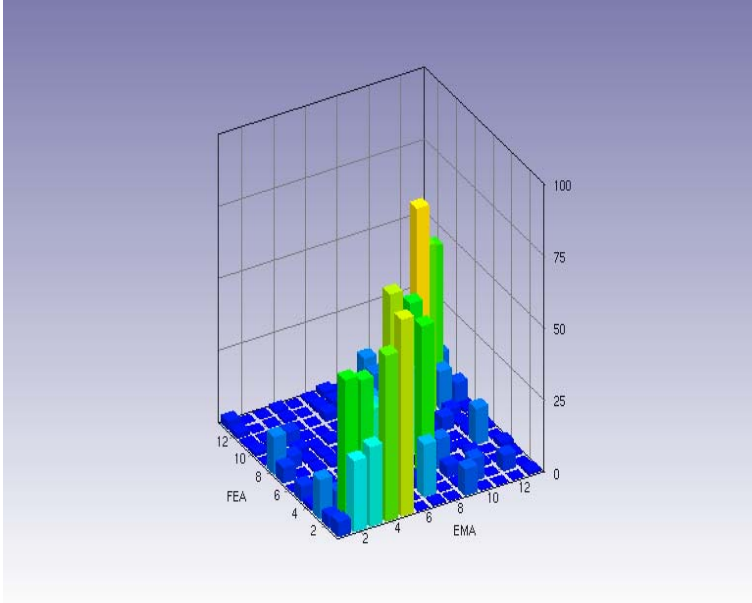
Şekil 4.31. Güncelleştirme sonrası betonarme elastisite modülü (E) değişimi

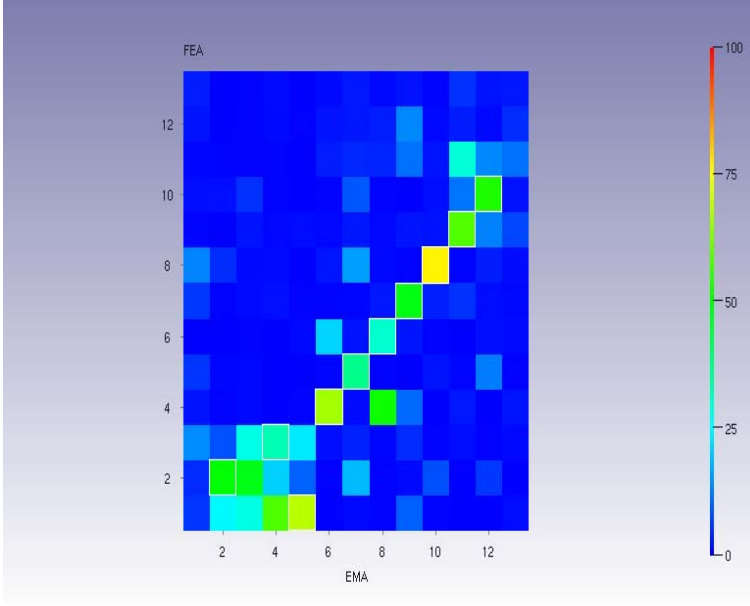
Şekil 4.31' te güncelleştirme sonrası betonarme elastisite modülünün elemanlardaki değişimi gösterilmektedir. Kırmızı renkli elemanlarda değişim sıfır olurken, mavi renkli

elemanlarda değişim maksimum olmaktadır. Kısacası mavi renkli elemanlarda elastisite modülü $30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ olmuştur.

Çizelge 4.5. Güncelleştirme sonrası MGK matrisi değerleri

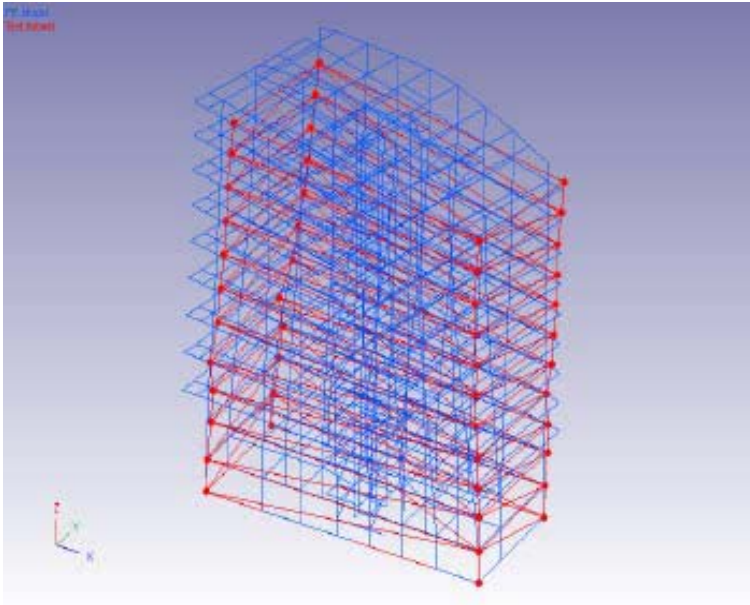
| SEM | Hz | DM | Hz | Fark | MGK |
|-----|------|----|-------|--------|------|
| 1 | 1.04 | 5 | 1.87 | -44.44 | 68.3 |
| 2 | 1.06 | 2 | 1.20 | -13.16 | 58.9 |
| 3 | 1.64 | 4 | 1.26 | 30.46 | 32.3 |
| 4 | 3.24 | 6 | 4.05 | -20.07 | 66.0 |
| 5 | 3.42 | 7 | 4.79 | -28.66 | 36.1 |
| 6 | 5.24 | 8 | 6.73 | -22.14 | 29.6 |
| 7 | 5.65 | 9 | 7.37 | -23.36 | 48.1 |
| 8 | 5.90 | 10 | 9.27 | -36.38 | 76.1 |
| 9 | 8.12 | 11 | 10.82 | -24.98 | 58.0 |
| 10 | 8.74 | 12 | 13.21 | -33.85 | 52.9 |



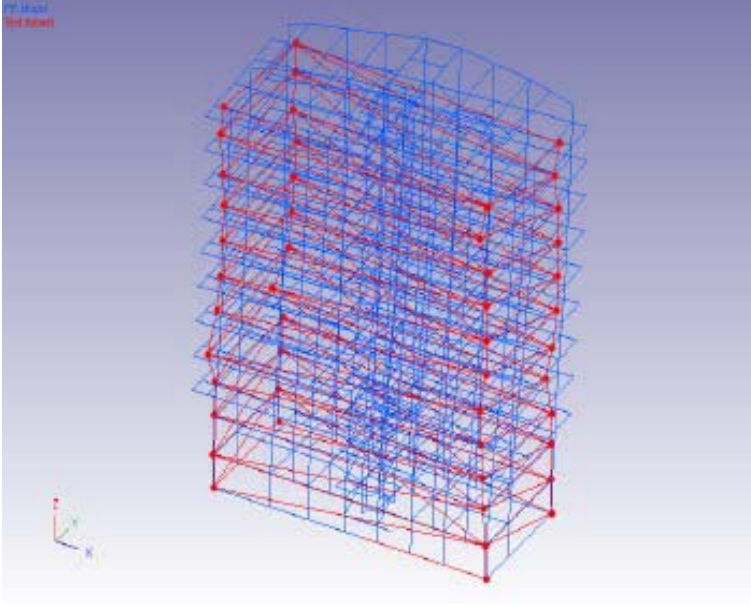


Şekil 4.32. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

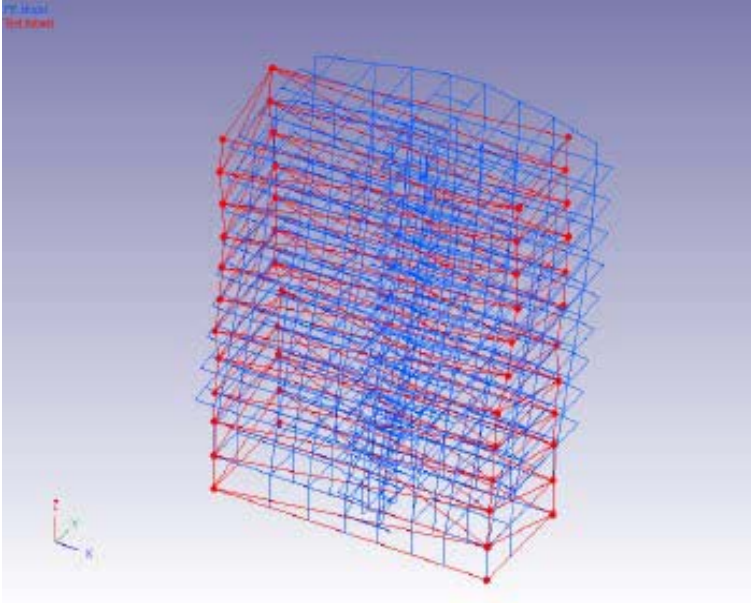
Şekil 4.32' te mevcut bina için güncelleme sonrası MGK matrisinin 3- boyutlu grafiksel şekli verilmiştir. MGK değeri en fazla güncelleme öncesinde de olduğu gibi sayısal modelin 8. mod şekli ile deneysel modelin 10. mod şekli arasında çıkmıştır. Ancak bu değerde bir azalma meydana gelmiştir. Güncelleme öncesi 77.5 iken güncelleme sonrası 76.1'e inmiştir.



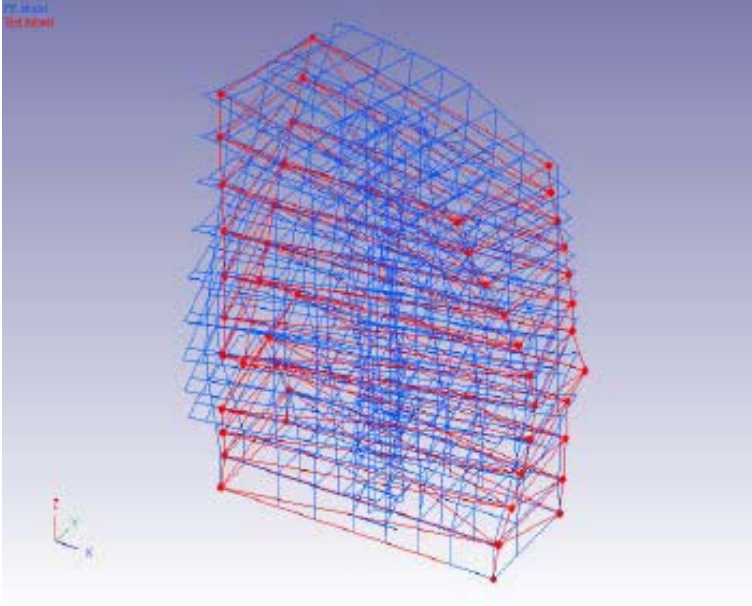
Şekil 4.33. Eşleşme-1 SEM1-DM5



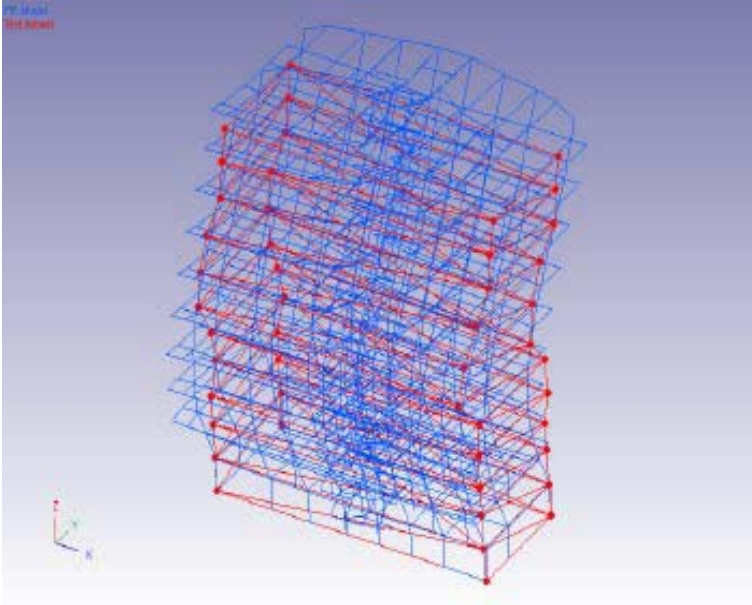
Şekil 4.34. Eşleşme-2 SEM2-DM2



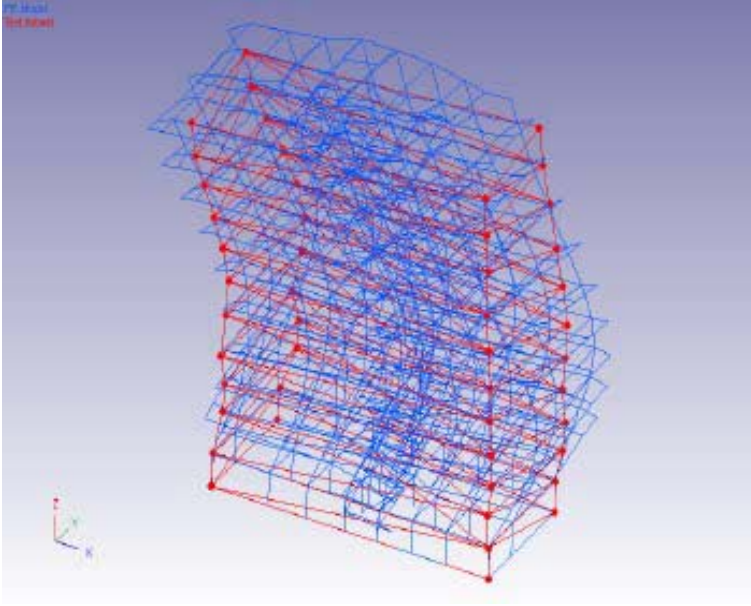
Şekil 4.35. Eşleşme-3 SEM3-DM4



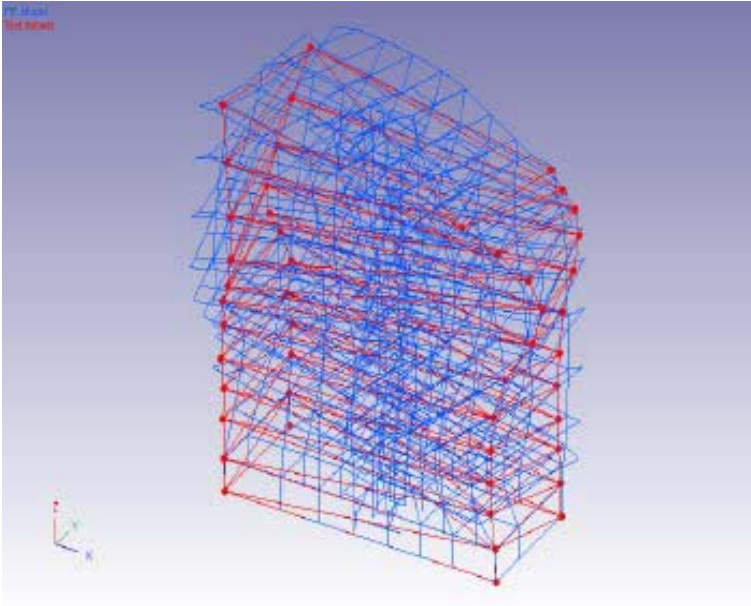
Şekil 4.36. Eşleşme-4 SEM4-DM6



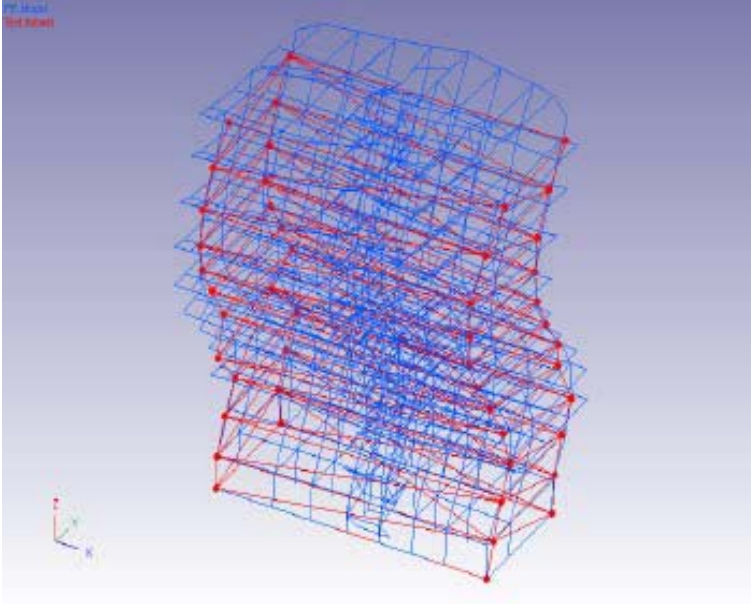
Şekil 4.37. Eşleşme-5 SEM5-DM7



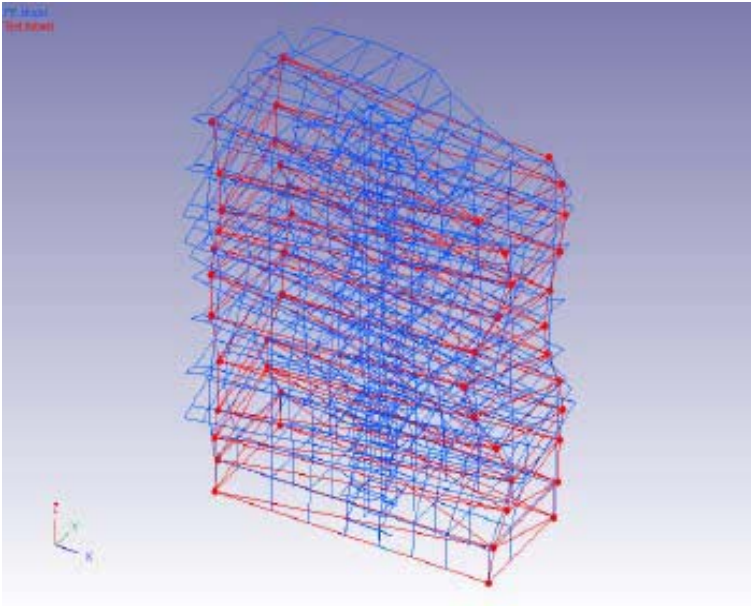
Şekil 4.38. Eşleşme-6 SEM6-DM8



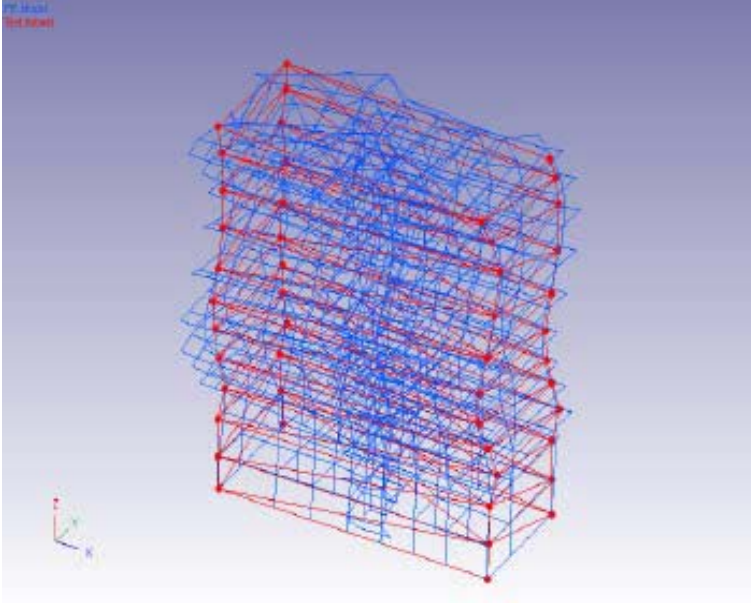
Şekil 4.39. Eşleşme-7 SEM7-DM9



Şekil 4.40. Eşleşme-8 SEM8-DM10



Şekil 4.41. Eşleşme-9 SEM9-DM11



Şekil 4.42. Eşleşme-10 SEM10-DM12

Çizelge 4.6. Güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerleri

| Mod Eşleşmesi | | Güncelleştirme Öncesi MGK Değeri | Mod Eşleşmesi | | Güncelleştirme Sonrası MGK Değeri |
|---------------|----|----------------------------------|---------------|----|-----------------------------------|
| SEM | DM | | SEM | DM | |
| 1 | 5 | 67.0 | 1 | 5 | 68.3 |
| 2 | 3 | 54.4 | 2 | 2 | 49.6 |
| 3 | 4 | 34.7 | 3 | 4 | 32.3 |
| 4 | 6 | 65.5 | 4 | 6 | 66.0 |
| 5 | 7 | 37.2 | 5 | 7 | 36.1 |
| 6 | 8 | 26.7 | 6 | 8 | 29.6 |
| 7 | 9 | 48.1 | 7 | 9 | 48.1 |
| 8 | 10 | 77.5 | 8 | 10 | 76.1 |
| 9 | 11 | 57.5 | 9 | 11 | 58.0 |
| 10 | 12 | 52.9 | 10 | 12 | 52.9 |

Çizelge 4.6' da güncelleme öncesi ve sonrası mod eşleşmeleri ve MGK değerleri gösterilmektedir. Güncelleştirme öncesi SEM' nin 2. mod şekli DM' in 3. mod şekliyle eşleşirken; güncelleme sonrası SEM' nin 2. mod şekli DM' in 2. mod şekliyle eşleşir. 2. eşleşmeye ait MGK değeri güncelleme öncesinde 54.4 iken güncelleme sonrası 49.6 olmuştur. 7. ve 10. eşleşmelerde ise güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerlerinin aynı kaldığı görülmektedir.

Daha sonra en çok değişim gösteren elemanlar tespit edilir.

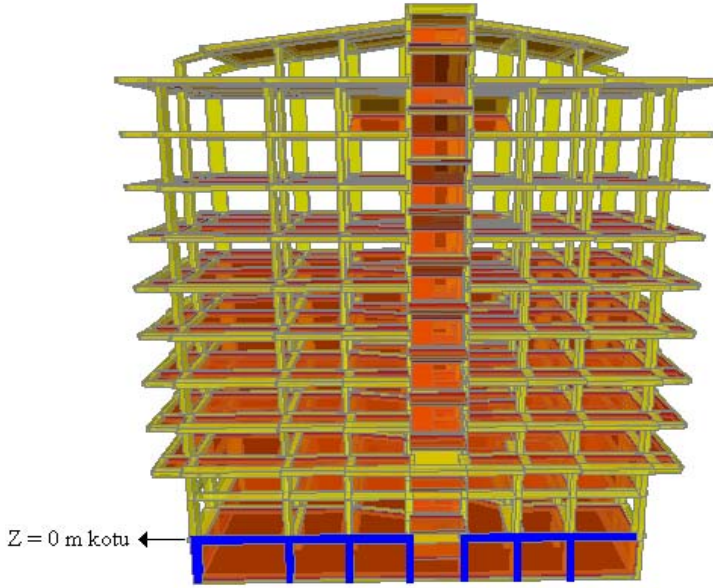
Çizelge 4.7. Kirişlerde betonarme elastisite modüllerinin en fazla değişim gösterdiği kotlar

| Kot | Kattaki Toplam Kiriş Sayısı | Değişen Kiriş Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|----------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 0.0 | 47 | 12 | %25.50 |
| Z = 3.00 | 59 | 14 | %23.73 |
| Z = 5.50 | 100 | 21 | %21.00 |
| Z = 8.25 | 96 | 19 | %19.79 |
| Z = 11.00 | 96 | 17 | %17.70 |
| Z = 13.75 | 96 | 17 | %17.70 |
| Z = 16.50 | 97 | 17 | %17.52 |

Çizelge 4.8. Kolonlarda betonarme elastisite modülünün en fazla değişim gösterdiği kotlar

| Kot | Kattaki Toplam Kolon Sayısı | Değişen Kolon Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = -2.75 – 0.00 | 10 | 9 | %90 |
| Z = 0.00 – 3.00 | 10 | 7 | %70 |
| Z = 3.00 – 5.50 | 10 | 4 | %40 |
| Z = 5.50 – 8.25 | 10 | 5 | %50 |
| Z = 8.25 – 11.00 | 10 | 2 | %20 |
| Z = 11.00 – 13.75 | 10 | 1 | %10 |
| Z = 13.75 – 16.50 | 10 | 1 | %10 |
| Z = 22.00 – 24.75 | 10 | 2 | %20 |

Çizelge 4.7' ten görüldüğü gibi zemin kattaki 47 kirişten 12 kirişte betonarme elastisite modülü $34 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, den $30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, ye düşmüştür. Z= 0 kotunda ise en fazla X= 1.5 – 27.9; Y= 1.75 aksında 6 kirişin tamamı değişmiştir. Çizelge 4.8' den görüldüğü gibi Y = 1.75m düzleminde bodrum kattaki 10 adet kolonun 9' unun betonarme elastisite modülü $34 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, den $30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, ye düşmüştür. Bu da bu bölgelerde beton kalitesinin BS20 betonuna denk olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.43. Binada betonarme elastisite modülü (E)' nün en çok değişim gösterdiği düzlem

4.1.5. Betonarme Birim Hacim Ağırlığı (ρ) Parametresine Göre Güncelleme

Tüm elemanlar için parametre olarak (ρ) seçilir. Betonarme birim hacim ağırlığı için güncelleme aralığı belirlenir. Güncelleme aralığı kiriş, kolon ve döşemeler için dönüştürülmüş-eşdeğer birim hacim ağırlığı hesaplanarak bulunur:

4.1.5.1. Kirişler İçin Hesap

Kirişler için başlangıç beton birim hacim ağırlığı $\rho_{kiriş} = 2400 \text{ kg/m}^3$

Minimum kiriş kesiti $25 \times 30 \text{ cm}$ ' lik kiriş için:

Donatı oranı $\rho = 0.0015 - 0.0033$

Kiriş alanı $A_{kiriş} = 30 \times 25 = 750 \text{ cm}^2$

— Minimum donatı oranı için $\rho = 0.0015$ alınır;

$$\rho = A_{\text{ç}} / A_{\text{b}}$$

$$0.0015 = A_{\text{ç}} / 750 \text{ ise } A_{\text{ç}} = 1.125 \text{ cm}^2$$

— Maksimum donatı oranı için $\rho = 0.0033$ alınırsa;

$$\rho = A_{\text{ç}} / A_{\text{b}}$$

$$0.0033 = A_{\text{ç}} / 750 \text{ ise } A_{\text{ç}} = 2.475 \text{ cm}^2$$

Burada $A_{\text{ç}}$: çelik alanı

A_{b} : beton alanı

$$\text{Uzunluk } h = 100 \text{ cm için kiriş hacmi } V_{\text{kiriş}} = 30 \times 25 \times 100 = 75000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Minimum donatı için çeliğin hacmi } V_{\text{ç}} = 1.125 \times 100 = 112.5 \text{ cm}^3$$

$$\text{Maksimum donatı için çeliğin hacmi } V_{\text{ç}} = 2.475 \times 100 = 247.5 \text{ cm}^3$$

a) Beton birim hacim ağırlığı $\rho_{\text{b}} = 2400 \text{ kg/m}^3$, çelik birim hacim ağırlığı

$$\rho_{\text{ç}} = 7850 \text{ kg/m}^3 \text{ alınırsa;}$$

$$\text{—Betonun kütlesi } M_{\text{b}} = V_{\text{b}} \times \rho_{\text{b}} = (75000 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 180 \text{ kg}$$

—Minimum donatı için çeliğin kütlesi

$$M_{\text{ç}} = V_{\text{ç}} \times \rho_{\text{ç}} = (112.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 0.883125 \text{ kg}$$

—Maksimum donatı için çeliğin kütlesi

$$M_{\text{ç}} = V_{\text{ç}} \times \rho_{\text{ç}} = (247.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 1.94287 \text{ kg}$$

1- Eşdeğer kütle $M_{\text{eş1}} = 180 + 0.883125 = 180.883125 \text{ kg}$ (minimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$$\rho_{\text{eş1}} = 180.883125 / 75000 = 0.002411775 \text{ kg/cm}^3 = 2411.78 \text{ kg/m}^3$$

2- Eşdeğer kütle $M_{\text{eş2}} = 180 + 1.942875 = 181.942875 \text{ kg}$ (maksimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$$\rho_{\text{eş2}} = 181.942875 / 75000 = 0.0024259 \text{ kg/cm}^3 = 2425.9 \text{ kg/m}^3$$

b) Betonun birim hacim ağırlığı $\rho_{\text{b}} = 2250 \text{ kg/m}^3$, çeliğin birim hacim ağırlığı

$$\rho_{\text{ç}} = 7850 \text{ kg/m}^3 \text{ alınırsa;}$$

$$\text{—Betonun kütlesi } M_{\text{b}} = V_{\text{b}} \times \rho_{\text{b}} = (75000 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 2250 \text{ kg/m}^3 = 168.75 \text{ kg}$$

—Minimum donatı için çeliğin kütlesi

$$M_{\phi} = V_{\phi} \times \rho_{\phi} = (112.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 0.883125 \text{ kg}$$

—Maksimum donatı için çeliğin kütlesi

$$M_{\phi} = V_{\phi} \times \rho_{\phi} = (247.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 1.94287 \text{ kg}$$

3- Eşdeğer kütle $M_{eş3} = 168.75 + 0.883125 = 169.633125 \text{ kg}$ (minimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$$\rho_{eş3} = 169.633125 / 75000 = 0.0022618 \text{ kg/cm}^3 = 2261.8 \text{ kg/m}^3$$

4- Eşdeğer kütle $M_{eş4} = 168.75 + 1.942875 = 170.69288 \text{ kg}$ (maksimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$$\rho_{eş4} = 170.69288 / 75000 = 0.0022759 \text{ kg/cm}^3 = 2275.9 \text{ kg/m}^3$$

Çizelge 4.9. Kirişlerde betonarme birim hacim ağırlığının güncelleme aralığı

| Eleman Türü | Güncelleştirme Aralığı (kg/m ³) | Değişim Yüzdesi (%) |
|-------------------|--|------------------------|
| Tüm kat kirişleri | 2275.9-2400 | -8.964 |

4.1.5.2. Kolonlar İçin Hesap

Kolonlar için başlangıç birim hacim ağırlık değeri $\rho_{kolon} = 2400 \text{ kg/m}^3$

Minimum kolon kesiti $25 \times 30 \text{ cm}$ ' lik kolon için:

Donatı oranı $\rho = 0.01-0.03$

Kiriş alanı $A_{kiriş} = 30 \times 25 = 750 \text{ cm}^2$

— Minimum donatı oranı için $\rho = 0.01$

$$\rho = A_{\phi} / A_b$$

$$0.01 = A_{\phi} / 750 \text{ ise } A_{\phi} = 7.5 \text{ cm}^2$$

— Maksimum donatı oranı için $\rho = 0.03$

$$\rho = A_{\phi} / A_b$$

$$0.03 = A_{\phi} / 750 \text{ ise } A_{\phi} = 22.5 \text{ cm}^2$$

Uzunluk $h = 100$ cm için Kolon hacmi $V_{\text{kolon}} = 30 \times 25 \times 100 = 75000 \text{ cm}^3$

Minimum donatı için çeliğin hacmi $V_{\text{ç}} = 7.5 \times 100 = 750 \text{ cm}^3$

Maksimum donatı için çeliğin hacmi $V_{\text{ç}} = 22.5 \times 100 = 2250 \text{ cm}^3$

a) Betonun birim hacim ağırlığı $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$, çeliğin birim hacim ağırlığı $\rho_{\text{ç}} = 7850 \text{ kg/m}^3$ alınır;

— Betonun kütlesi $M_b = V_b \times \rho_b = (75000 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 180 \text{ kg}$

— Minimum donatı için çeliğin kütlesi

$M_{\text{ç}} = V_{\text{ç}} \times \rho_{\text{ç}} = (7.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 5.8875 \text{ kg}$

— Maksimum donatı için çeliğin kütlesi

$M_{\text{ç}} = V_{\text{ç}} \times \rho_{\text{ç}} = (22.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 17.6625 \text{ kg}$

1- Eşdeğer kütle $M_{\text{eş1}} = 180 + 5.8875 = 185.8875 \text{ kg}$ (minimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$\rho_{\text{eş1}} = 185.8875 / 75000 = 0.0024785 \text{ kg/cm}^3 = 2478.5 \text{ kg/m}^3$

2- Eşdeğer kütle $M_{\text{eş2}} = 180 + 17.6625 = 197.6625 \text{ kg}$ (maksimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$\rho_{\text{eş2}} = 197.6625 / 75000 = 0.0026355 \text{ kg/cm}^3 = 2635.5 \text{ kg/m}^3$

b) Betonun birim hacim ağırlığı $\rho_b = 2250 \text{ kg/m}^3$, çeliğin birim hacim ağırlığı $\rho_{\text{ç}} = 7850 \text{ kg/m}^3$ alınır;

— Betonun kütlesi $M_b = V_b \times \rho_b = (75000 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 2250 \text{ kg/m}^3 = 168.75 \text{ kg}$

— Minimum donatı için çeliğin kütlesi

$M_{\text{ç}} = V_{\text{ç}} \times \rho_{\text{ç}} = (7.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 5.8875 \text{ kg}$

— Maksimum donatı için çeliğin kütlesi

$M_{\text{ç}} = V_{\text{ç}} \times \rho_{\text{ç}} = (22.5 \times 10^{-6}) \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 = 17.6625 \text{ kg}$

3- Eşdeğer kütle $M_{\text{eş3}} = 168.75 + 5.8875 = 174.6375 \text{ kg}$ (minimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$\rho_{\text{eş3}} = 174.6375 / 75000 = 0.0023285 \text{ kg/cm}^3 = 2328.5 \text{ kg/m}^3$

4- Eşdeğer kütle $M_{\text{eş4}} = 168.75 + 17.6625 = 186.4125 \text{ kg}$ (maksimum donatı için)

Eşdeğer birim hacim ağırlık

$$\rho_{eş4} = 186.4125 / 75000 = 0.0024855 \text{ kg/cm}^3 = 2485.5 \text{ kg/m}^3$$

Çizelge 4.10. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının güncelleme aralığı

| Eleman Türü | Güncelleştirme Aralığı (kg/m ³) | Değişim Yüzdesi (%) |
|-------------------|--|------------------------|
| Tüm kat kolonları | 2328.5–2635.5 | -6.86 +5.42 |

4.1.5.3. Döşemeler İçin Hesap

Döşemeler için, başlangıç birim hacim ağırlık değeri mevcut duvar yükleri uygun oranda eklenerek $\rho_{döşeme} = 3273 \text{ kg/m}^3$ olarak kullanılmıştır.

BÇIII için minimum donatı oranı $\rho = 0.0035$ alınır (Odabaşı, 1997);

a) Betonun birim hacim ağırlığı $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$, çeliğin birim hacim ağırlığı $\rho_ç = 7850 \text{ kg/m}^3$ olarak; döşeme uzunluğu $b = 1 \text{ m}$, genişliği $h = 1 \text{ m}$ ve kalınlığı $t = 0.2 \text{ m}$ alınır;

$$\text{Betonun kütlesi } M_b = 1 \times 1 \times 0.2 \times 2400 = 480 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Çeliğin hacmi } V_ç = \rho \times 0.2 = 0.0035 \times 0.2 = 0.0007 \text{ m}^3 \text{ (minimum donatı için)}$$

$$\text{Çeliğin kütlesi } M_ç = 0.007 \times 7850 = 5.495 \text{ kg}$$

$$\text{Toplam kütle } M_t = 480 + 5.495 = 485.495 \text{ kg}$$

$$\text{Döşeme birim hacim ağırlığı } \rho_{döşeme} = 485.495 \text{ kg} \times 5 \text{ 1/m}^3 = 2427.5 \text{ kg/m}^3$$

b) Betonun birim hacim ağırlığı $\rho_b = 2250 \text{ kg/m}^3$, çeliğin birim hacim ağırlığı $\rho_ç = 7850 \text{ kg/m}^3$ olarak; döşeme uzunluğu $b = 1 \text{ m}$, genişliği $h = 1 \text{ m}$ ve kalınlığı $t = 0.2 \text{ m}$ alınır;

$$\text{Betonun kütlesi } M_b = 1 \times 1 \times 0.2 \times 2250 = 450 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Çeliğin hacmi } V_ç = \rho \times 0.2 = 0.0035 \times 0.2 = 0.0007 \text{ m}^3 \text{ (minimum donatı için)}$$

$$\text{Çeliğin kütlesi } M_ç = 0.007 \times 7850 = 5.495 \text{ kg}$$

$$\text{Toplam kütle } M_t = 450 + 5.495 = 455.495 \text{ kg}$$

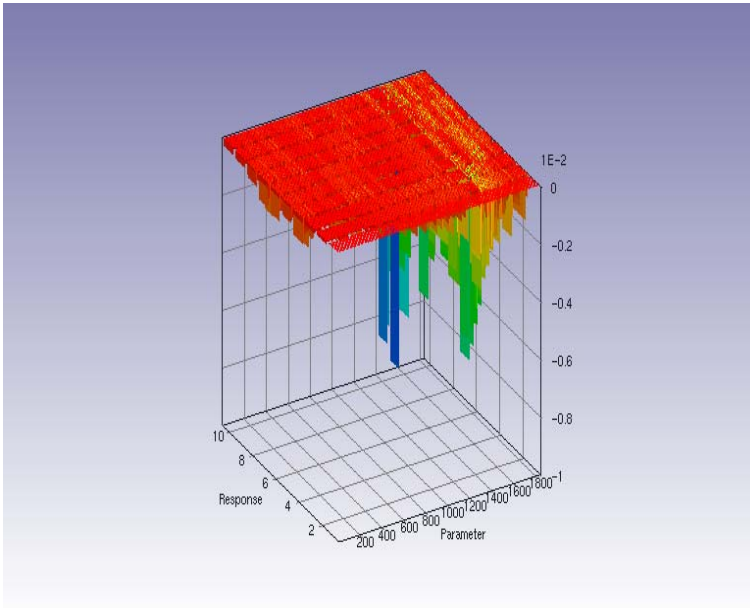
Döşeme birim hacim ağırlığı $\rho_{döşeme} = 455.495 \text{ kg} \times 5 \text{ l/m}^3 = 2277.5 \text{ kg/m}^3$

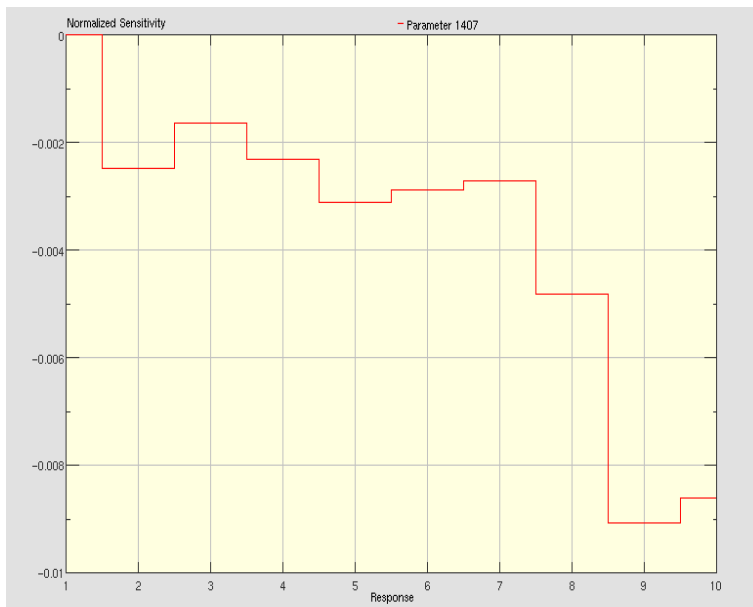
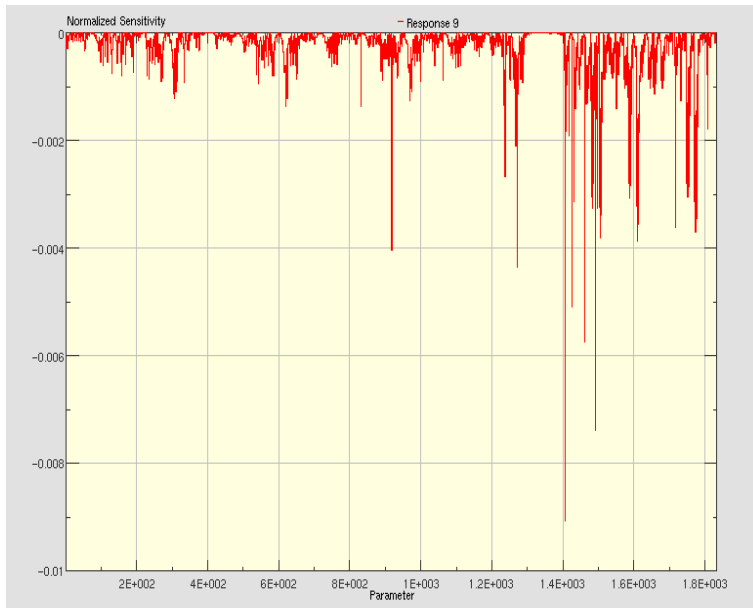
Döşeme birim hacim ağırlığı $\rho_{döşeme} = 2277.5 \text{ kg/m}^3$ kullanılarak, mevcut duvar yükleri uygun oranda eklenerek döşemeler için eşdeğer birim hacim ağırlık değeri $\rho_{döşeme} = 3339.58 \text{ kg/m}^3$ bulunmuştur.

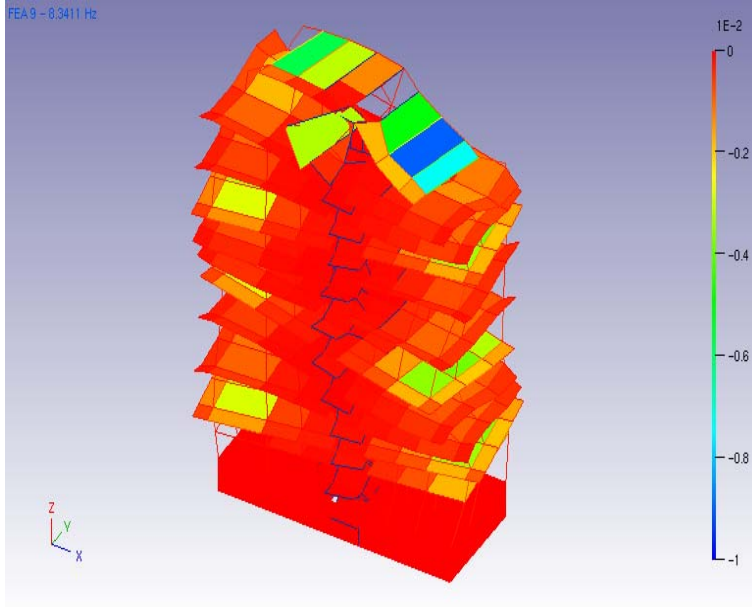
Çizelge 4.11. Döşemelerde betonarme birim hacim ağırlığının güncelleme aralığı

| Eleman Türü | Güncelleştirme Aralığı (kg/m^3) | Değişim Yüzdesi (%) |
|--------------------|---|------------------------|
| Tüm kat döşemeleri | 3273-3339.58 | +2.0342 |

Seçilen parametreye göre hassaslık analizi yapılır. Hassaslık analizi neticesinde binanın elemanlarındaki parametre değişimleri ve hassas bölgeleri belirlenir.

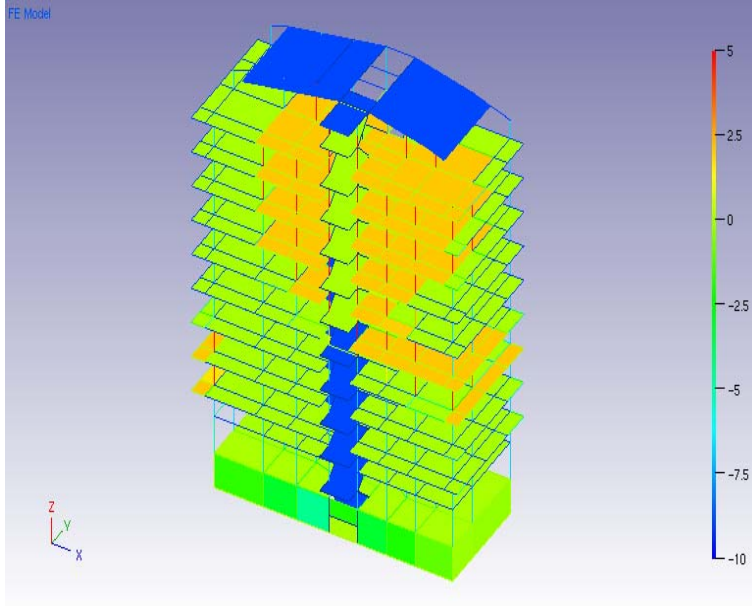






Şekil 4.44. Bina elemanlarının betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

Şekil 4.44' te görüldüğü gibi hassaslığa ait maksimum değer 9. mod eşleşmesinde $Z = 30.00 - 30.50$ m kotları arasındaki 1578 no' lu döşeme elemana aittir. 1578 no' lu elemana ait 9. mod eşleşmesi için normalleştirilmiş hassaslık değeri gösterilmektedir (-0.00907). Mavi renkli döşeme hassaslığın maksimum değer aldığı 1578 no' lu döşemedir. Seçilmiş olan parametreye göre sonlu eleman modeli güncellenir.

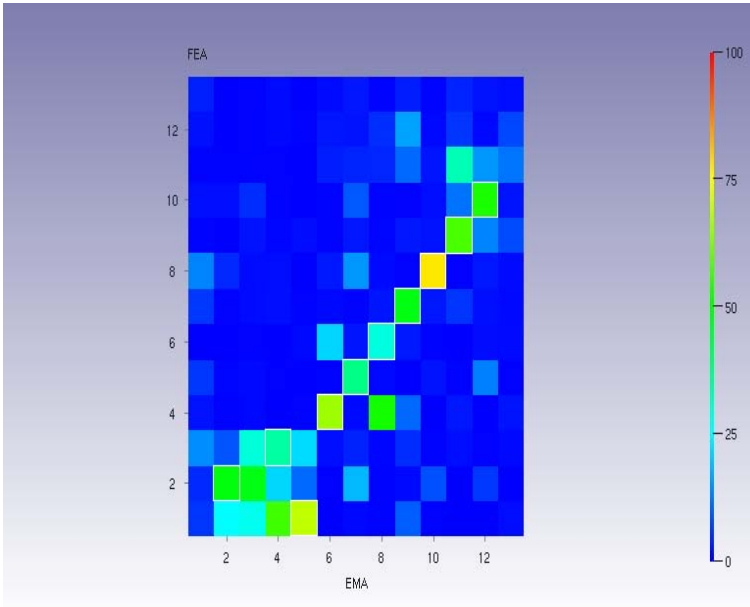
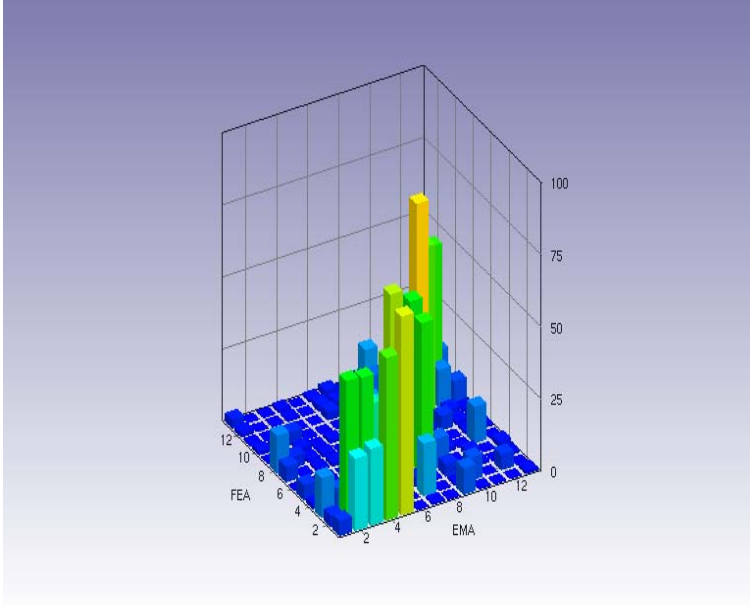


Şekil 4.45. Güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimi

Şekil 4.45’ te güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığının elemanlardaki değişimi gösterilmektedir. Sarı renkli elemanlarda değişim sıfır olurken, turuncu renkli elemanlarda değişim pozitif değerde, yeşil ve mavi elemanlarda değişim negatif değerde olmaktadır.

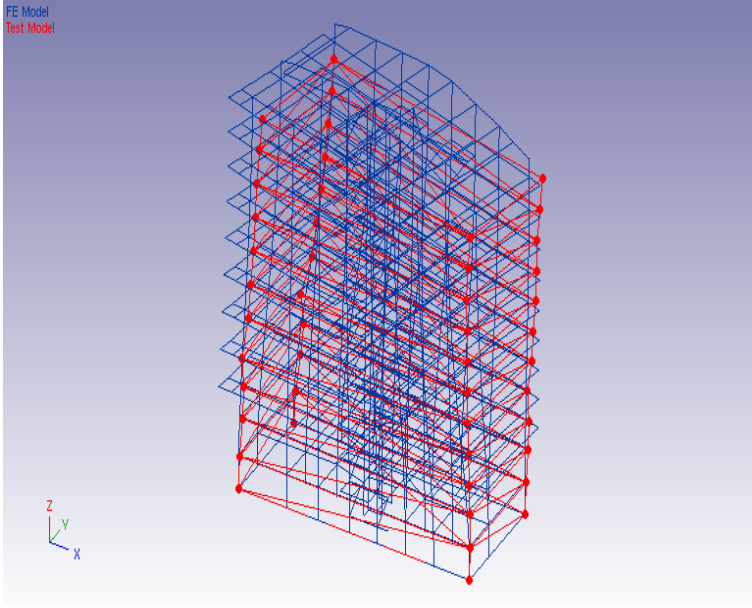
Çizelge 4.12. Güncelleştirme sonrası MGK matrisi değerleri

| SEM | H _z | DM | H _z | Fark | MGK |
|-----|----------------|----|----------------|--------|------|
| 1 | 1.06 | 5 | 1.87 | -43.03 | 68.9 |
| 2 | 1.08 | 2 | 1.20 | -9.48 | 48.8 |
| 3 | 1.72 | 4 | 1.26 | 36.19 | 33.9 |
| 4 | 3.32 | 6 | 4.05 | -17.95 | 65.4 |
| 5 | 3.50 | 7 | 4.79 | -26.85 | 37.0 |
| 6 | 5.44 | 8 | 6.73 | -19.14 | 27.9 |
| 7 | 5.82 | 9 | 7.37 | -21.14 | 48.3 |
| 8 | 6.05 | 10 | 9.27 | -34.74 | 77.2 |
| 9 | 8.34 | 11 | 10.82 | -22.94 | 57.2 |
| 10 | 8.96 | 12 | 13.21 | -32.16 | 52.5 |

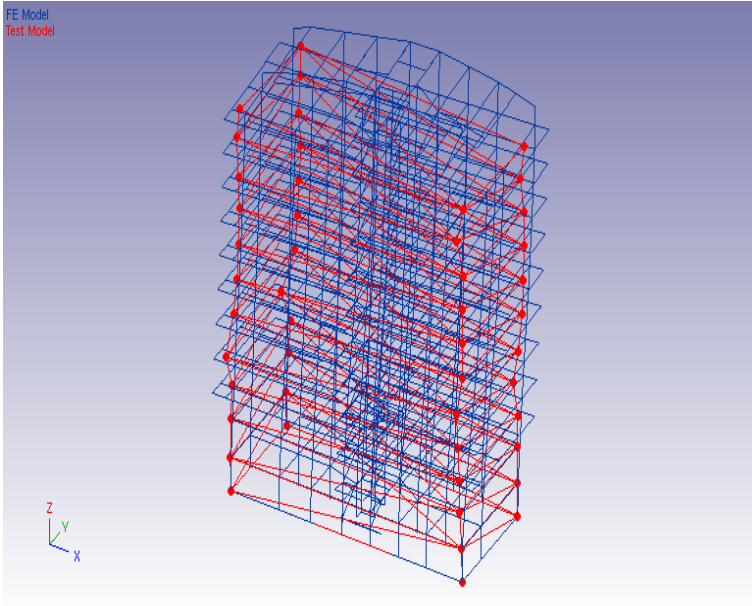


Şekil 4.46. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

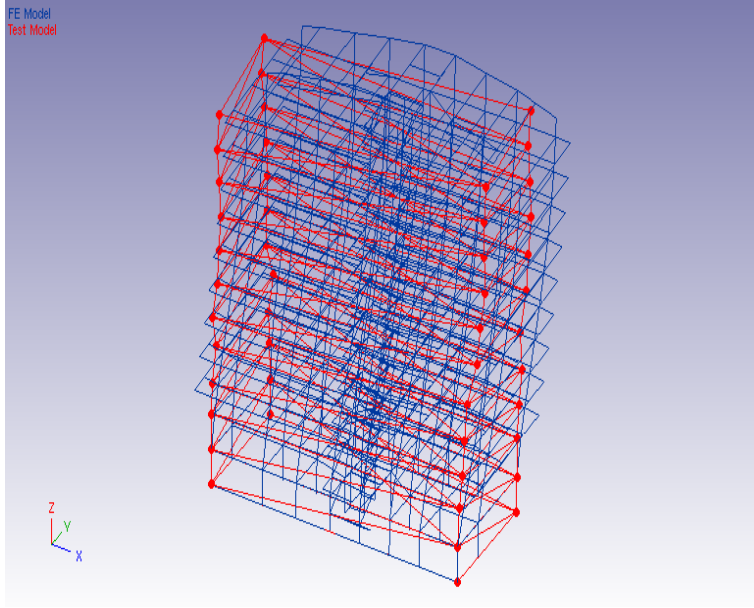
Şekil 4.46’ da mevcut bina için güncelleme sonrası MGK matrisinin 3- boyutlu grafiksel şekli verilmiştir. MGK değeri en fazla güncelleme öncesinde de olduğu gibi sayısal modelin 8. mod şekli ile deneysel modelin 10. mod şekli arasında çıkmıştır. Ancak bu değerde bir azalma meydana gelmiştir. Güncelleme öncesi 77.5 iken güncelleme sonrası 77.2’ e inmiştir.



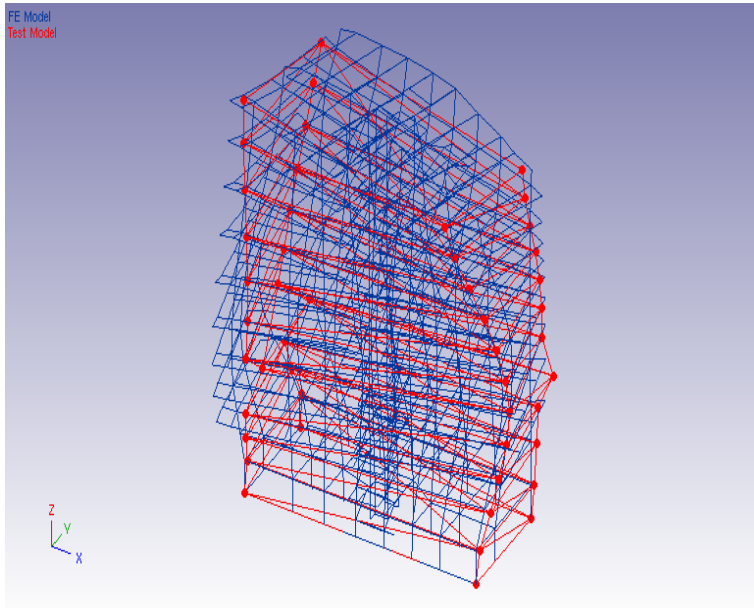
Şekil 4.47. Eşleşme-1 SEM1-DM5



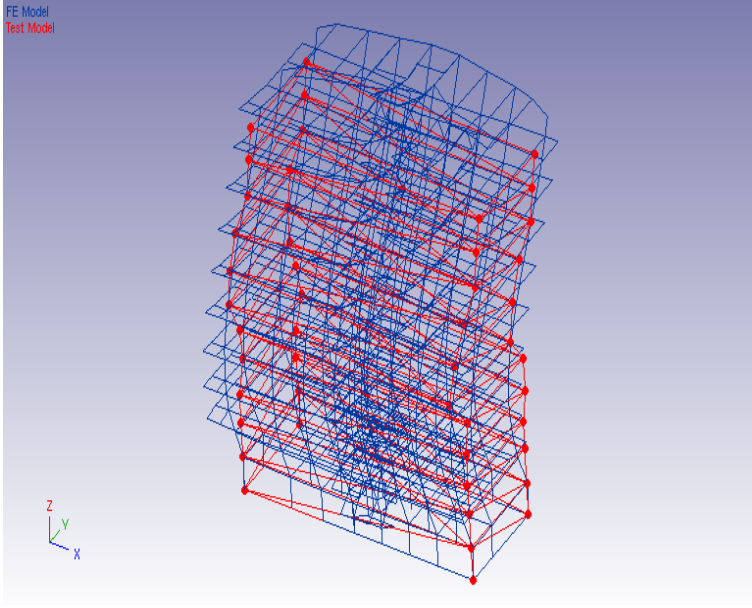
Şekil 4.48. Eşleşme-2 SEM2-DM2



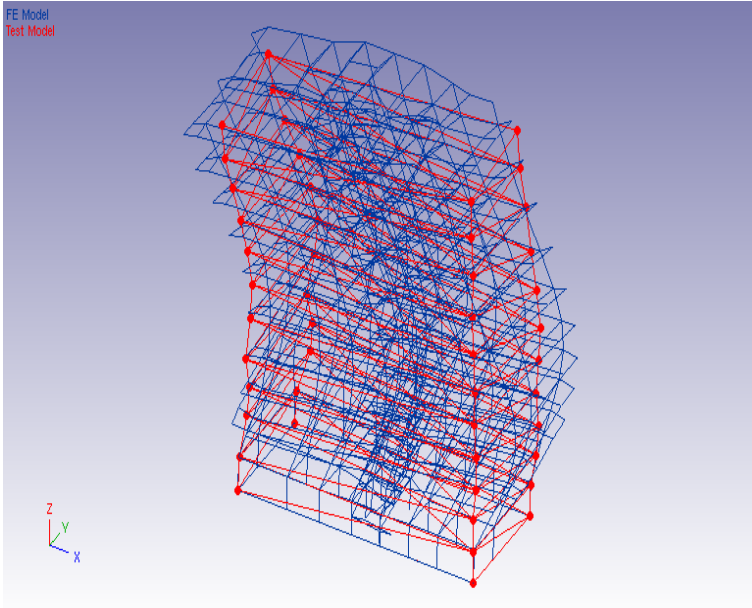
Şekil 4.49. Eşleşme-3 SEM3-DM4



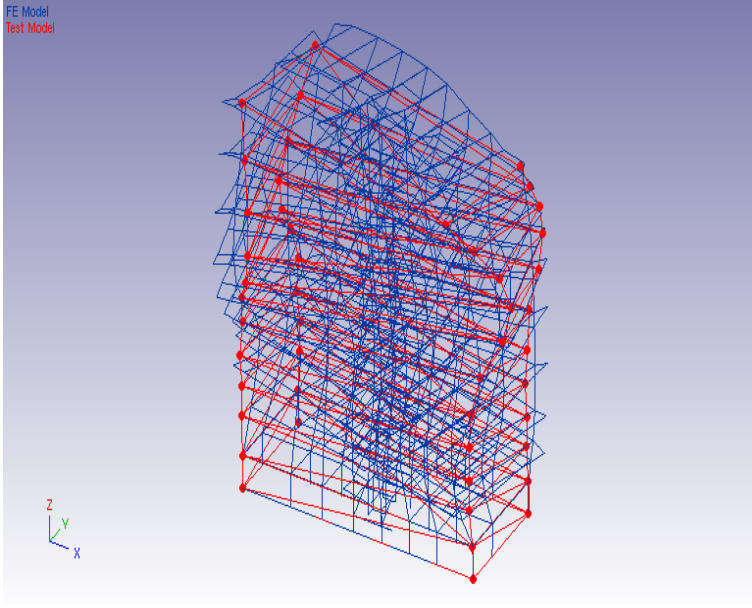
Şekil 4.50. Eşleşme-4 SEM4-DM6



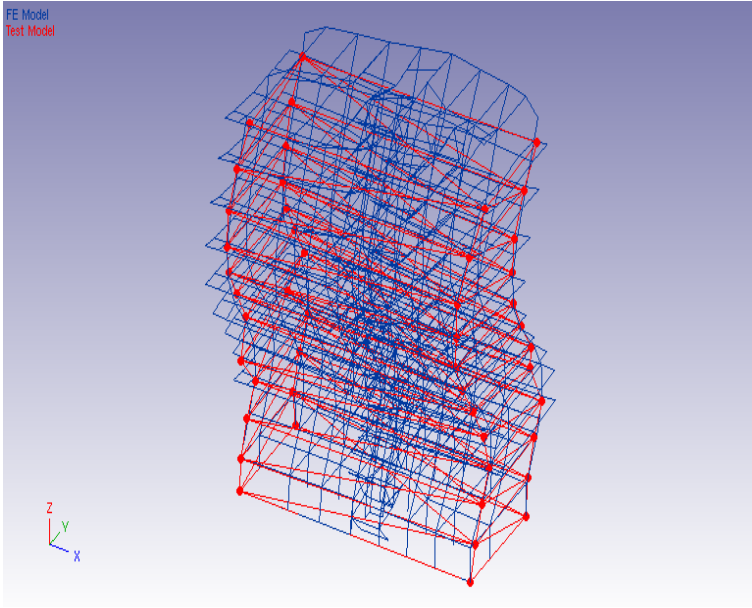
Şekil 4.51. Eşleşme-5 SEM5-DM7



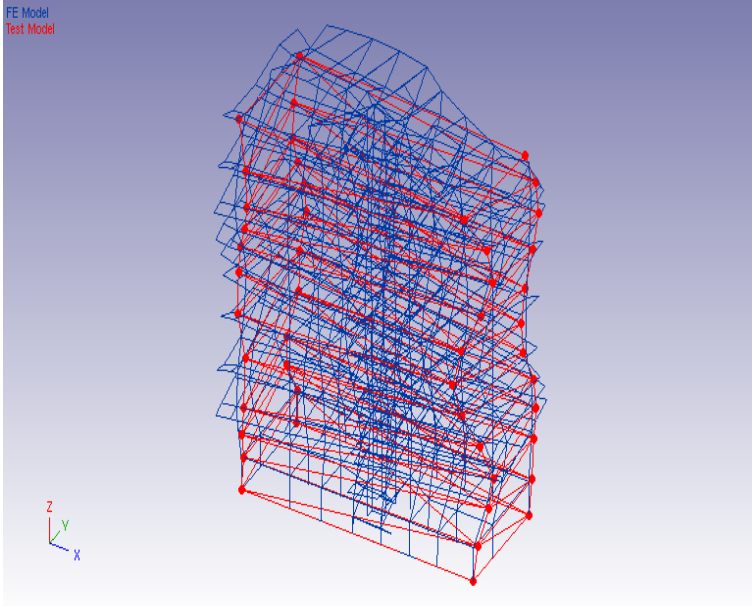
Şekil 4.52. Eşleşme-6 SEM6-DM8



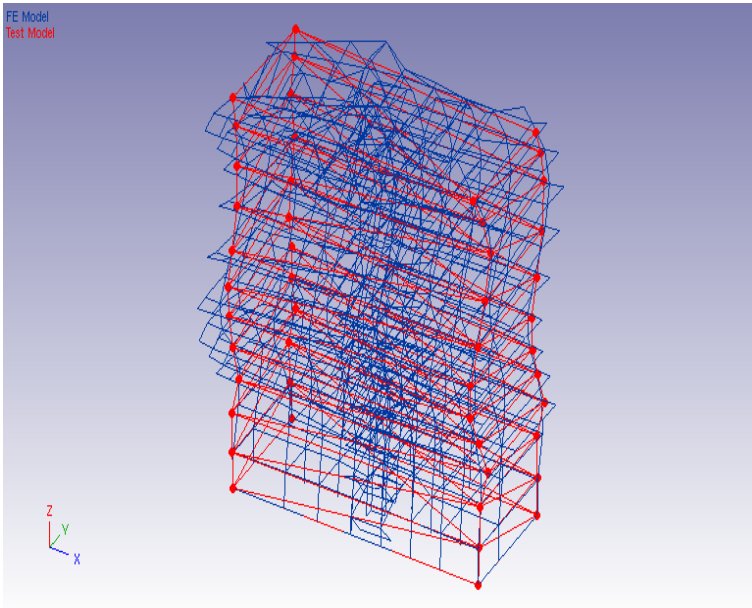
Şekil 4.53. Eşleşme-7 SEM7-DM9



Şekil 4.54. Eşleşme-8 SEM8-DM10



Şekil 4.55. Eşleşme-9 SEM9-DM11



Şekil 4.56. Eşleşme-10 SEM10-DM12

Çizelge 4.13. Güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerleri

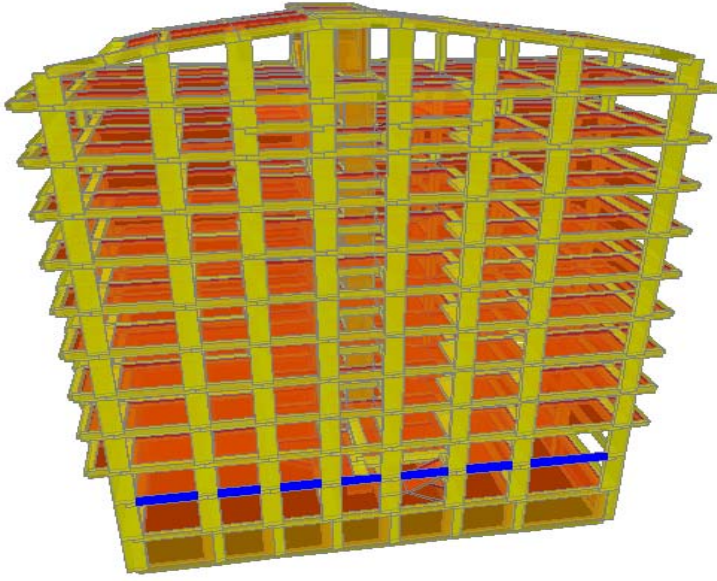
| Mod Eşleşmesi | | Güncelleştirme Öncesi MGK Değeri | Mod Eşleşmesi | | Güncelleştirme Sonrası MGK Değeri |
|---------------|----|----------------------------------|---------------|----|-----------------------------------|
| SEM | DM | | SEM | DM | |
| 1 | 5 | 67.0 | 1 | 5 | 68.9 |
| 2 | 3 | 54.4 | 2 | 2 | 48.8 |
| 3 | 4 | 34.7 | 3 | 4 | 33.9 |
| 4 | 6 | 65.5 | 4 | 6 | 65.4 |
| 5 | 7 | 37.2 | 5 | 7 | 37.0 |
| 6 | 8 | 26.7 | 6 | 8 | 27.9 |
| 7 | 9 | 48.1 | 7 | 9 | 48.3 |
| 8 | 10 | 77.5 | 8 | 10 | 77.2 |
| 9 | 11 | 57.5 | 9 | 11 | 57.2 |
| 10 | 12 | 52.9 | 10 | 12 | 52.5 |

Çizelge 4.13' de güncelleme öncesi ve sonrası mod eşleşmeleri ve MGK değerleri gösterilmektedir. Güncelleştirme öncesi SEM' nin 2. mod şekli DM' in 3. mod şekliyle eşleşirken; güncelleme sonrası SEM' nin 2. mod şekli DM' in 2. mod şekliyle eşleşir. 2. eşleşmeye ait MGK değeri güncelleme öncesinde 54.4 iken güncelleme sonrası 48.8 olmuştur.

Model güncellemesi yapıldıktan sonra bina elemanlarında (ρ)' nun en fazla değişim gösterdiği düzlemler veya kotlar belirlenir.

Çizelge 4.14. Kirişlerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2275.9 \text{ kg/m}^3$)

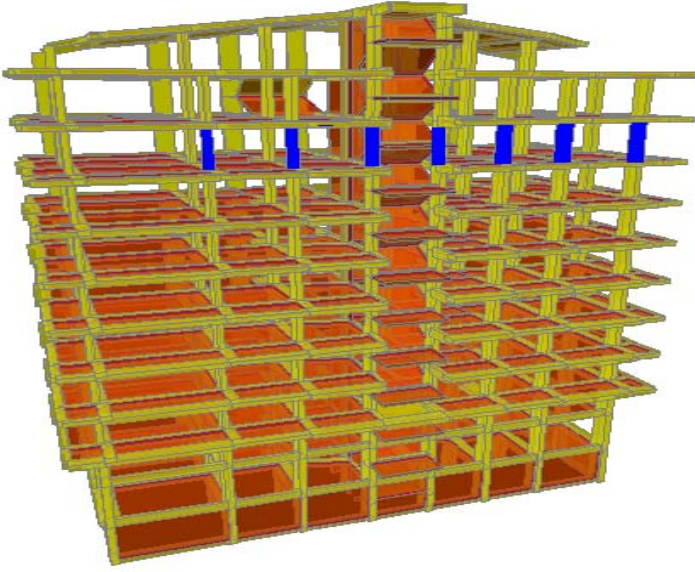
| Kot | Kattaki Toplam Kiriş Sayısı | Değişen Kiriş Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|----------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 3.0 | 59 | 52 | %88.13 |
| Z = 5.5 | 100 | 84 | %84.00 |
| Z = 8.25 | 96 | 76 | %79.17 |
| Z = 11.00 | 96 | 60 | %62.50 |
| Z = 13.75 | 96 | 40 | %41.67 |
| Z = 16.50 | 97 | 64 | %65.98 |
| Z = 19.25 | 97 | 50 | %51.55 |



Şekil 4.57. Binada kirişlerin betonarme birim hacim ağırlığı (ρ)' nun en çok değişim gösterdiği düzlem

Çizelge 4.15. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2635.5 \text{ kg/m}^3$) $Y = 1.75 \text{ m}$ düzlemi

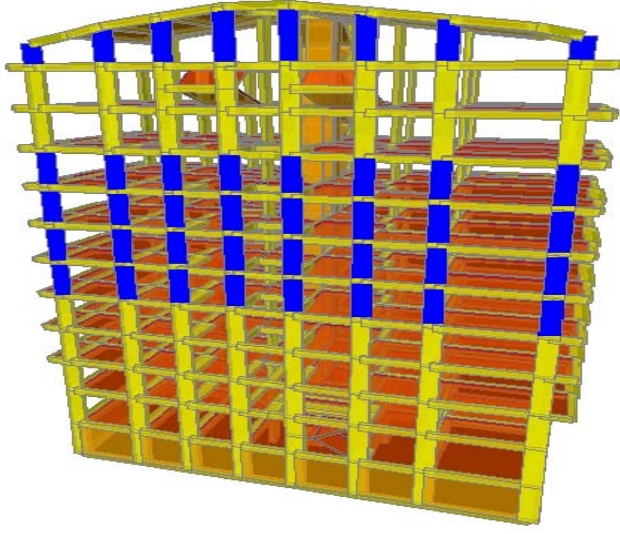
| Kot | Kattaki Toplam Kolon Sayısı | Değişen Kolon Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 5.50 – 8.25 | 10 | 1 | %10 |
| Z = 11.00 – 13.75 | 10 | 2 | %20 |
| Z = 13.75 – 16.50 | 10 | 4 | %40 |
| Z = 16.50 – 19.25 | 10 | 6 | %60 |
| Z = 19.25 – 22.00 | 10 | 7 | %70 |
| Z = 22.00 – 24.75 | 10 | 9 | %90 |
| Z = 24.75 – 27.50 | 10 | 8 | %80 |



Şekil 4.58. Binada kolonların betonarme birim hacim ağırlığı (ρ)' nun en çok değişim gösterdiği düzlem ($\rho = 2635.5 \text{ kg/m}^3$)

Çizelge 4.16. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2328.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 12.75 m düzlemi

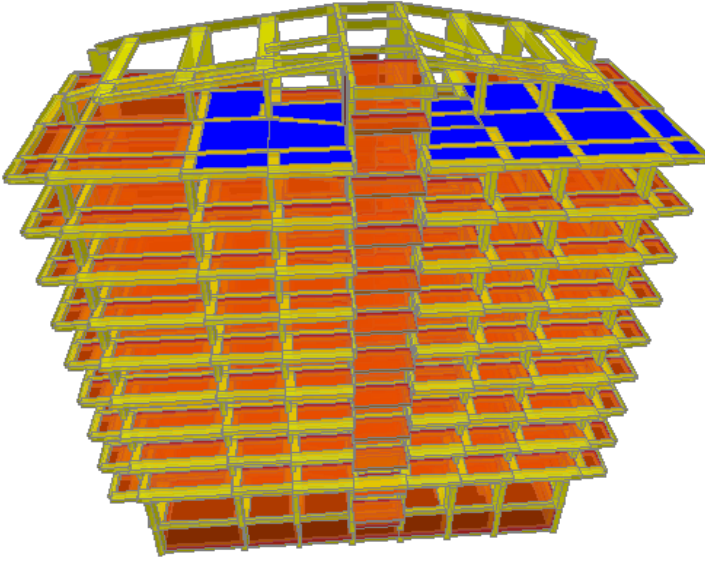
| Kot | Kattaki Toplam Kolon Sayısı | Değişen Kolon Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 0.00 – 3.00 | 9 | 6 | %66.67 |
| Z = 3.00 – 5.50 | 8 | 7 | %87.5 |
| Z = 5.50 – 8.25 | 8 | 7 | %87.5 |
| Z = 8.25 – 11.00 | 8 | 7 | %87.5 |
| Z = 11.00 – 13.75 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 13.75 – 16.50 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 16.50 – 19.25 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 19.25 – 22.00 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 22.00 – 24.75 | 8 | 5 | %62.5 |
| Z = 24.75 – 27.50 | 12 | 6 | %50 |
| Z = 27.50 – 31.00 | 8 | 8 | %100 |



Şekil 4.59. Binada kolonların betonarme birim hacim ağırlığı (ρ)' nun en çok değişim gösterdiği düzlem ($\rho = 2328.5 \text{ kg/m}^3$)

Çizelge 4.17. Döşemelerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 3339.58 \text{ kg/m}^3$)

| Kot | Kattaki Toplam Döşeme Sayısı | Değişen Döşeme Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|------------------|------------------------------|-----------------------|--|
| Z = 5.5 | 36 | 3 | %8.33 |
| Z = 8.25 | 36 | 4 | %11.11 |
| Z = 11.00 | 36 | 4 | %11.11 |
| Z = 13.75 | 36 | 10 | %27.78 |
| Z = 16.50 | 36 | 5 | %13.89 |
| Z = 19.25 | 36 | 12 | %33.33 |
| Z = 22.00 | 36 | 19 | %52.78 |
| Z = 24.75 | 36 | 21 | %58.33 |
| Z = 27.50 | 35 | 21 | %60.0 |



Şekil 4.60. Binada döşemelerin betonarme birim hacim ağırlığı (ρ)' nun en çok değişim gösterdiği düzlem

Çizelge 4.14' den görüldüğü gibi $Z = 3.0$ m kotundaki 59 kirişten 52 kirişte birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 ' ten 2275.9 kg/m^3 ' e düşmüştür. $Z = 3.0$ kotunda ise en fazla $X = 1.5 - 27.9$ m; $Y = 12.75$ m aksında 8 kiriş değişmiştir. Çizelge 4.15' den görüldüğü gibi $Y = 1.75$ m düzleminde $Z = 22.00-24.75$ m kotundaki 10 adet kolonun 9' unun birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 ' ten 2635.5 kg/m^3 ' e yükselmiştir. Çizelge 4.16' da ise $Z = 11.00 - 22.00$ m ile $Z = 27.50- 31.00$ kotları arasındaki tüm kolonların birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 ' ten 2328.5 kg/m^3 ' e inmiştir. Çizelge 4.17' de ise $Z = 27.50$ m kotundaki 35 döşemeden 21' inin birim hacim ağırlığı 3273 kg/m^3 ' ten 3339.58 kg/m^3 ' e yükselmiştir. $Z = 27.50$ m kotunda ise en fazla $X = 7.0-27.9$ m; $Y = 0.0-9.65$ m aksında 21 döşeme değişmiştir.

4.1.6. Betonarme Elastisite Modülü (E) ve Betonarme Birim Hacim Ağırlığı (ρ) Parametresine Göre Güncelleme

Tüm elemanlar için parametre olarak (E) ve (ρ) parametresi seçilir. Betonarme elastisite modülü (E) ve betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) için ilk iki güncellemede belirlenen güncelleme aralıkları seçilir.

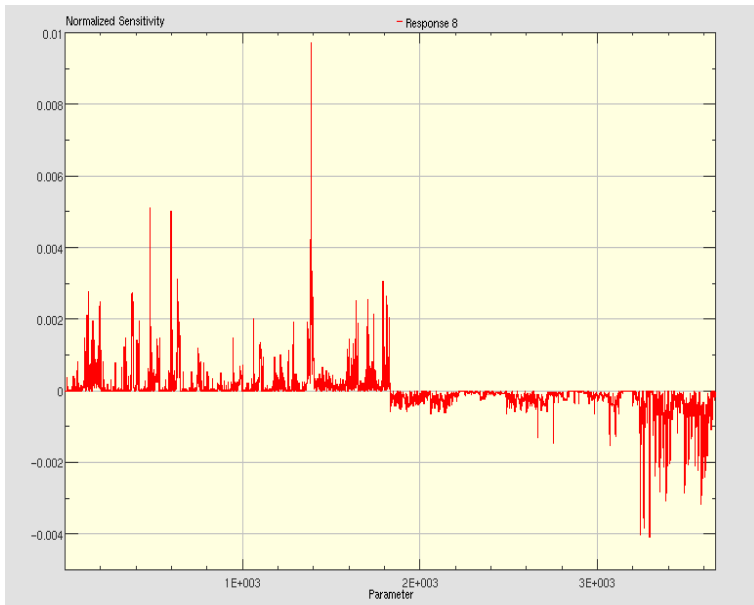
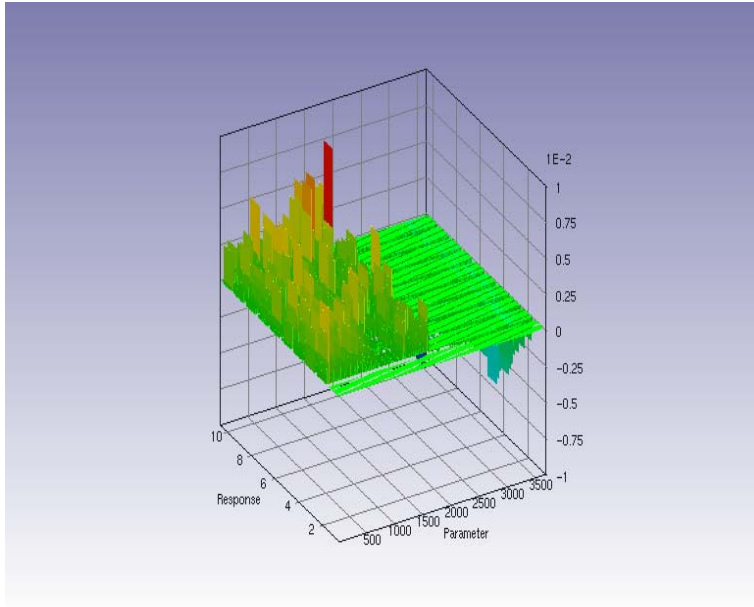
Çizelge 4.18. Betonarme elastisite modülünün (E) güncelleştirme aralığı

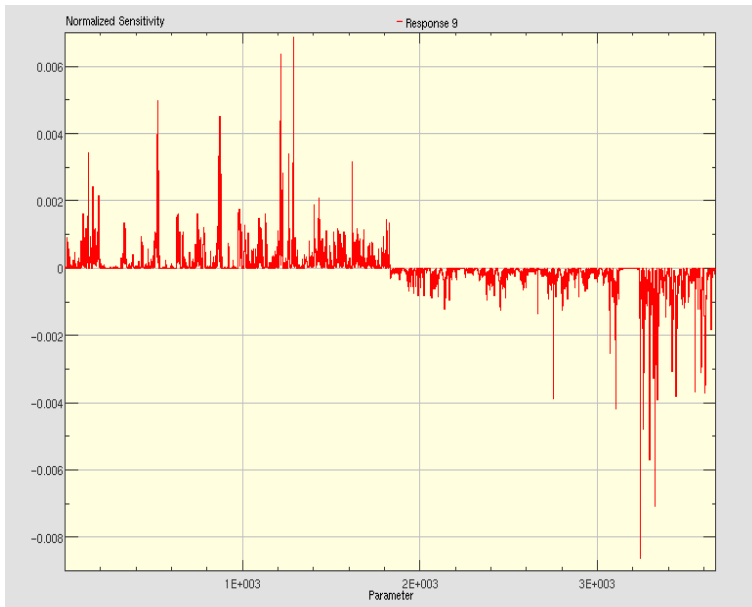
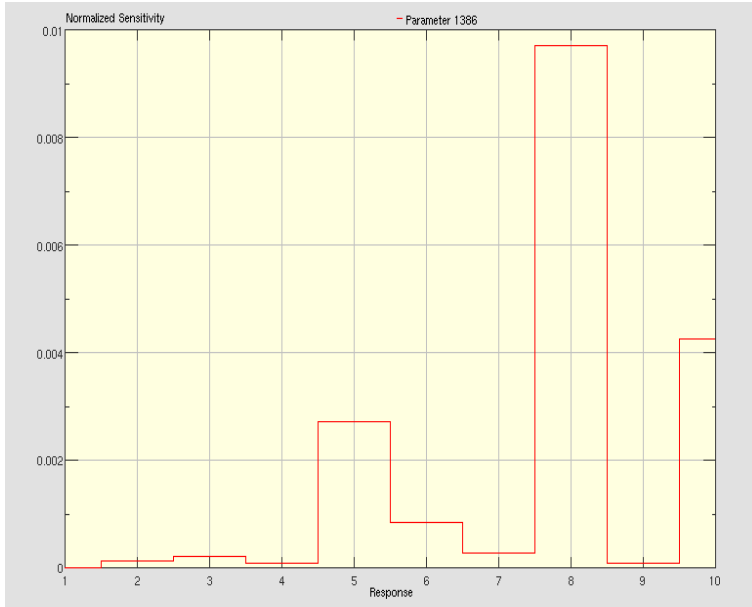
| Eleman Türü | Güncelleştirme Aralığı (N/m ²) | Değişim Yüzdesi (%) |
|--------------------|---|------------------------|
| Tüm kat kirişleri | 30·10 ⁹ – 34·10 ⁹ | -11.7647 |
| Tüm kat kolonları | | |
| Tüm kat döşemeleri | | |

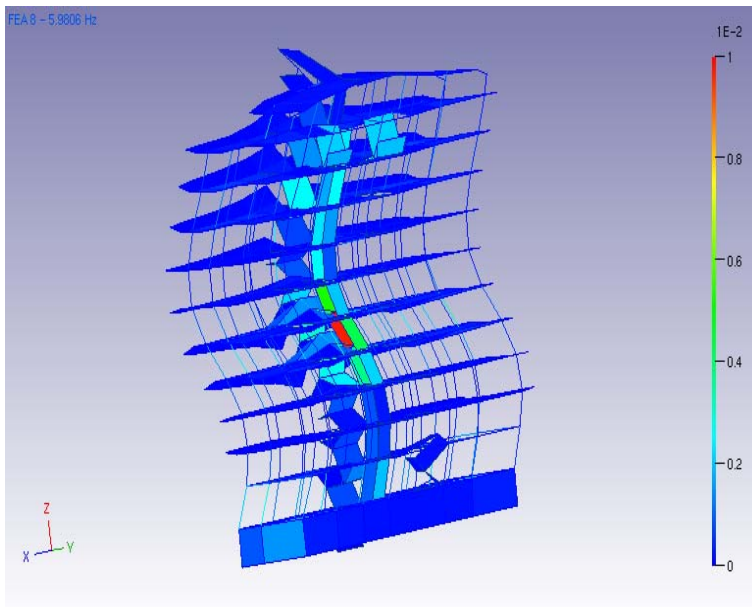
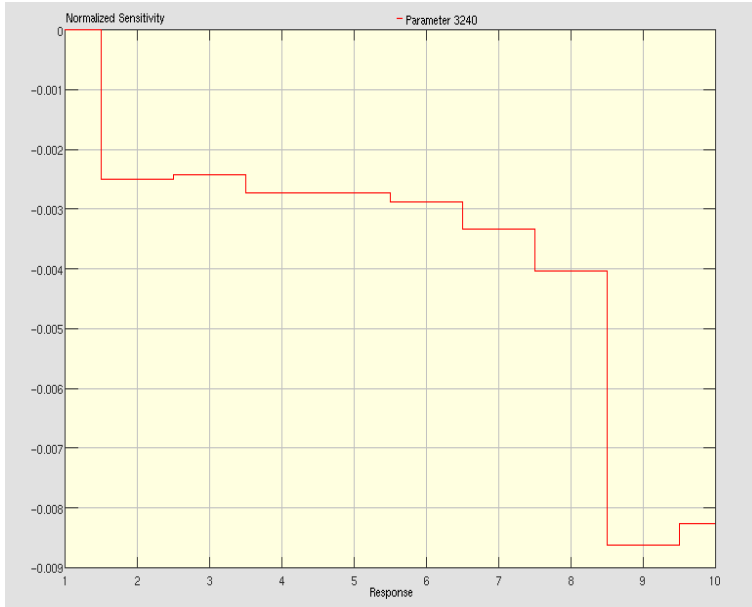
Çizelge 4.19. Betonarme birim hacim ağırlığının (ρ) güncelleştirme aralığı

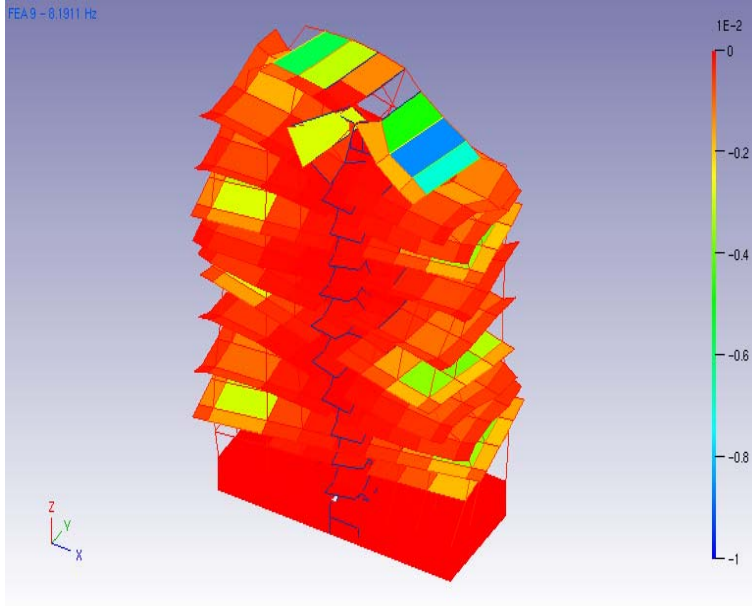
| Eleman Türü | Güncelleştirme Aralığı (kg/m ³) | Değişim Yüzdesi (%) |
|--------------------|--|------------------------|
| Tüm kat kirişleri | 2275.9-2400 | -8.964 |
| Tüm kat kolonları | 2328.5-2635.5 | -6.86 +5.42 |
| Tüm kat döşemeleri | 3273-3339.58 | +2.0342 |

Seçilen parametrelere göre hassaslık analizi yapılır. Hassaslık analizi neticesinde binanın elemanlarındaki parametre değişimleri ve hassas bölgeleri belirlenir.



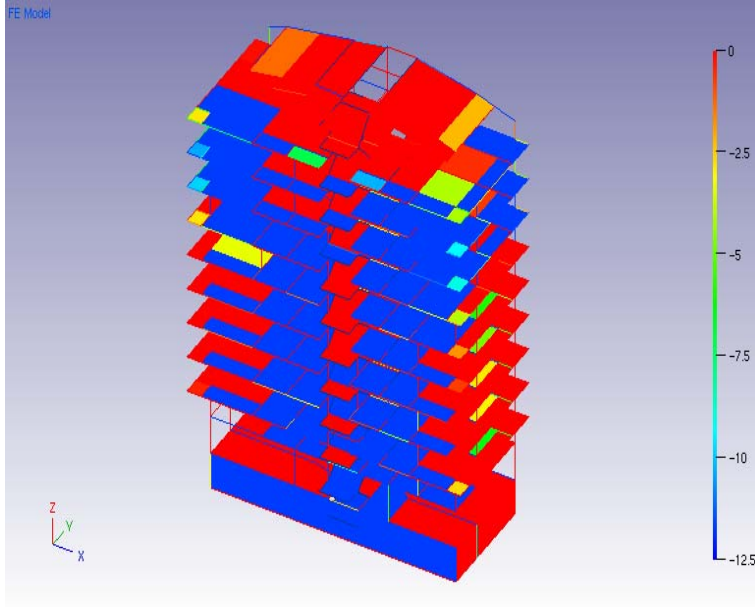




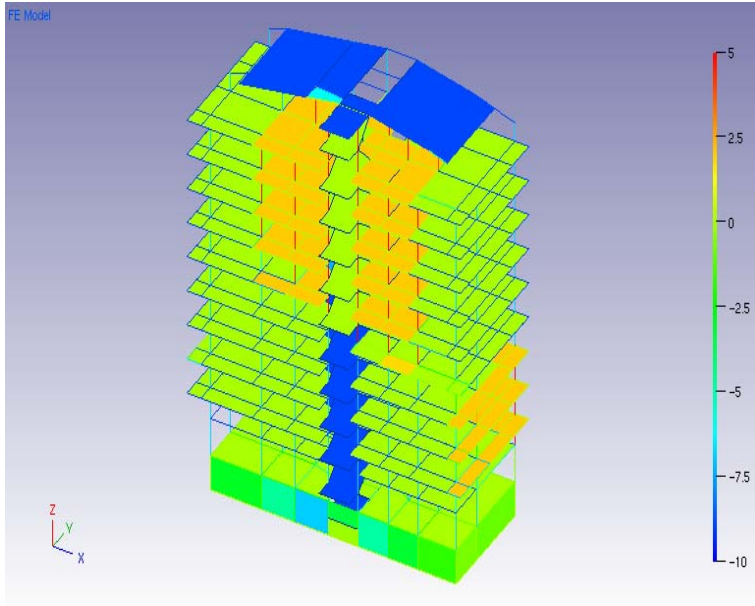


Şekil 4.61. Bina elemanlarının betonarme elastisite modülü (E) ve betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

Şekil 4.61’ de görüldüğü gibi elastisite modülü değişiminin hassaslığına ait maksimum değer 8. mod eşleşmesinde $Z = 11.00 - 13.75$ m kotları arasındaki 1556 no’ lu perde elemana aittir. Şekil 4.61’ de 1556 no’ lu elemana ait 8. mod eşleşmesi için normalleştirilmiş hassaslık değeri gösterilmektedir (0.00971). Kırmızı renkli perde hassaslığın maksimum değer aldığı 1559 no’ lu perdedir. Görüldüğü gibi birim hacim ağırlığı değişiminin hassaslığına ait maksimum değer 9. mod eşleşmesinde $Z = 30.00 - 30.50$ m kotları arasındaki 1578 no’ lu döşeme elemana aittir. 1578 no’ lu elemana ait 9. mod eşleşmesi için normalleştirilmiş hassaslık değeri de görülmektedir (-0.00862). Mavi renkli döşeme hassaslığın maksimum değer aldığı 1578 no’ lu döşemedir. Seçilmiş olan parametrelere göre sonlu eleman modeli güncellenir.



Şekil 4.62. Güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığı (E) değişimi



Şekil 4.63. Güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) değişimi

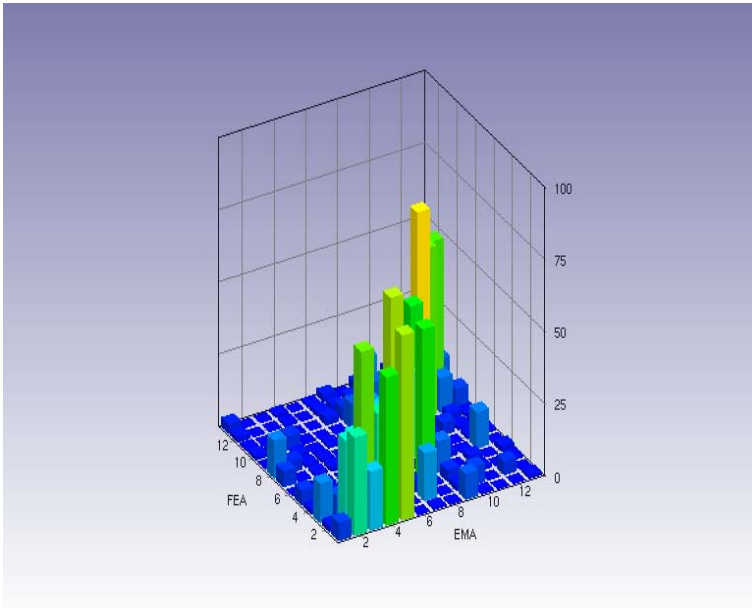
Şekil 4.62' de güncelleştirme sonrası betonarme elastisite modülünün elemanlardaki değişimi gösterilmektedir. Kırmızı renkli elemanlarda değişim sıfır olurken, mavi renkli elemanlarda değişim maksimum olmaktadır. Kısacası mavi renkli elemanlarda betonarme elastisite modülü $30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ olmuştur.

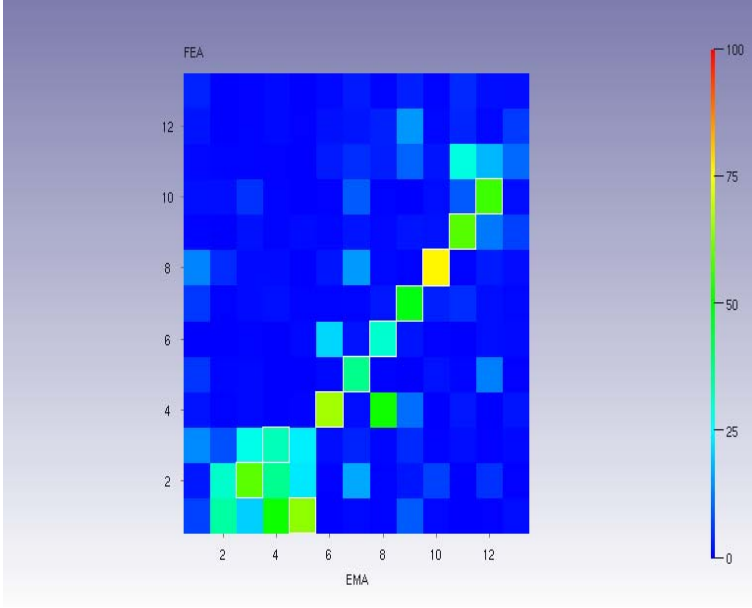
Şekil 4.63' de güncelleştirme sonrası betonarme birim hacim ağırlığının elemanlardaki değişimi gösterilmektedir. Sarı renkli elemanlarda değişim sıfır olurken, turuncu renkli

elemanlarda değişim pozitif değerde, yeşil ve mavi elemanlarda değişim negatif değerde olmaktadır.

Çizelge 4.20. Güncelleştirme sonrası MGK matrisi değerleri

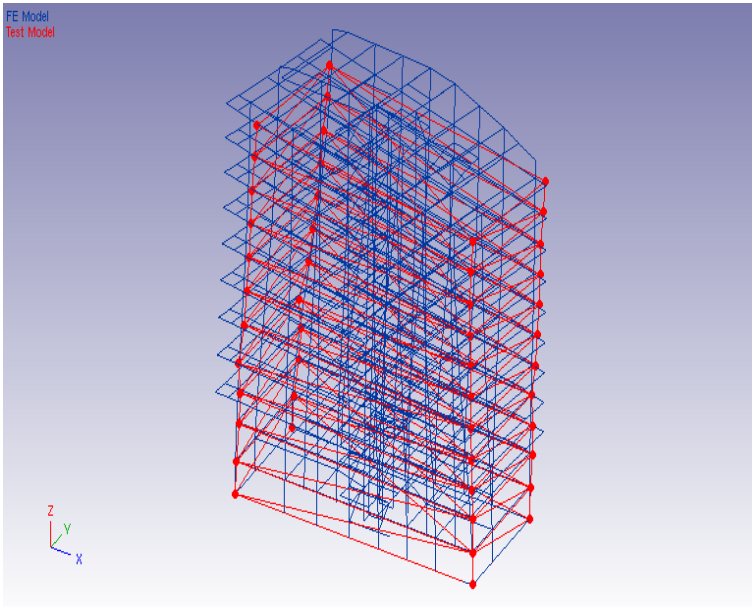
| SEM | Hz | DM | Hz | Fark | MGK |
|-----|------|----|-------|--------|------|
| 1 | 1.05 | 5 | 1.87 | -43.62 | 64.0 |
| 2 | 1.07 | 3 | 1.23 | -13.16 | 58.9 |
| 3 | 1.66 | 4 | 1.26 | 31.51 | 31.8 |
| 4 | 3.26 | 6 | 4.05 | -19.52 | 66.0 |
| 5 | 3.46 | 7 | 4.79 | -27.77 | 36.2 |
| 6 | 5.29 | 8 | 6.73 | -21.40 | 29.8 |
| 7 | 5.69 | 9 | 7.37 | -22.88 | 48.3 |
| 8 | 5.98 | 10 | 9.27 | -35.51 | 75.9 |
| 9 | 8.19 | 11 | 10.82 | -24.33 | 58.3 |
| 10 | 8.87 | 12 | 13.21 | -32.87 | 56.0 |



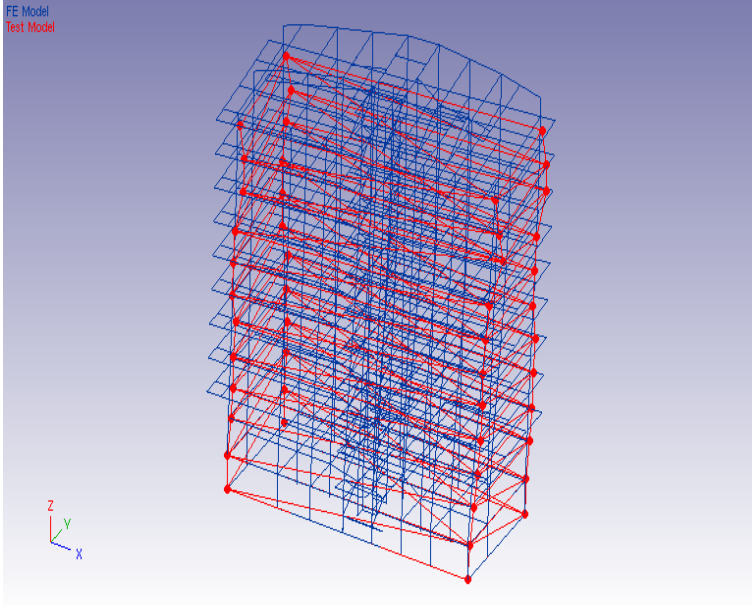


Şekil 4.64. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

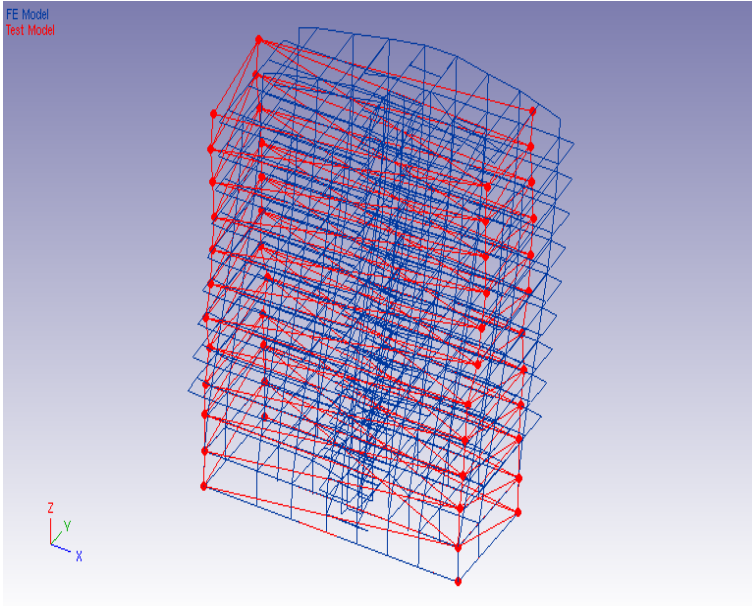
Şekil 4.64’ de mevcut bina için güncelleme sonrası MGK matrisinin 3-boyutlu grafiksel şekli verilmiştir. MGK değeri en fazla güncelleme öncesinde de olduğu gibi sayısal modelin 8. mod şekli ile deneysel modelin 10. mod şekli arasında çıkmıştır. Ancak bu değerde bir azalma meydana gelmiştir. Güncelleme öncesi 77.5 iken güncelleme sonrası 75.9’ a inmiştir.



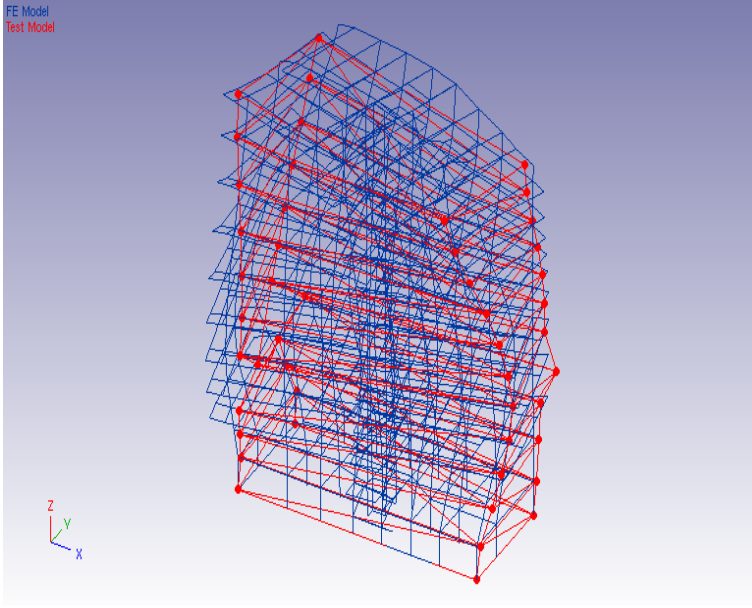
Şekil 4.65. Eşleşme-1 SEM1-DM5



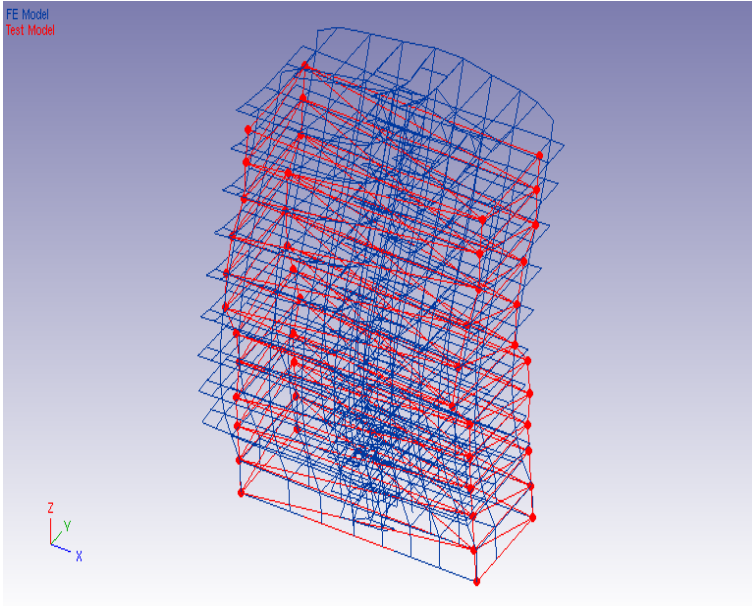
Şekil 4.66. Eşleşme-2 SEM2-DM3



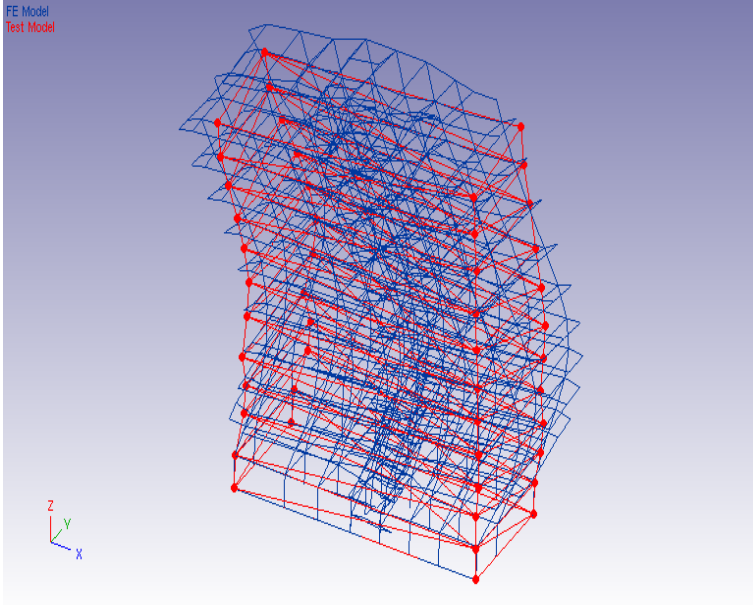
Şekil 4.67. Eşleşme-3 SEM3-DM4



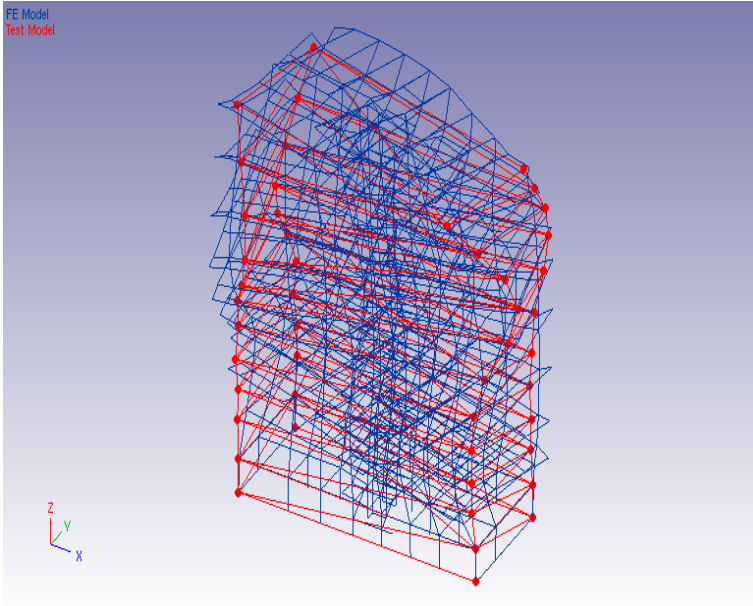
Şekil 4.68. Eşleşme-4 SEM4-DM6



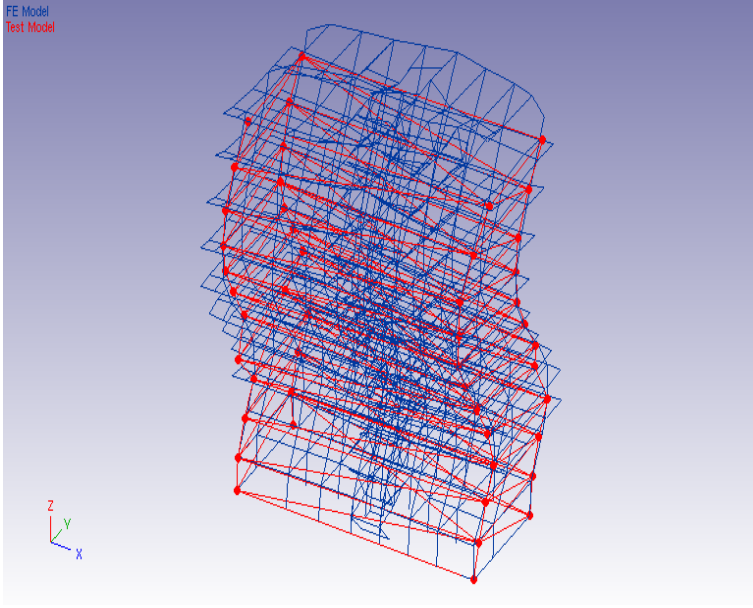
Şekil 4.69. Eşleşme-5 SEM5-DM7



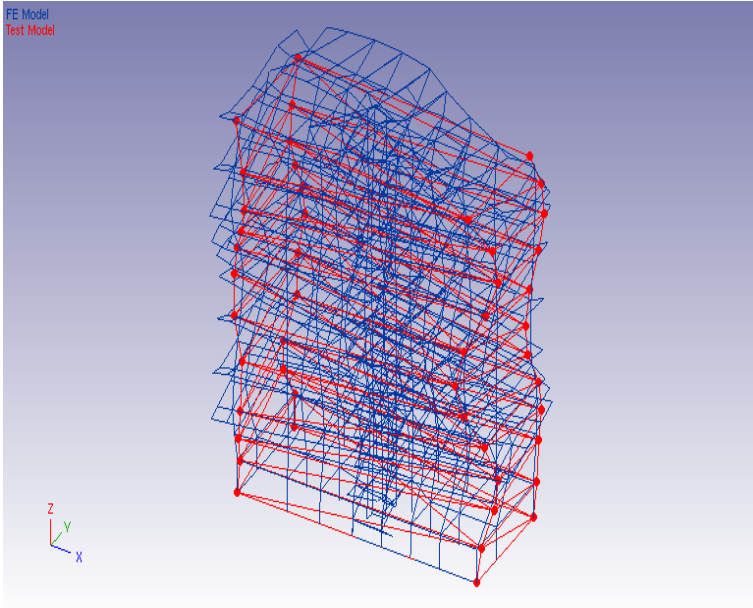
Şekil 4.70. Eşleşme-6 SEM6-DM8



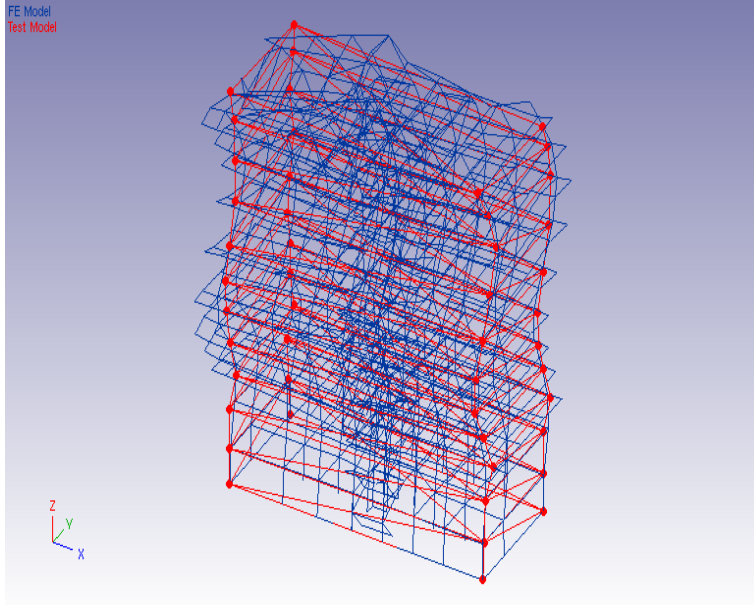
Şekil 4.71. Eşleşme-7 SEM7-DM9



Şekil 4.72. Eşleşme-8 SEM8-DM10



Şekil 4.73. Eşleşme-9 SEM9-DM11



Şekil 4.74. Eşleşme-10 SEM10-DM12

Çizelge 4.21. Güncelleştirme öncesi ve sonrası MGK değerleri

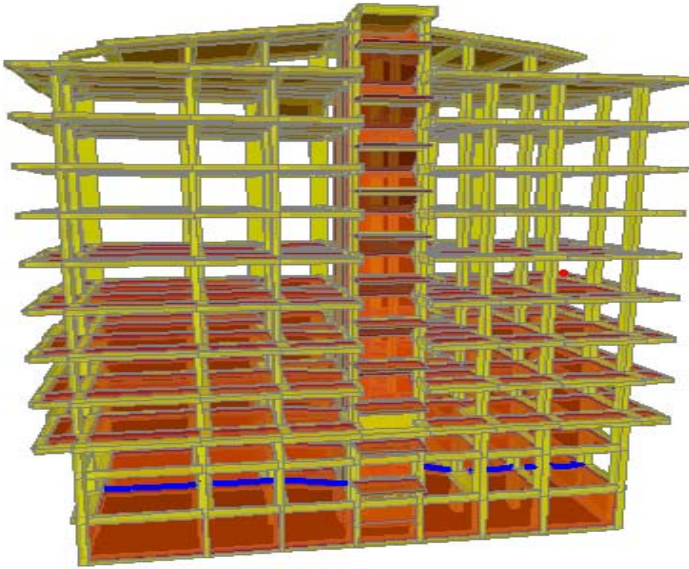
| Mod Eşleşmesi | | Güncelleştirme Öncesi MGK Değeri | Mod Eşleşmesi | | Güncelleştirme Sonrası MGK Değeri |
|---------------|----|----------------------------------|---------------|----|-----------------------------------|
| SEM | DM | | SEM | DM | |
| 1 | 5 | 67.0 | 1 | 5 | 64.0 |
| 2 | 3 | 54.4 | 2 | 3 | 58.9 |
| 3 | 4 | 34.7 | 3 | 4 | 31.8 |
| 4 | 6 | 65.5 | 4 | 6 | 66.0 |
| 5 | 7 | 37.2 | 5 | 7 | 36.2 |
| 6 | 8 | 26.7 | 6 | 8 | 29.8 |
| 7 | 9 | 48.1 | 7 | 9 | 48.3 |
| 8 | 10 | 77.5 | 8 | 10 | 75.9 |
| 9 | 11 | 57.5 | 9 | 11 | 58.3 |
| 10 | 12 | 52.9 | 10 | 12 | 56.0 |

Çizelge 4.21' de güncelleme öncesi ve sonrası mod eşleşmeleri ve MGK değerleri gösterilmektedir.

Model güncellemesi yapıldıktan sonra bina elemanlarında (E) ve (ρ)' nun en fazla değişim gösterdiği düzlemler veya kotlar belirlenir.

Çizelge 4.22. Kirişlerde betonarme elastisite modülünün en fazla değişim gösterdiği kotlar ($E = 30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$)

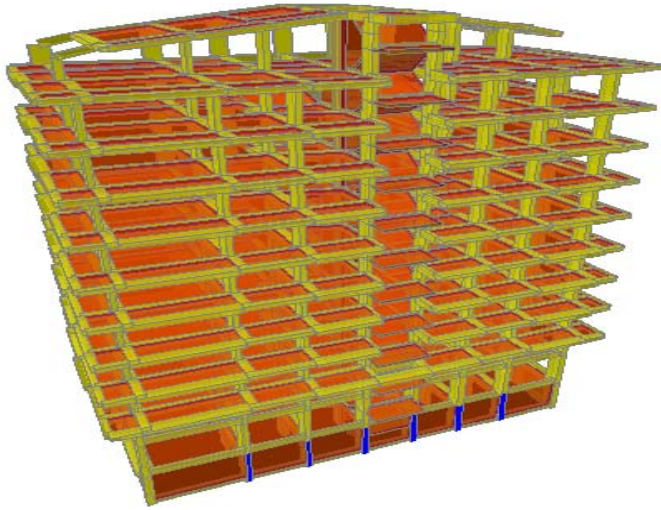
| Kot | Kattaki Toplam Kiriş Sayısı | Değişen Kiriş Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|-----------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 0.00 | 47 | 18 | %38.30 |
| Z = 3.00 | 59 | 14 | %23.73 |
| Z = 5.50 | 100 | 20 | %20.00 |
| Z = 8.25 | 96 | 18 | %18.75 |
| Z = 11.00 | 96 | 17 | %17.71 |
| Z = 13.75 | 96 | 17 | %17.71 |
| Z = 16.50 | 97 | 18 | %18.56 |
| Z = 19.25 | 97 | 16 | %16.48 |
| Z = 22.00 | 97 | 23 | %23.71 |
| Z = 24.75 | 97 | 31 | %31.96 |
| Z = 27.50 | 99 | 18 | %18.18 |



Şekil 4.75. Binada kirişlerin betonarme elastisite modülü (E)' nün en çok değişim gösterdiği düzlem

Çizelge 4.23. Kolonlarda betonarme elastisite modülünün en fazla değişim gösterdiği kotlar ($E = 30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$) $Y = 1.75 \text{ m}$ düzlemi

| Kot | Kattaki Toplam Kolon Sayısı | Değişen Kolon Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = -2.75 – 0.00 | 10 | 8 | %80 |
| Z = 0.00 – 3.00 | 10 | 5 | %50 |
| Z = 3.00 – 5.50 | 10 | 4 | %40 |
| Z = 5.50 – 8.25 | 10 | 4 | %40 |
| Z = 8.25 – 11.00 | 10 | 2 | %20 |
| Z = 11.00 – 13.75 | 10 | 2 | %20 |
| Z = 13.75 – 16.50 | 10 | 2 | %20 |
| Z = 16.50 – 19.25 | 10 | 3 | %30 |
| Z = 19.25 – 22.00 | 10 | 5 | %50 |
| Z = 22.00 – 24.75 | 10 | 6 | %60 |
| Z = 24.75 – 27.50 | 10 | 6 | %60 |

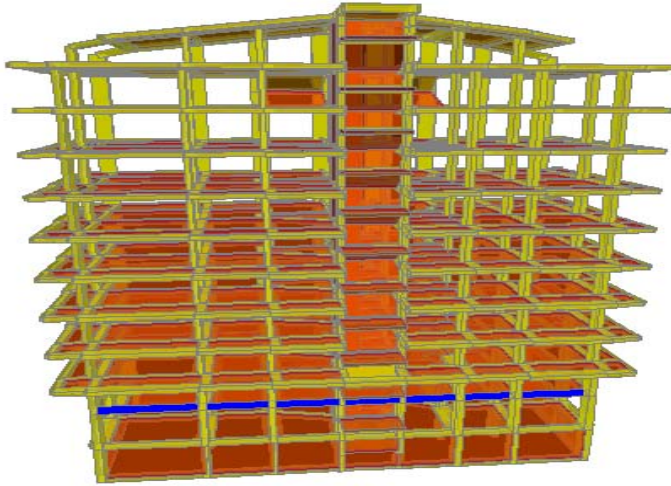


Şekil 4.76. Binada kolonların betonarme elastisite modülü (E)' nün en çok değişim gösterdiği düzlem

Çizelge 4.22' den görüldüğü gibi $Z = 0.00 \text{ m}$ kotundaki 47 kirişten 18 kirişte betonarme elastisite modülü $34 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ' den $30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ' ye düşmüştür. $Z = 0.00 \text{ m}$ kotunda ise en fazla $X = 1.5 - 27.9 \text{ m}$; $Y = 5.55 \text{ m}$ aksında 6 kiriş değişmiştir. Çizelge 4.23' den görüldüğü gibi $Y = 1.75 \text{ m}$ düzleminde $Z = -2.75-0.00 \text{ m}$ kotundaki 10 adet kolonun 8' inin betonarme elastisite modülü $34 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ' den $30 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ' ye düşmüştür.

Çizelge 4.24. Kirişlerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2275.9 \text{ kg/m}^3$)

| Kot | Kattaki Toplam Kiriş Sayısı | Değişen Kiriş Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|-----------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 3.00 | 59 | 53 | %89.83 |
| Z = 5.50 | 100 | 80 | %80.00 |
| Z = 8.25 | 96 | 65 | %67.71 |
| Z = 11.00 | 96 | 78 | %81.25 |
| Z = 13.75 | 96 | 78 | %81.25 |
| Z = 16.50 | 97 | 59 | %60.82 |
| Z = 19.25 | 97 | 46 | %47.42 |
| Z = 22.00 | 97 | 41 | %42.27 |
| Z = 24.75 | 97 | 40 | %41.24 |
| Z = 27.50 | 99 | 41 | %41.41 |



Şekil 4.77. Binada kirişlerin betonarme birim hacim ağırlığı (ρ)' nun en çok değişim gösterdiği düzlem

Çizelge 4.25. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2635.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 1.75 m düzlemi

| Kot | Kattaki Toplam Kolon Sayısı | Değişen Kolon Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 0.00 – 3.00 | 10 | 3 | %30 |
| Z = 13.75 – 16.50 | 10 | 4 | %40 |
| Z = 16.50 – 19.25 | 10 | 7 | %70 |
| Z = 19.25 – 22.00 | 10 | 8 | %80 |
| Z = 22.00 – 24.75 | 10 | 8 | %80 |
| Z = 24.75 – 27.50 | 10 | 8 | %80 |
| Z = 27.50 – 31.00 | 6 | 6 | %100 |

Çizelge 4.26. Kolonlarda betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 2328.5 \text{ kg/m}^3$) Y = 12.75 m düzlemi

| Kot | Kattaki Toplam Kolon Sayısı | Değişen Kolon Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Z = 0.00 – 3.00 | 9 | 7 | %77.77 |
| Z = 3.00 – 5.50 | 8 | 5 | %62.50 |
| Z = 5.50 – 8.25 | 8 | 5 | %62.50 |
| Z = 8.25 – 11.00 | 8 | 5 | %62.50 |
| Z = 11.00 – 13.75 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 13.75 – 16.50 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 16.50 – 19.25 | 8 | 8 | %100 |
| Z = 19.25 – 22.00 | 8 | 7 | %87.50 |
| Z = 22.00 – 24.75 | 8 | 6 | %75.00 |
| Z = 24.75 – 27.50 | 12 | 9 | %75.00 |
| Z = 27.50 – 31.00 | 8 | 8 | %100 |

Çizelge 4.27. Döşemelerde betonarme birim hacim ağırlığının en fazla değişim gösterdiği kotlar ($\rho = 3339.58 \text{ kg/m}^3$)

| Kot | Kattaki Toplam Döşeme Sayısı | Değişen Döşeme Sayısı | Değişim Yüzdesi (Eleman Sayısına göre) |
|------------------|------------------------------|-----------------------|--|
| Z = 5.5 | 36 | 6 | %16.67 |
| Z = 8.25 | 36 | 9 | %25.00 |
| Z = 11.00 | 36 | 5 | %13.89 |
| Z = 16.50 | 36 | 11 | %30.56 |
| Z = 19.25 | 36 | 16 | %44.44 |
| Z = 22.00 | 36 | 16 | %44.44 |
| Z = 24.75 | 36 | 18 | %50.00 |
| Z = 27.50 | 35 | 17 | %48.57 |

Çizelge 4.24' ten görüldüğü gibi $Z = 3.0$ m kotundaki 59 kirişten 53 kirişte birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 ' ten 2275.9 kg/m^3 ' e düşmüştür. $Z = 3.0$ kotunda ise en fazla $X = 1.5 - 27.9$ m; $Y = 1.75$ m aksında 7 kiriş değişmiştir. Çizelge 6.25' ten görüldüğü gibi $Y = 1.75$ m düzleminde $Z = 27.50 - 31.00$ m kotundaki 6 adet kolonun 6' sının da birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 ' ten 2635.5 kg/m^3 ' e yükselmiştir. Çizelge 4.26' da ise $Z = 11.00 - 19.25$ m ile $Z = 27.50 - 31.00$ kotları arasındaki tüm kolonların birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 ' ten 2328.5 kg/m^3 ' e inmiştir. Çizelge 4.27' de ise $Z = 24.75$ m kotundaki 36 döşemeden 18' inin birim hacim ağırlığı 3273 kg/m^3 ' ten 3339.58 kg/m^3 ' e yükselmiştir. $Z = 24.75$ m kotunda ise en fazla $X = 10.6 - 23.8$ m; $Y = 0.0 - 12.75$ m aksında 21 döşeme değişmiştir.

4.2. Çelik Deney Yapısının Deneysel İnceleme Sistemi ile İncelenmesi

4.2.1. Yapının Özellikleri

MF-046 no' lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında yapılmış olan dört katlı, her iki yönde iki açıklıklı çelik deney yapısı, inşaat mühendisliği deney laboratuvarı'nda bulunmaktadır. Yapı 5 x 3 x 4.6 m boyutlarında olup her kat yüksekliği 1.15 m , enine açıklık 2.5 m , boyuna açıklık 1.5 m ' dir.

Çizelge 4.28. Katlara göre kütle dağılımı

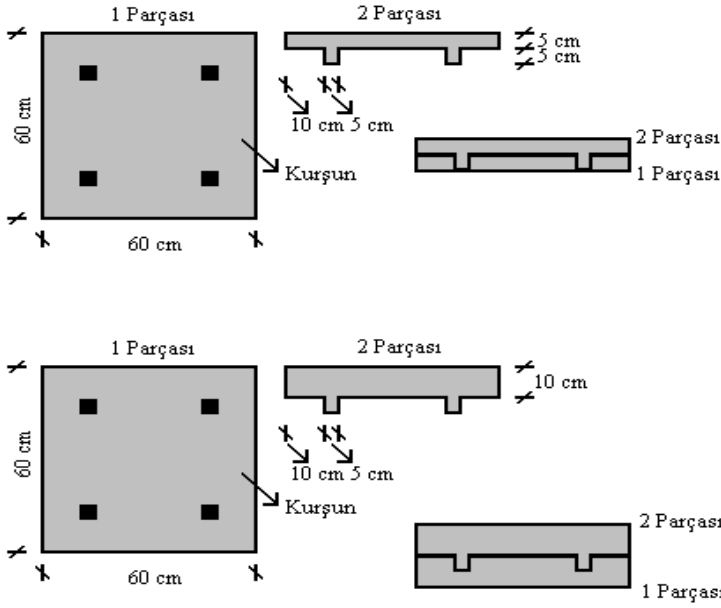
| Kat no | Ağırlık türü | Katlarda her açıklık için kurşun kütle ve yük çerçevesi ağırlıkları (kg) | | | | Toplam kat kütlesi (kg) |
|--------|--------------|--|-------|-------|-------|-------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | Çerçeve | 44.2 | 30.8 | 44.2 | 30.8 | 150 |
| | Kurşun | 793.3 | 793 | 793.4 | 793.3 | 3172.9 |
| 2 | Çerçeve | 44.2 | 30.8 | 44.2 | 30.8 | 150 |
| | Kurşun | 600.3 | 600.3 | 600.5 | 600.4 | 2401.5 |
| 3 | Çerçeve | 44.2 | 30.8 | 44.2 | 30.8 | 150 |
| | Kurşun | 601 | 599.5 | 600.2 | 600.2 | 2400.7 |
| 4 | Çerçeve | 44.2 | 30.8 | 44.2 | 30.8 | 150 |
| | Kurşun | 391 | 391 | 390.9 | 391 | 1564 |

İstenen ağırlıkta kütleyi en küçük boyutlarda üretmek amacıyla kurşun malzeme kullanılmıştır ($\rho = 11.34 \text{ kg/m}^3$).

Yükleri oluşturmak amacıyla birinci katta 0.6 x 0.6 x 0.1 m' lik iki tane kurşun plak kullanılmaktadır.

İkinci ve üçüncü katlarda bir tane 0.6 x 0.6 x 0.05 m boyutlarında, bir tane de 0.6 x 0.6 x 0.1 m boyutlarında kurşun plaklar kullanılmaktadır.

Dördüncü katta ise iki tane 0.6 x 0.6 x 0.1 m' lik kurşun plaklar kullanılmaktadır. Bu kütleler birbirine geçecek ve üstten vinç kancasına bağlanacak şekilde tasarlanıp yük çerçevelerine kelepçeler vasıtasıyla tutturulmuştur (Şekil 4.78).



Şekil 4.78. Kurşun kütle detayları

Çelik deney yapısının kolon kesitleri IPG200, kiriş kesitleri I80, temel kiriş kesitleri IPG260 ve döşeme çapraz elemanları kutu kesit 70 x 50 x 3.2 mm olarak boyutlandırılmıştır. Yapının düşeydeki dört düzlemi için her bir açıklıkta kablolar kullanılmıştır. Kullanılan bu kabloların çapı 14 mm, bu kabloları uygun gergi elemanlarının çapı da 16 mm seçilmiştir.

Kolon ayağının temele bağlantısı için, 475 x 260 x 10 mm boyutunda levhalar kullanılarak kolon ayağı ankrajlanmıştır.

Kolon-kolon bağlantısı için, birbirlerine bağlanacak iki kolonun birleşim noktasına iki adet 470 x 240 x 10 mm boyutunda levhalar kaynaklanmıştır.

Kolon-kiriş bağlantısı için, kirişin kolona başlık ve gövde yönlerindeki bağlantı levhalarının boyutları farklıdır. Kirişin kolona başlık yönündeki bağlantısı için 235 x 153 x 10 mm boyutunda levha kaynaklanmıştır. Kirişin kolona gövde yönündeki bağlantısı için 235 x 133 x 10 mm boyutunda levha kaynaklanmıştır. Kurşun kütleler, açıklıklara I80 profilleri üzerinde yerleştirilmiştir. Yük aktarma şekli asimetriktir. Yük aktarma biçimi, bir açıklıkta boyuna kirişlere diğer açıklıkta enine kirişlere yük gelecek şekilde oluşturulmuştur. Kat diyagonalleri kutu kesit seçilmiştir. Kiriş ve kolonların birleşim yerlerine yakın köşe levhaları kaynaklanmıştır. Kaynaklanan bu levhalara öncelikle gergi elemanları geçirilmiş daha sonra da bu gergi elemanlarına kablo elemanlar bağlanmıştır.

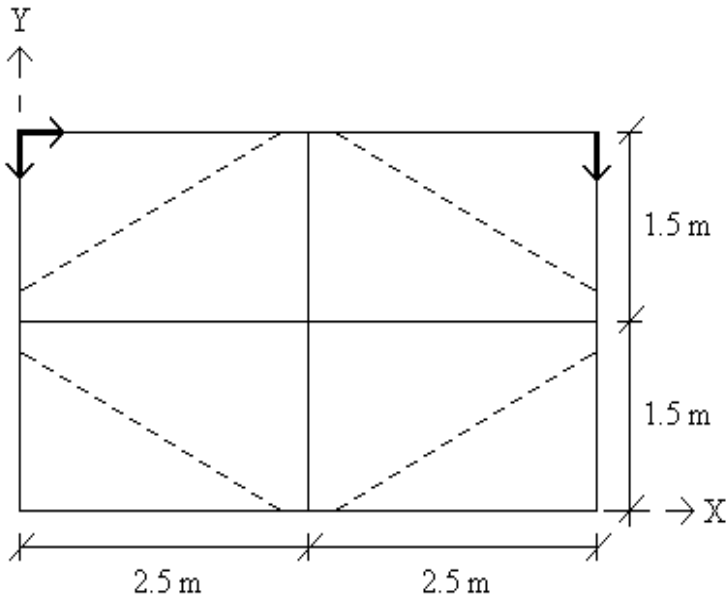
Çelik deney yapısı modellenirken elastisite modülü $E = 2 \cdot 10^5$ MPa , malzeme yoğunluğu $\rho = 7.85$ kg/m³ , poisson oranı $\mu = 0.3$ alınmıştır.



Şekil 4.79. Çelik deney yapısı

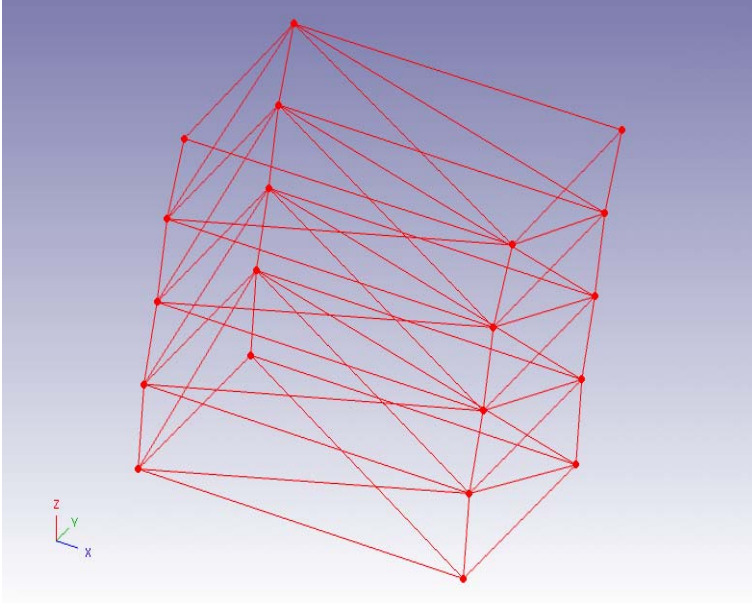
4.2.2. Deneysel Ölçüm ve Sonuçları

Şekil 4.80' deki düzene göre ölçüm yapılmıştır. Miktotremor etkisi için 18 ton= 176.58 KN ağırlıklı taşıt (itfaiye aracı) 20–30 km/saat hızla laboratuar binasının etrafında dönmüştür. Bu ölçümler sırasında bir adet sismometre yapının temel düzlemine konulmuştur.

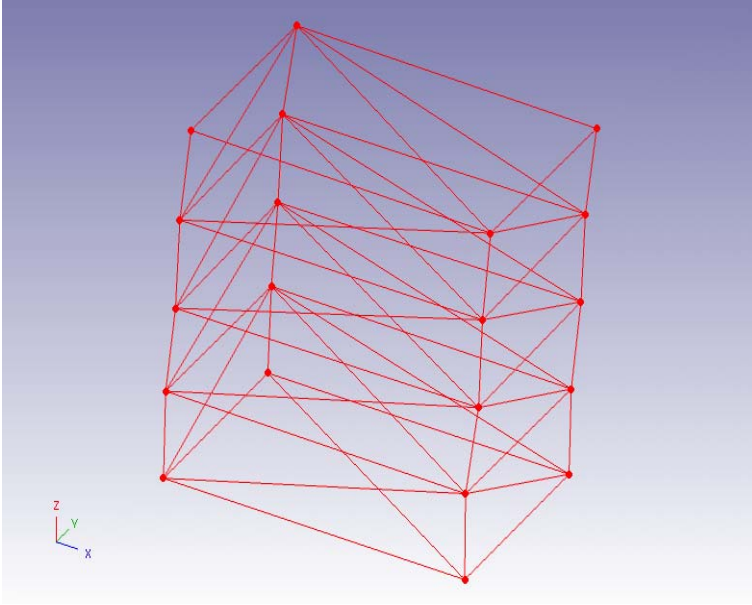


Şekil 4.80. Yapıya ivmeölçerlerin yerleştirilme düzeni

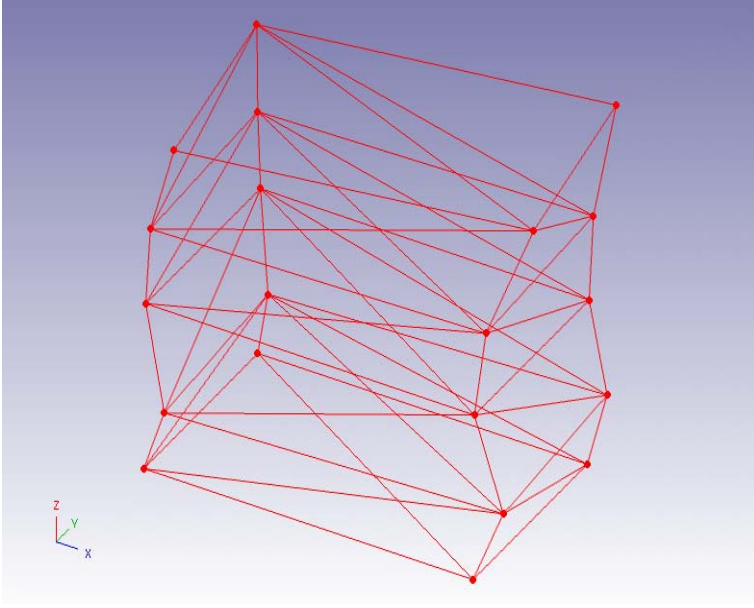
Binanın deneysel modelinden mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenir.



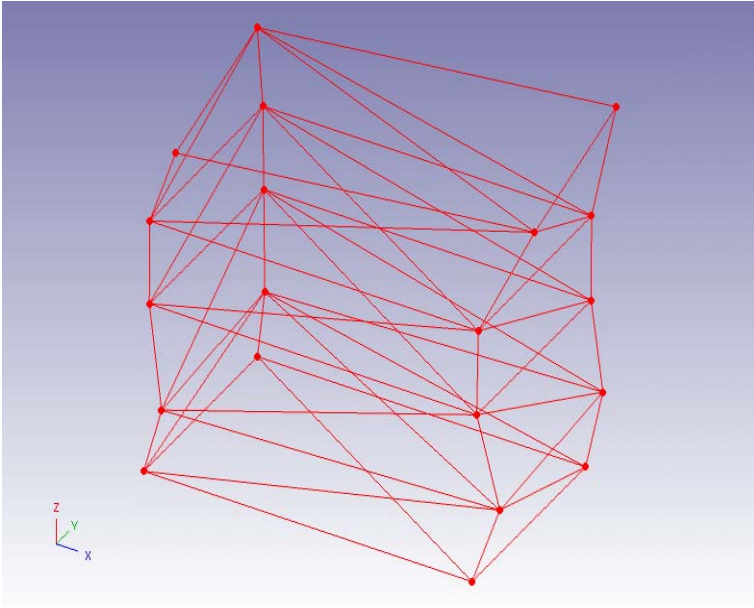
Şekil 4.81. DM 1. mod şekli



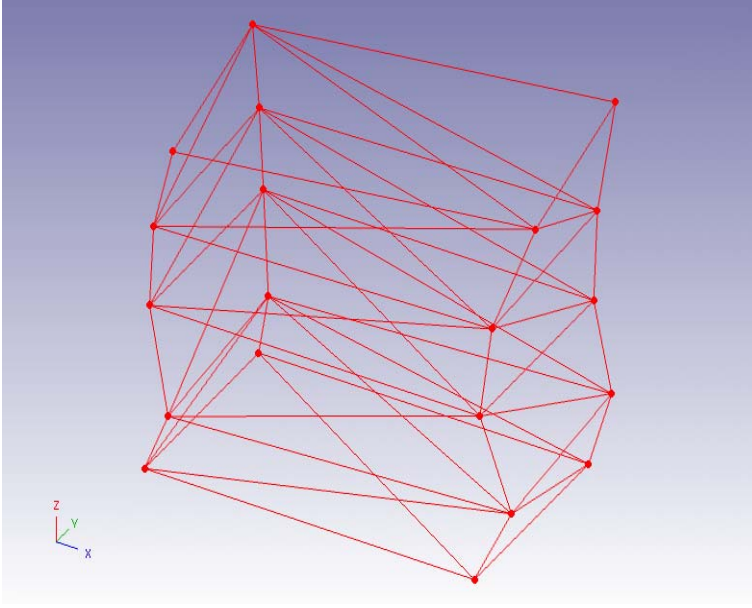
Şekil 4.82. DM 2. mod şekli



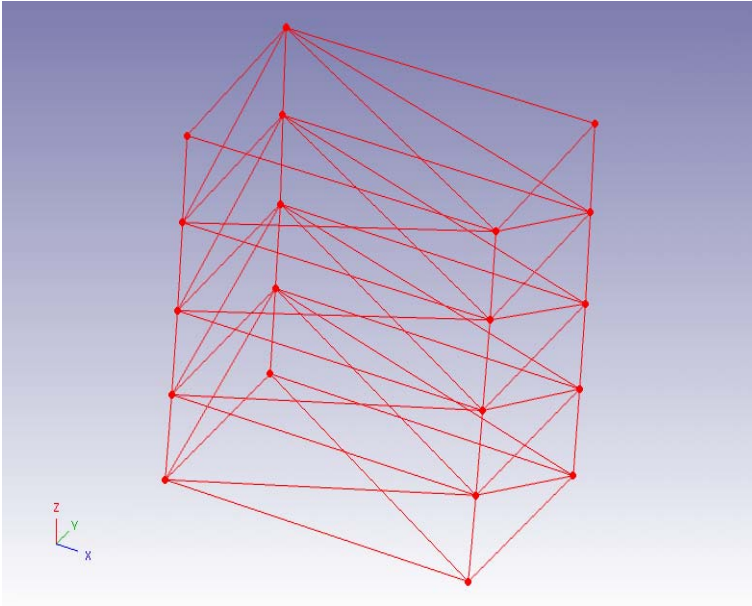
Şekil 4.83. DM 3. mod şekli



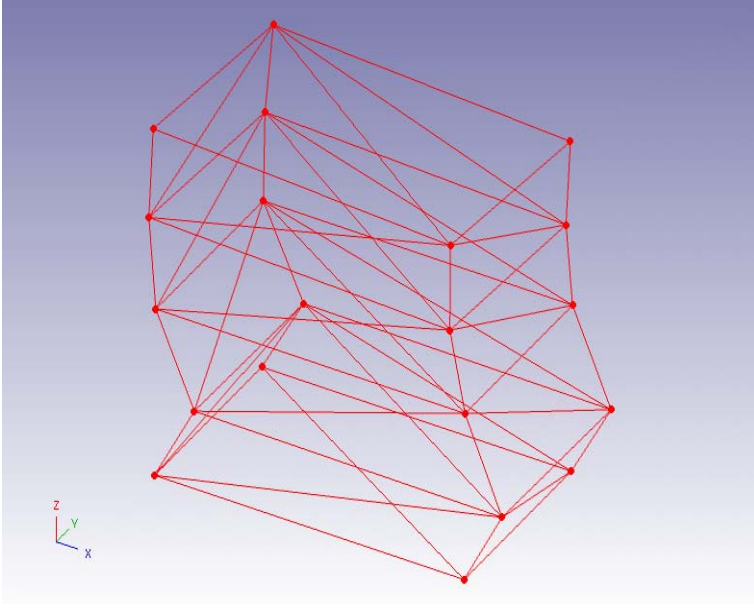
Şekil 4.84. DM 4. mod şekli



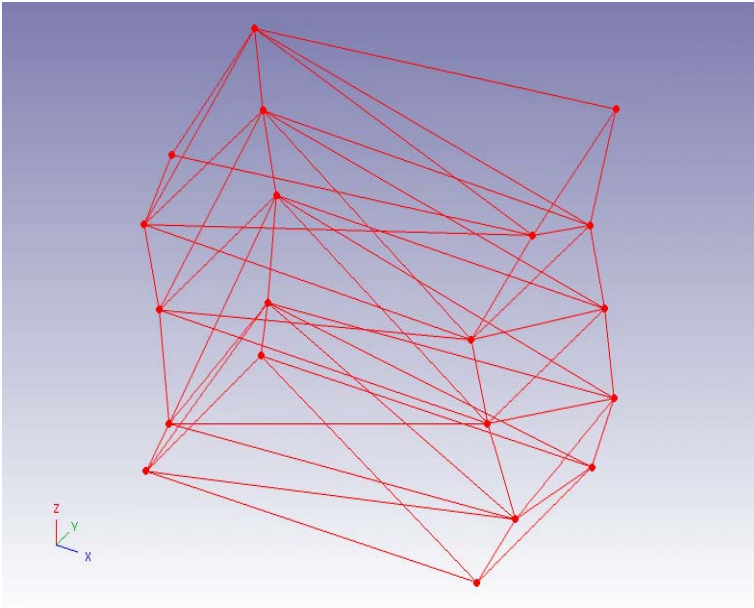
Şekil 4.85. DM 5. mod şekli



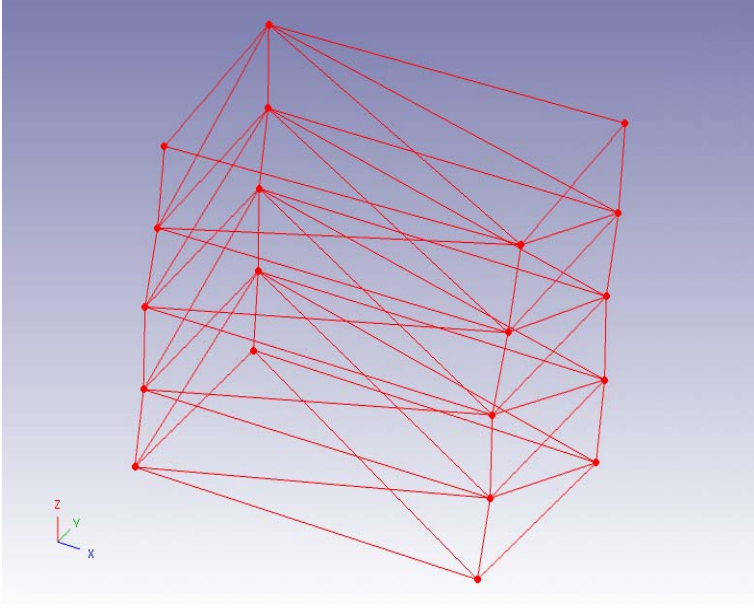
Şekil 4.86. DM 6. mod şekli



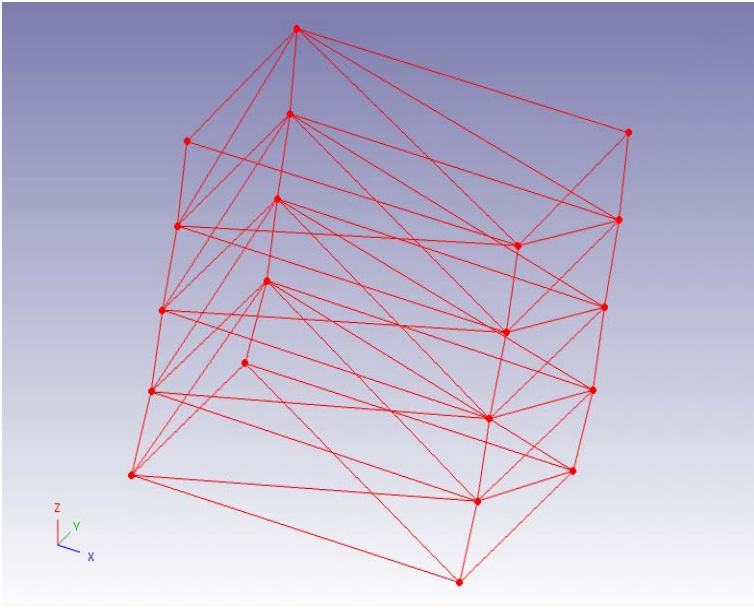
Şekil 4.87. DM 7. mod şekli



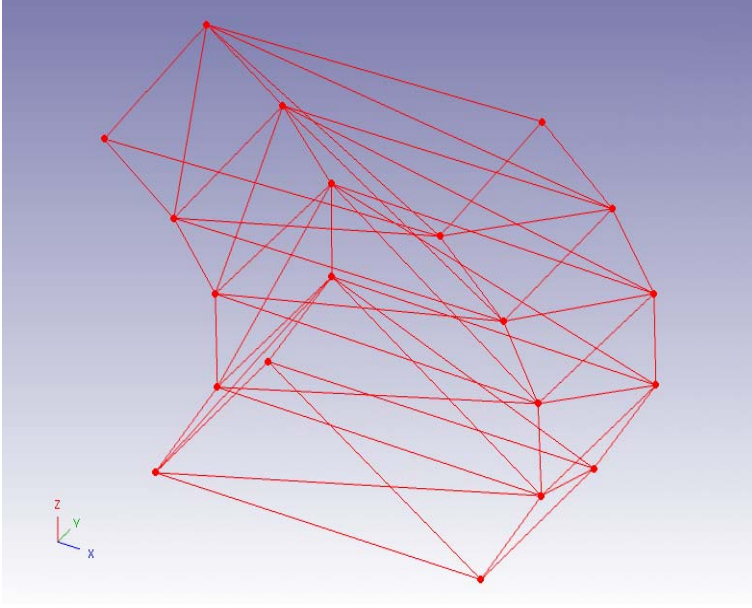
Şekil 4.88. DM 8. mod şekli



Şekil 4.89. DM 9. mod şekli



Şekil 4.90. DM 10. mod şekli



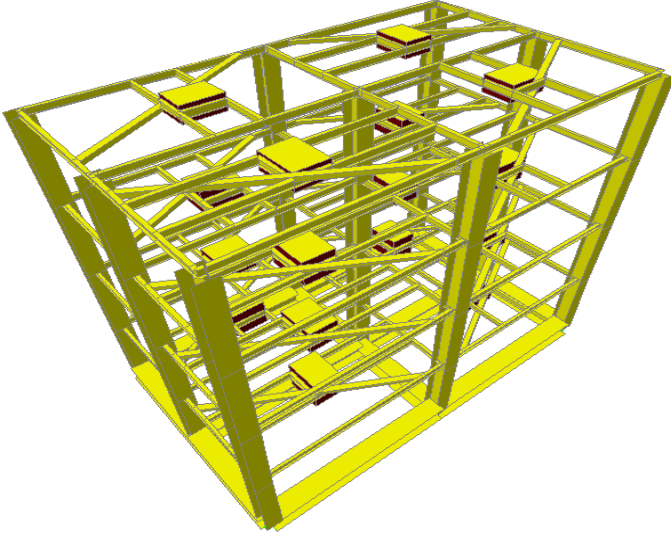
Şekil 4.91. DM 11. mod şekli

Çizelge 4.29. Deneysel modelin doğal titreşim periyotları

| Mod Şekli | Periyot (sn) |
|-----------|--------------|
| 1 | 0.3857 |
| 2 | 0.3212 |
| 3 | 0.2497 |
| 4 | 0.1428 |
| 5 | 0.1248 |
| 6 | 0.0932 |
| 7 | 0.0677 |
| 8 | 0.0624 |
| 9 | 0.0490 |
| 10 | 0.0471 |
| 11 | 0.0416 |

4.2.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz Sonuçları

Modelde toplam 432 kiriş-kolon eleman (50 mm uzunluklu 96 tane uzay çubuk sonlu eleman kiriş-kolon bağlantısı rijitliğini değerlendirmek için kullanılmıştır), 16 plak eleman (modellemede kullanılan kurşun kütleler) ve 301 düğüm vardır.



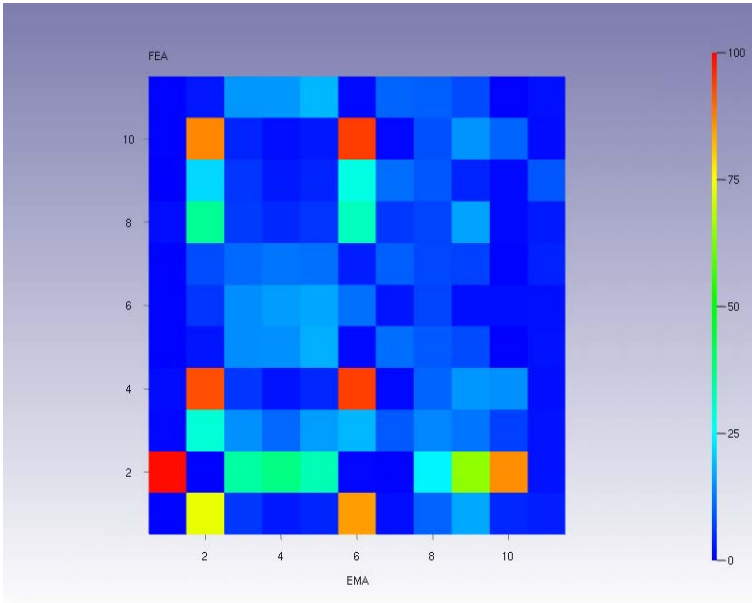
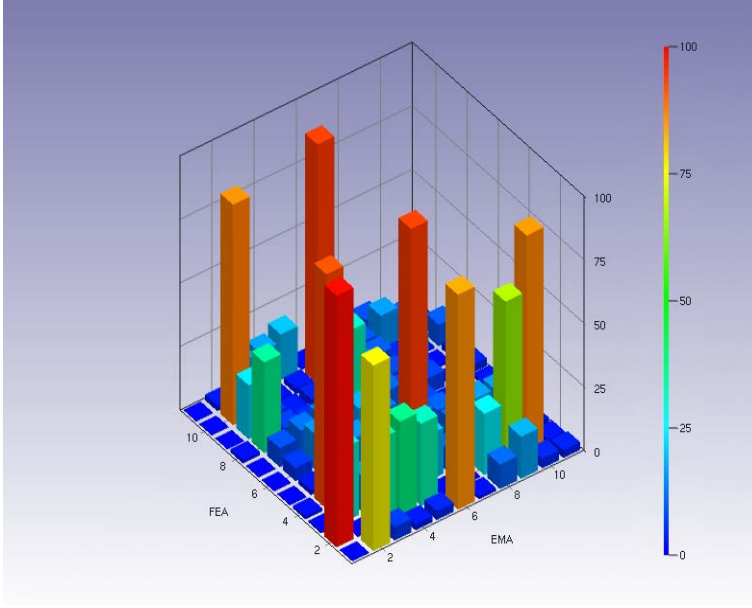
Şekil 4.92. Yapının sonlu eleman modeli

Çizelge 4.30. Sonlu eleman modelinin doğal titreşim periyotları

| Mod Şekli | Periyot (sn) |
|-----------|--------------|
| 1 | 0.3130 |
| 2 | 0.2800 |
| 3 | 0.2700 |
| 4 | 0.2670 |
| 5 | 0.2460 |
| 6 | 0.2400 |
| 7 | 0.2360 |
| 8 | 0.2360 |
| 9 | 0.2310 |
| 10 | 0.2200 |
| 11 | 0.2180 |

(3.123) formülüne göre Modal güvence kriteri (MGK) matrisi oluşturulur.

$$MGK(\psi_{sem}, \psi_{dm}) = \frac{|\{\psi_{sem}\}^T \{\psi_{dm}\}|^2}{(\{\psi_{sem}\}^T \{\psi_{sem}\})(\{\psi_{dm}\}^T \{\psi_{dm}\})}$$

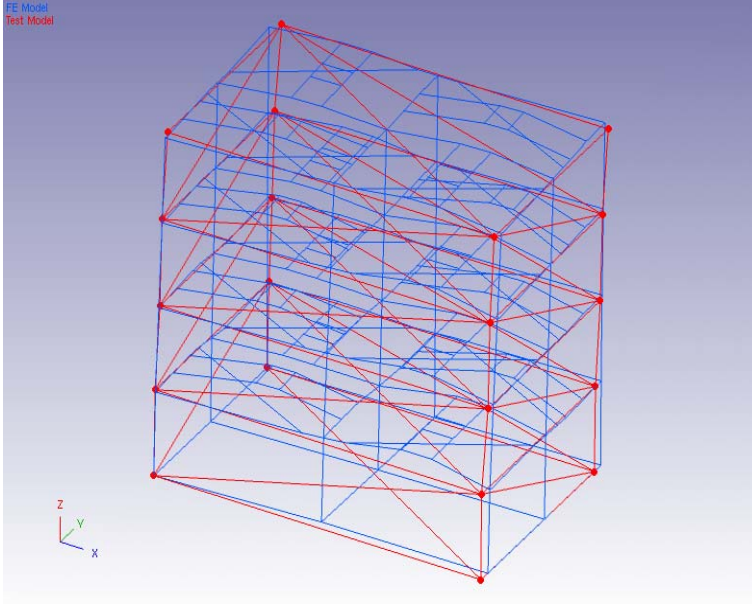


Şekil 4.93. Güncelleştirme öncesi MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

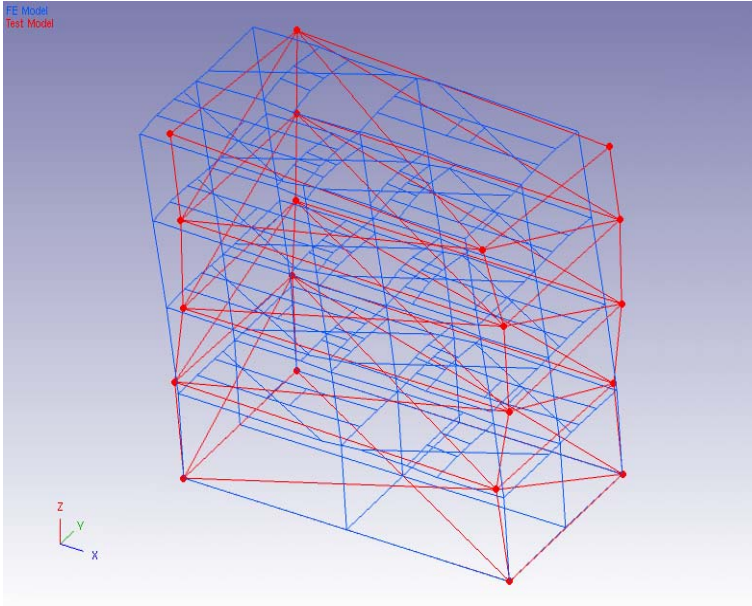
Şekil 4.93' de mevcut yapı için bulunmuş MGK matrisinin 3-boyutlu ve düzlem grafiksel şekilleri verilmiştir. Sayısal modele ait modlar (FEA) ile deneysel modele ait modlar (EMA) % olarak karşılaştırılmıştır. Burada özdeş mod olması durumu 100 ile gösterilmektedir. MGK değeri en fazla sayısal modelin 1. mod şekli ile deneysel modelin 2. mod şekli arasında çıkmıştır.

Deneysel model ile sonlu eleman modelinin mod şekilleri eşleştirilir (sadece yapısal titreşim modları dikkate alınmıştır).

Mavi renkle gösterilen SEM, kırmızı renkle gösterilen DM' dir.



Şekil 4.94. Eşleşme-1 SEM1-DM2



Şekil 4.95. Eşleşme-2 SEM2-DM3

Çizelge 4.31. Güncelleştirme öncesi MGK matrisi değerleri

| SEM | Hz | DM | Hz | Fark | MGK |
|-----|------|----|------|--------|------|
| 1 | 3.20 | 2 | 3.11 | 2.91 | 72.9 |
| 2 | 3.57 | 3 | 4.00 | -10.77 | 34.2 |

Binanın sayısal (SEM) ile deneysel modelinin (DM) tepki karşılaştırması için binanın doğal titreşim mod şekilleri, periyotları ve sönüm oranları seçilir.

Korelasyon analizi yapılır. Bu analiz, analitik ve deneysel olarak elde edilen modal parametreler arasındaki benzerlik ve farklılıkları nicelik ve nitelik olarak inceler. Kısaca, korelasyon analizinde analitik ve deneysel olarak elde edilen tepkiler analiz edilir.

Güncelleme için parametre seçimi yapılır. Ele alınan yapıda güncelleme parametresi olarak kiriş-kolon bağlantı elemanlarının (50 mm uzunluklu) her iki lokal yöndeki atalet momentleridir (I_2 , I_3) seçilmiştir.

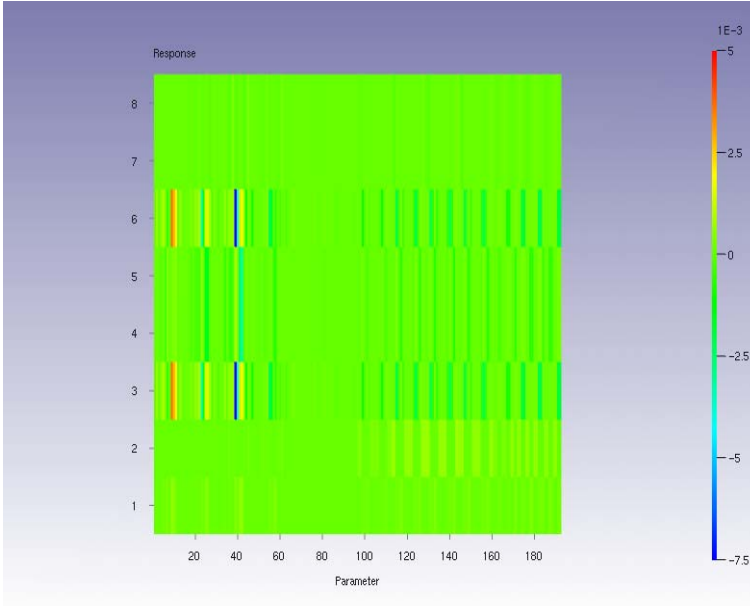
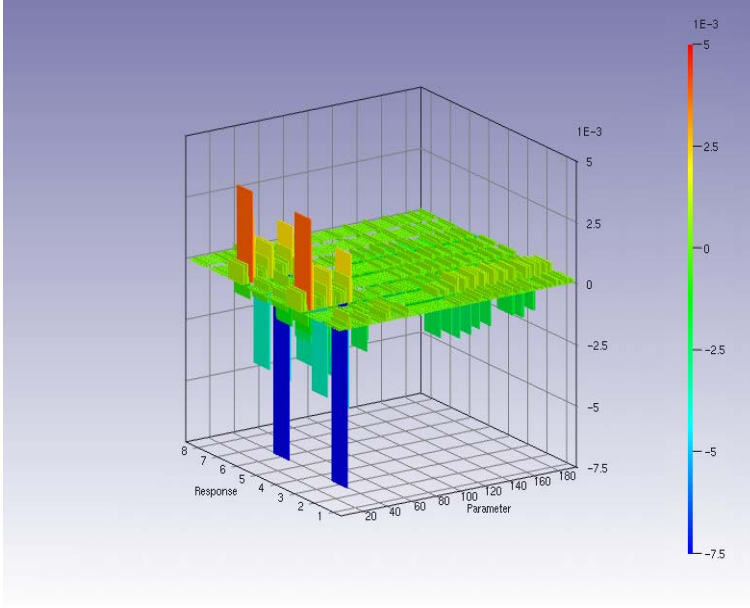
4.2.4. (I_2 , I_3) Lokal Atalet Momenti Parametresine Göre Güncelleme

Her iki lokal yöndeki atalet momentleri (I_2 , I_3) için güncelleştirme aralığı belirlenir.

Çizelge 4.32. Atalet momentleri (I_2 , I_3) için güncelleştirme aralığı

| Güncelleme Parametresi | Alt Sınır (m^4) | Üst Sınır (m^4) |
|--|------------------------|------------------------|
| I_2 (lokal 2 eksenine göre atalet momenti) | $7.319 \cdot 10^{-8}$ | $1.4638 \cdot 10^{-7}$ |
| I_3 (lokal 3 eksenine göre atalet momenti) | $7.848 \cdot 10^{-7}$ | $1.5696 \cdot 10^{-6}$ |

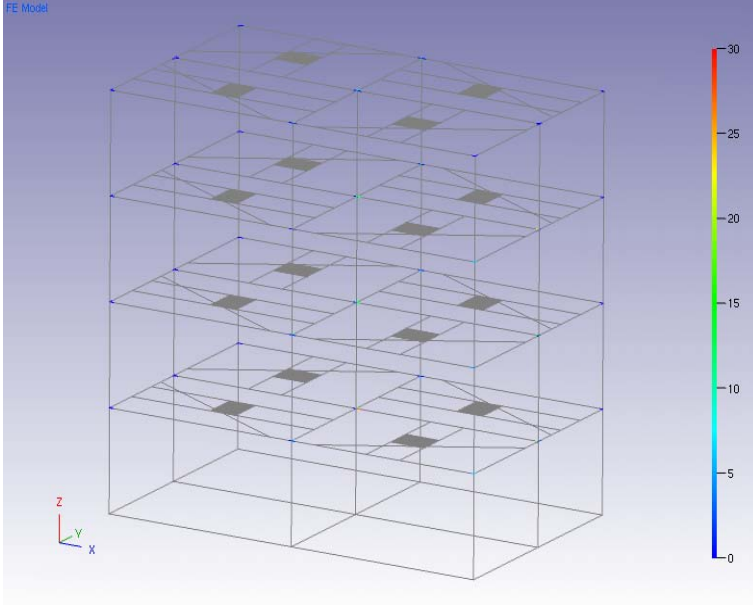
Seçilen parametreye göre hassaslık analizi yapılır. Hassaslık analizi neticesinde binanın elemanlarındaki parametre değişimleri ve hassas bölgeleri belirlenir.



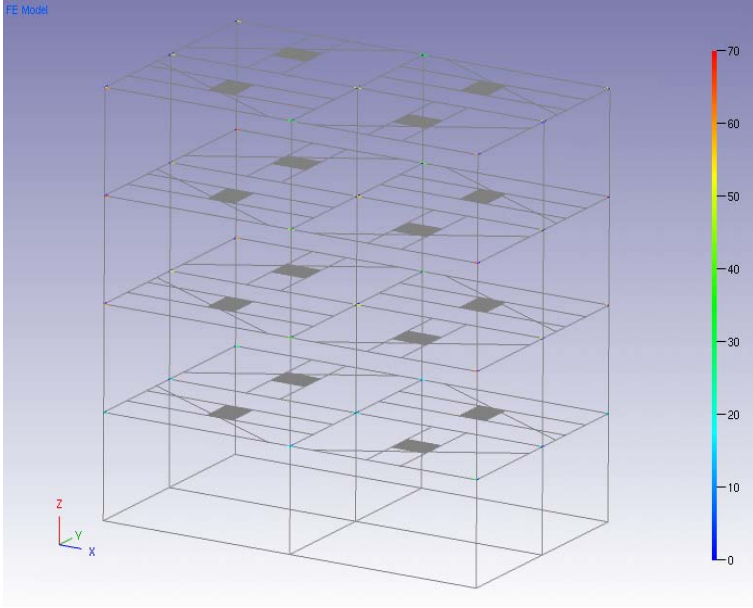
Şekil 4.96. Yapı elemanlarının atalet momentleri (I_2, I_3) değişimine gösterdiği hassaslığın 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

Şekil 4.96' dan görüldüğü gibi ilk 60 parametrenin 3. ve 6. tepkiye daha hassas olduğu gözlenmiştir. Bu parametreler kiriş-kolon bağlantı elemanlarının lokal 2 yönündeki atalet momentleridir (I_2).

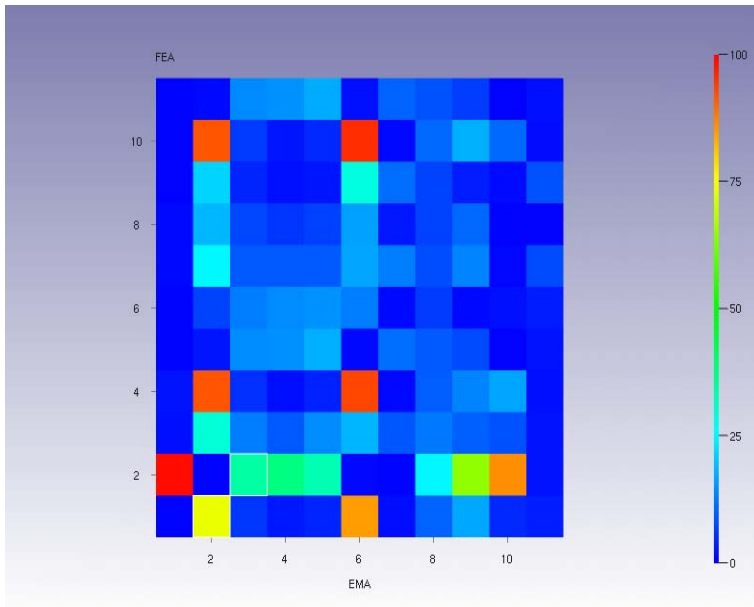
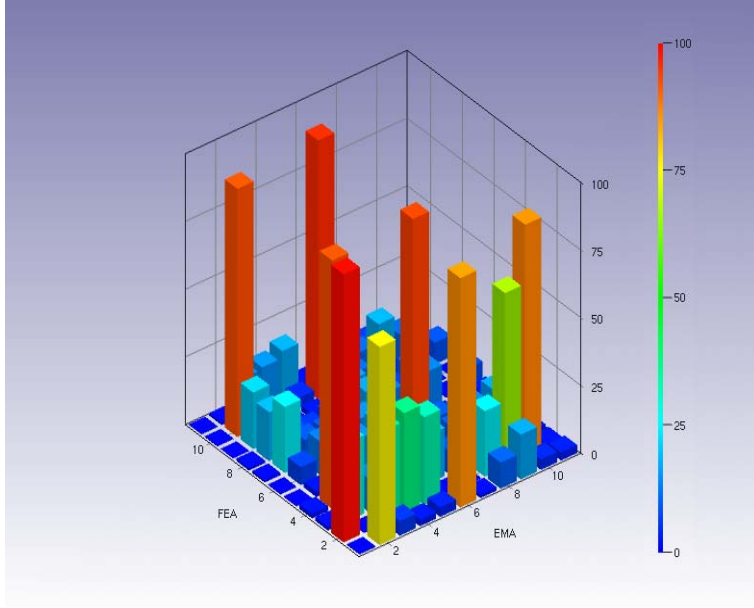
Seçilmiş olan parametrelere göre sonlu eleman modeli güncellenir.



Şekil 4.97. Güncelleştirme sonrası (I_2) değişimi



Şekil 4.98. Güncelleştirme sonrası (I_3) değişimi



Şekil 4.99. Güncelleştirme sonrası MGK matrisinin 3-Boyutlu ve düzlemde gösterimi

Çizelge 4.33. I_2 parametresi en fazla değişen elemanların numaraları ve değişim oranları

| Eleman No | Güncelleme Öncesi Değer | Güncelleme Sonrası Değer | Değişim Yüzdesi (%) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 70 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $9.2455 \cdot 10^{-8}$ | 26.32 |
| 74 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.7002 \cdot 10^{-8}$ | 18.87 |
| 76 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.5294 \cdot 10^{-8}$ | 16.54 |
| 284 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.9460 \cdot 10^{-8}$ | 22.23 |
| 286 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.7557 \cdot 10^{-8}$ | 19.63 |
| 280 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.1858 \cdot 10^{-8}$ | 11.84 |
| 273 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.1840 \cdot 10^{-8}$ | 11.82 |
| 181 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.1772 \cdot 10^{-8}$ | 11.73 |
| 175 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.3102 \cdot 10^{-8}$ | 13.54 |
| 179 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.4207 \cdot 10^{-8}$ | 15.05 |
| 138 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.1623 \cdot 10^{-8}$ | 11.52 |
| 168 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.1451 \cdot 10^{-8}$ | 11.29 |
| 348 | $7.3190 \cdot 10^{-8}$ | $8.6680 \cdot 10^{-8}$ | 18.43 |

Çizelge 4.34. I_3 parametresi en fazla değişen elemanların numaraları ve değişim oranları

| Eleman No | Güncelleme Öncesi Değer | Güncelleme Sonrası Değer | Değişim Yüzdesi (%) |
|-----------|-------------------------|--------------------------|---------------------|
| 127 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2559 \cdot 10^{-6}$ | 60.03 |
| 136 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2752 \cdot 10^{-6}$ | 62.49 |
| 170 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1903 \cdot 10^{-6}$ | 51.67 |
| 174 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1806 \cdot 10^{-6}$ | 50.43 |
| 175 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1807 \cdot 10^{-6}$ | 50.45 |
| 179 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1909 \cdot 10^{-6}$ | 51.75 |
| 213 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2573 \cdot 10^{-6}$ | 60.20 |
| 222 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2366 \cdot 10^{-6}$ | 57.57 |
| 232 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2933 \cdot 10^{-6}$ | 64.80 |
| 241 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.3112 \cdot 10^{-6}$ | 67.08 |
| 275 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2270 \cdot 10^{-6}$ | 56.34 |
| 279 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2176 \cdot 10^{-6}$ | 55.15 |
| 280 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2176 \cdot 10^{-6}$ | 55.15 |
| 284 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2275 \cdot 10^{-6}$ | 56.41 |
| 318 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2932 \cdot 10^{-6}$ | 64.78 |
| 327 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2695 \cdot 10^{-6}$ | 61.77 |
| 337 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2295 \cdot 10^{-6}$ | 56.67 |
| 346 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2430 \cdot 10^{-6}$ | 58.38 |
| 380 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1739 \cdot 10^{-6}$ | 49.59 |
| 384 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1633 \cdot 10^{-6}$ | 48.23 |
| 385 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1635 \cdot 10^{-6}$ | 48.26 |
| 389 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.1744 \cdot 10^{-6}$ | 49.65 |
| 423 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2281 \cdot 10^{-6}$ | 56.49 |
| 432 | $7.8480 \cdot 10^{-7}$ | $1.2070 \cdot 10^{-6}$ | 53.80 |
| 131 | $1.0747 \cdot 10^{-6}$ | $1.5089 \cdot 10^{-6}$ | 40.40 |
| 235 | $1.0747 \cdot 10^{-6}$ | $1.5338 \cdot 10^{-6}$ | 42.72 |
| 236 | $1.0747 \cdot 10^{-6}$ | $1.5421 \cdot 10^{-6}$ | 43.49 |
| 323 | $1.0747 \cdot 10^{-6}$ | $1.5263 \cdot 10^{-6}$ | 42.02 |
| 324 | $1.0747 \cdot 10^{-6}$ | $1.5123 \cdot 10^{-6}$ | 40.72 |

Şekil 4.97, şekil 4.98, çizelge 4.33 ve çizelge 4.34' e bakıldığında I_2 parametresinin en fazla %26 değiştiği, I_3 parametresinin de en fazla %67 değiştiği sonucu çıkarılır. Parametre değişimi en fazla olan elemanlar global Y yönündeki elemanlardır. Bunun sebebi de yapının konstrüktif özelliklerinden kaynaklanmasıdır. Çünkü global Y yönündeki elemanlar kolona başlık yönünde (15 mm kalınlığında),

global X yönündeki elemanlar ise kolona gövde yönünde (9 mm kalınlığında) bağlanmıştır. Bu nedenle sonlu eleman modelinin birinci mod şekli global Y yönünde olmasına karşılık gerçek sistemin birinci mod şekli global X yönünde elde edilmiştir.

4.3. Betonarme Binanın Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi

Bölüm 3.6. teorik detayları verilmiş olan sisten tanımlama metodu ile betonarme bina incelenmiş ve giriş-çıkış verilerine dayalı olarak:

modal parametreleri (ω = açısal frekans, ξ =sönüm oranı, T =periyot)

fiziksel parametreleri (m =kütle, c =sönüm, k =rijitlik) bulunarak yapının sonlu elemanlar modelindeki uygun parametreler ile karşılaştırılmıştır.

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

Sisteminin durgunlaşmış şekilde ifade edilmesi

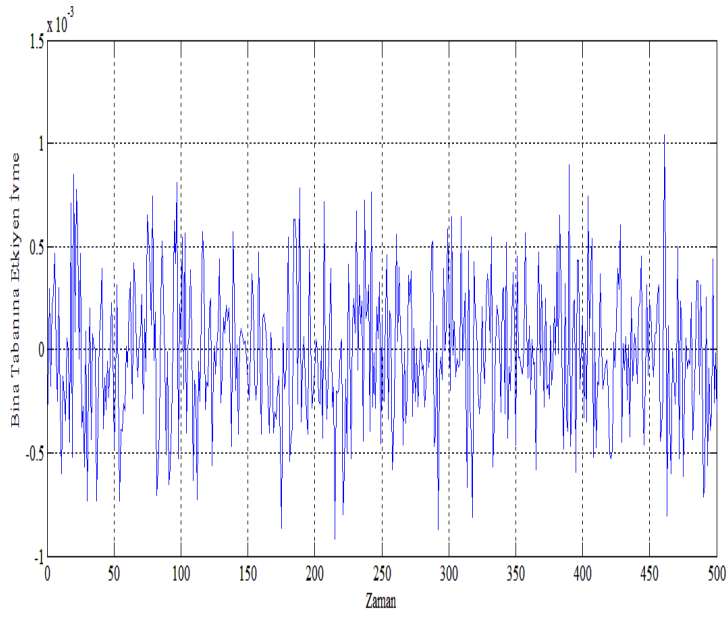
$$Z(k+1) = A \cdot Z(k) + B \cdot f(k) + w(k)$$

$$y(k) = C \cdot Z(k) + D \cdot f(k) + v(k)$$

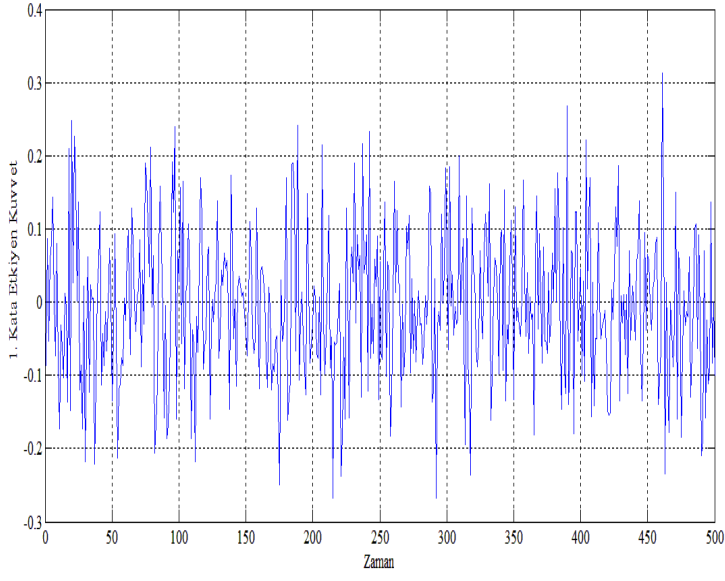
$$C = [C_a \quad -C_a \cdot m^{-1} \cdot k \quad C_v \quad -C_a \cdot m^{-1} \cdot c]$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

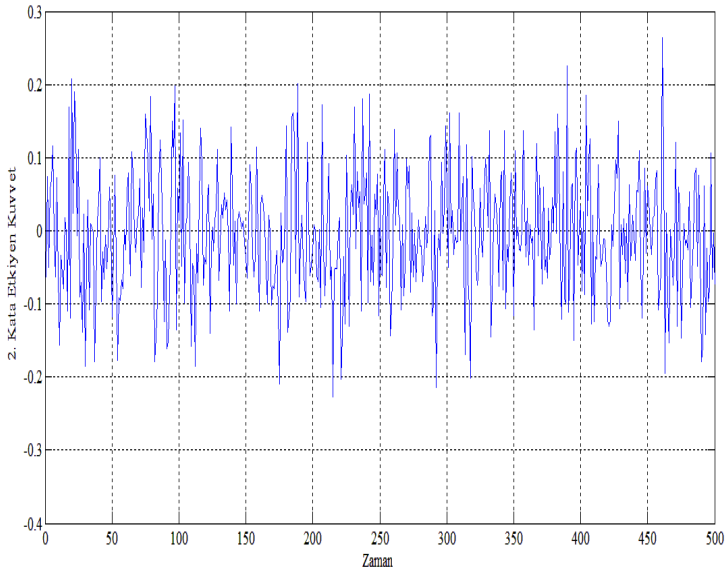
Örnekleme zamanı $dt = 5 \cdot 10^{-3}$ sn kabul edilmiştir. İncelemede ağırlıklı olarak trafik hareketinden bina tabanına ($\langle \rangle = 0$; $Std = 3.4123 \cdot 10^{-4}$ m/sn²) etkisi süresince katlarda etkiyen kuvvetler ve ölçülmüş kat ivme değerleri aşağıda verilmiştir.



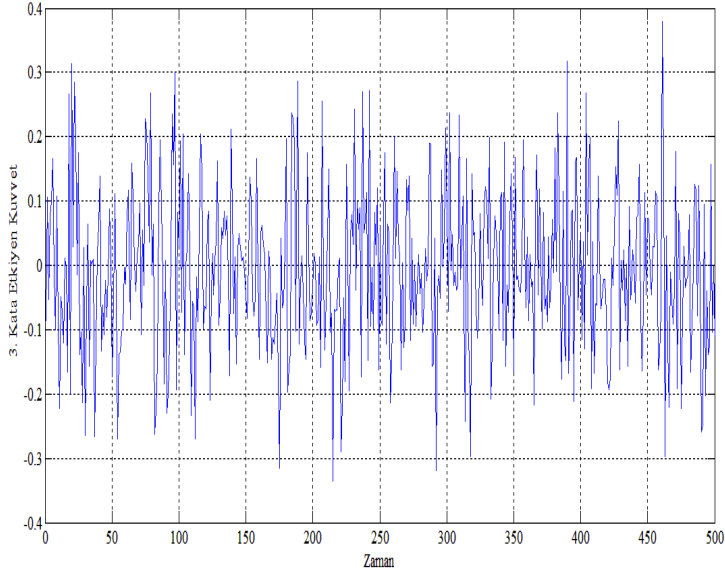
Şekil 4.100. Bina tabanına etkiyen ivmenin zamana bağlı değişimi



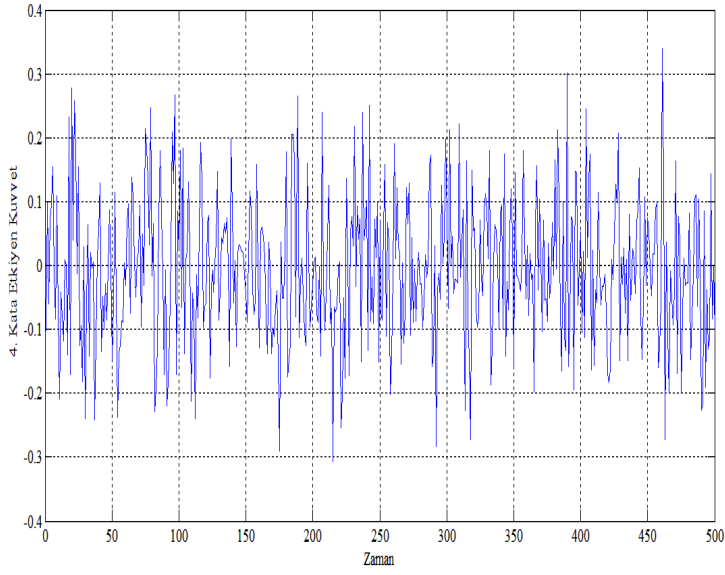
Şekil 4.101. 1. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



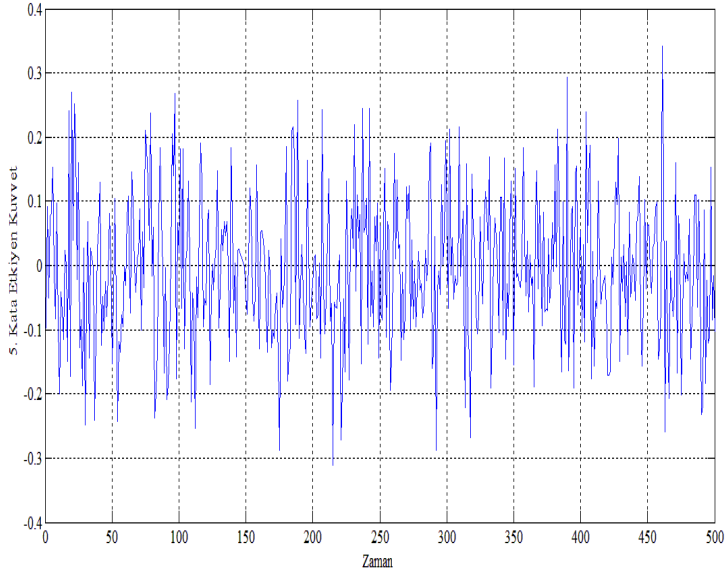
Şekil 4.102. 2. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



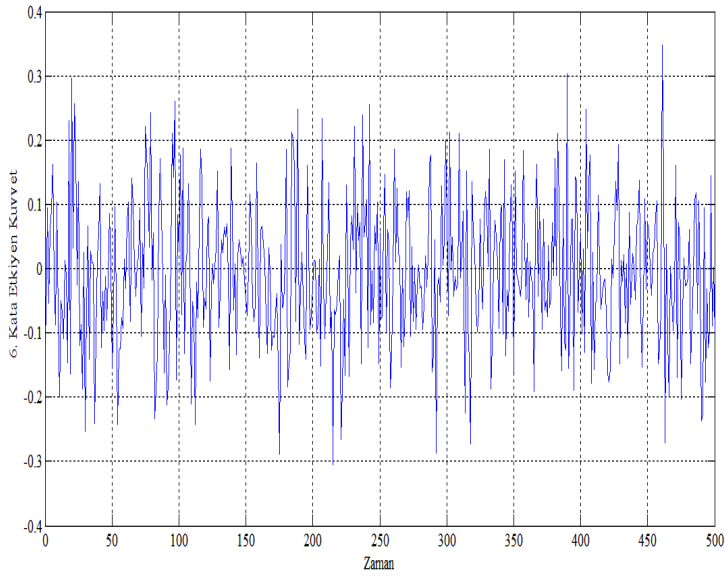
Şekil 4.103. 3. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



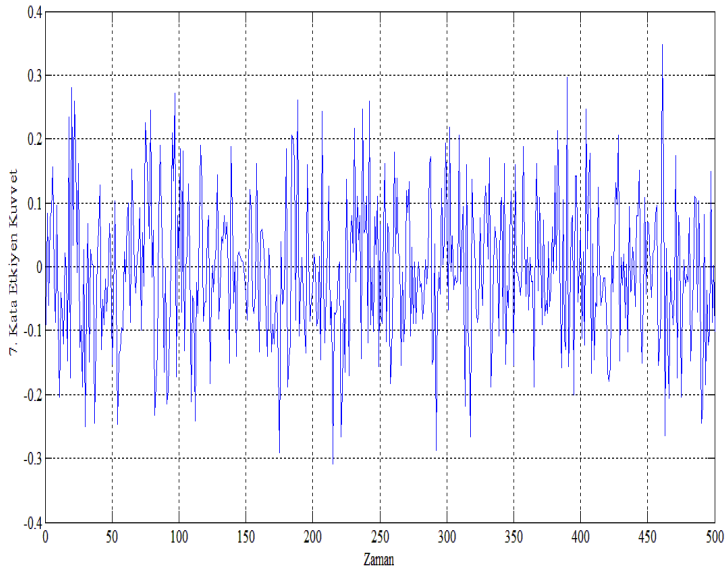
Şekil 4.104. 4. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



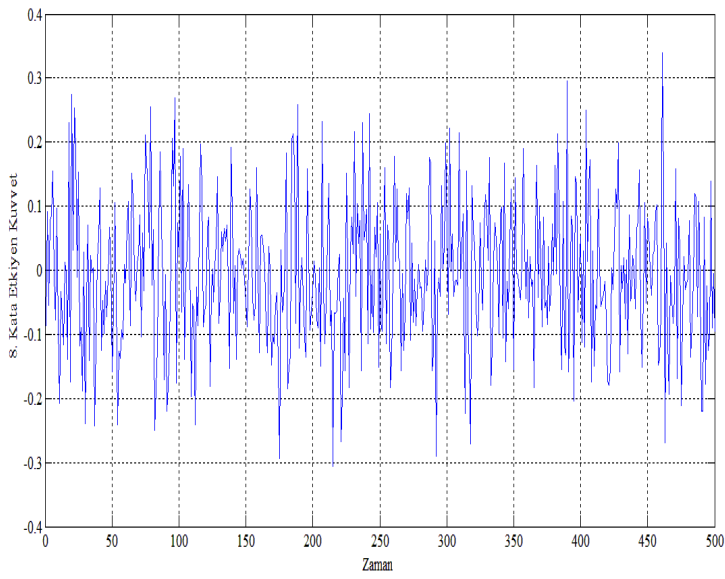
Şekil 4.105. 5. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



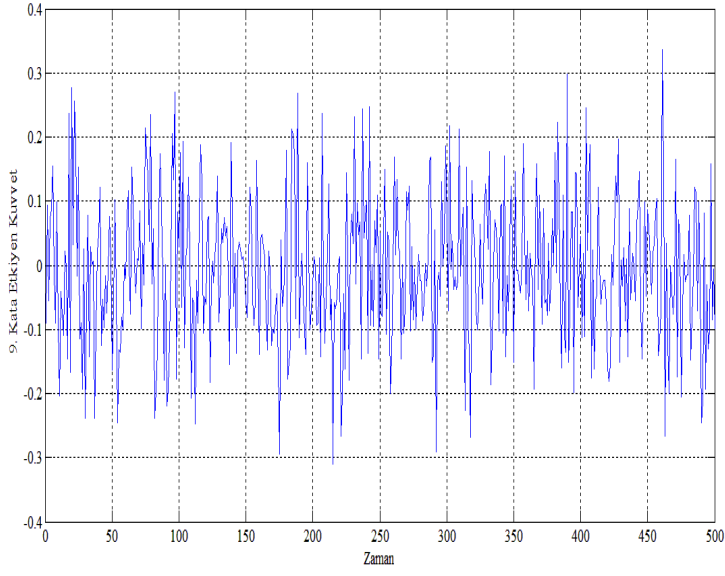
Şekil 4.106. 6. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



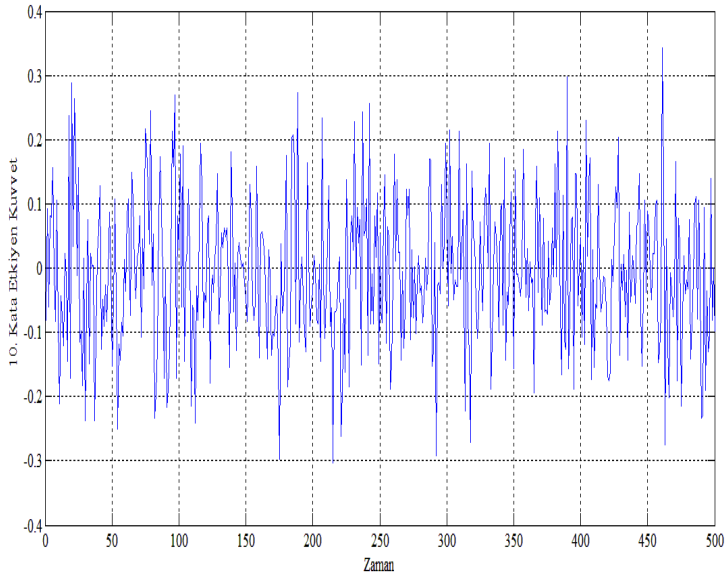
Şekil 4.107. 7. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



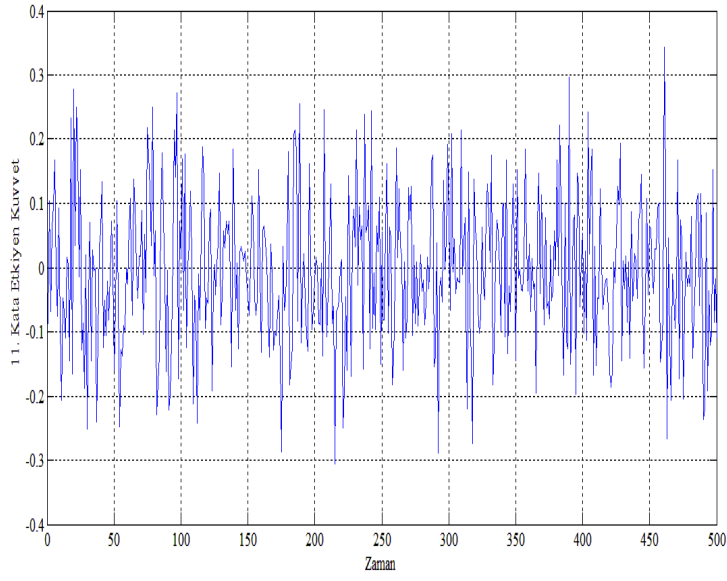
Şekil 4.108. 8. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



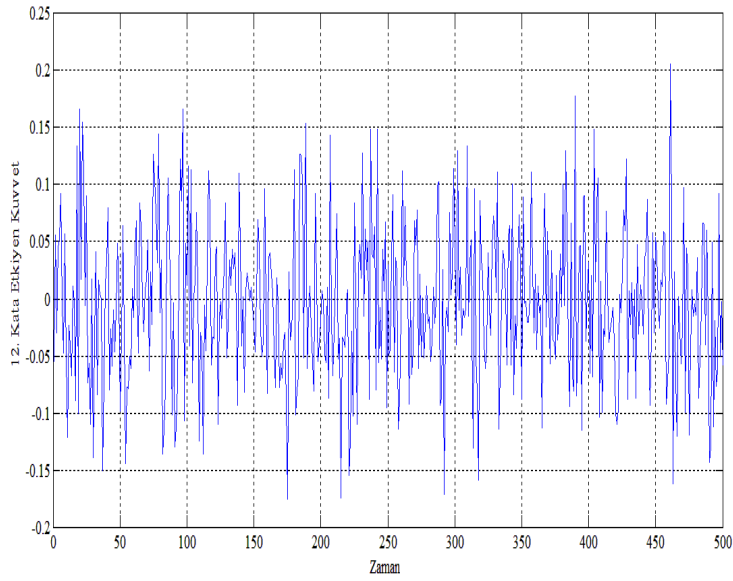
Şekil 4.109. 9. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



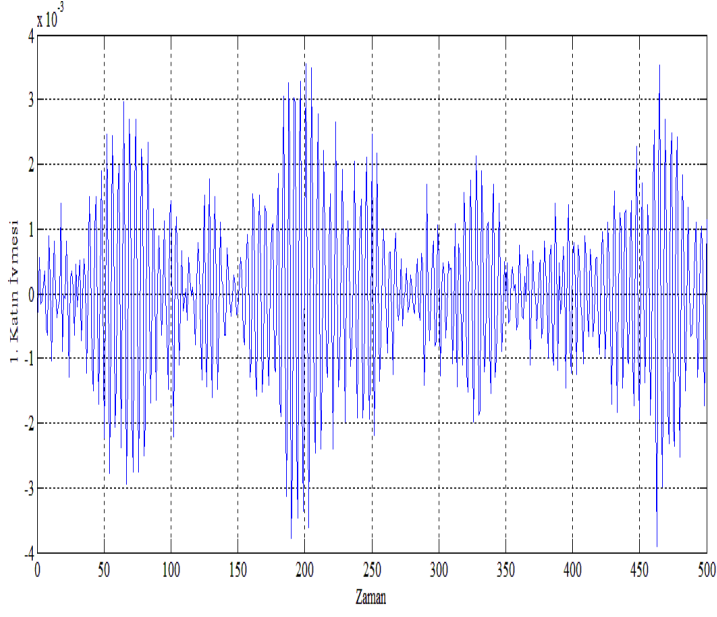
Şekil 4.110. 10. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



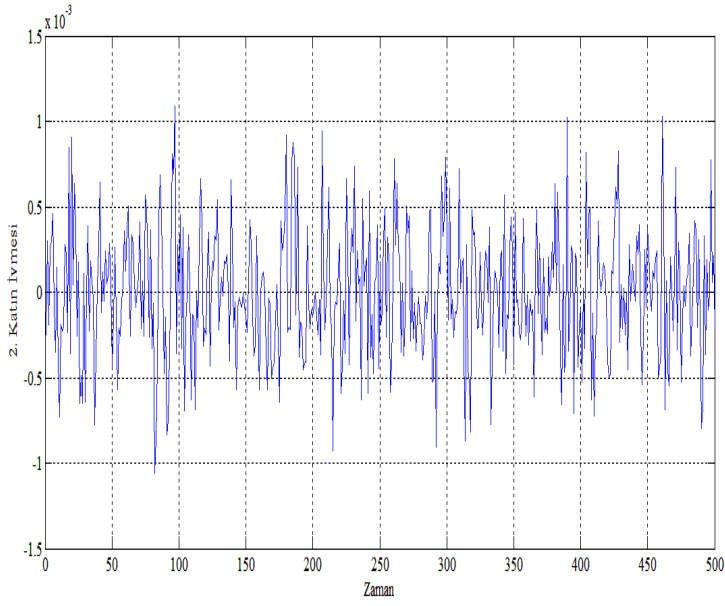
Şekil 4.111. 11. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



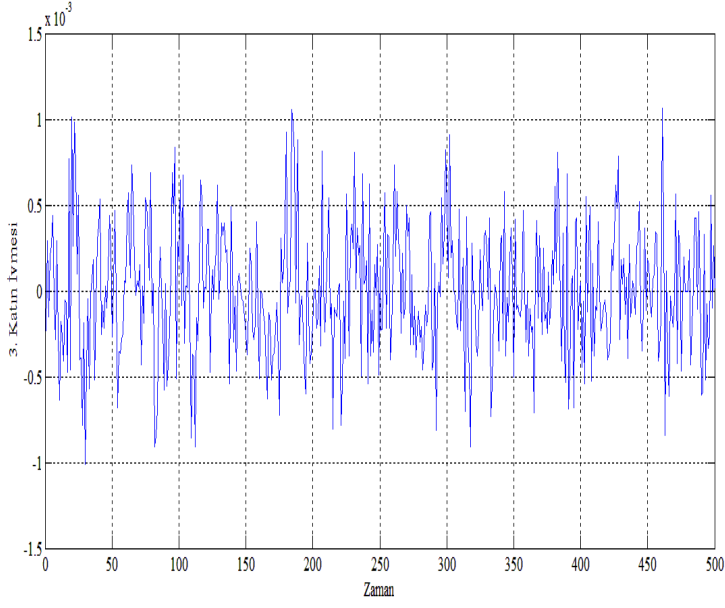
Şekil 4.112. 12. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



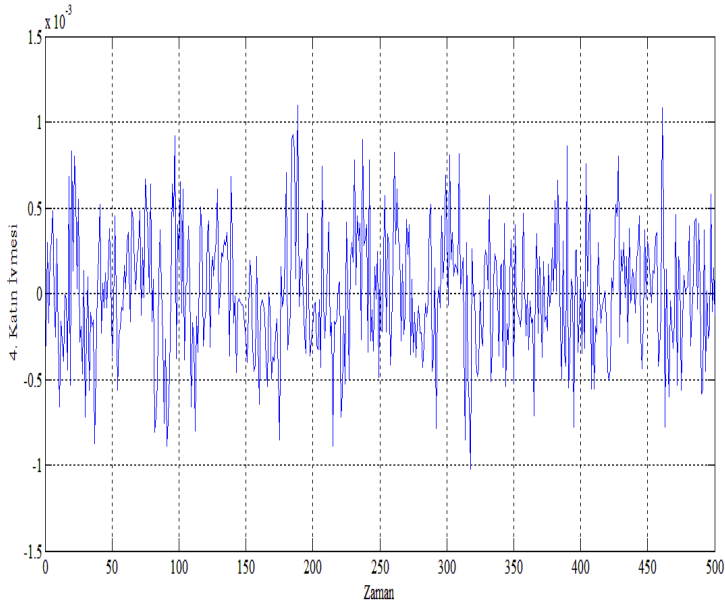
Şekil 4.113. 1. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



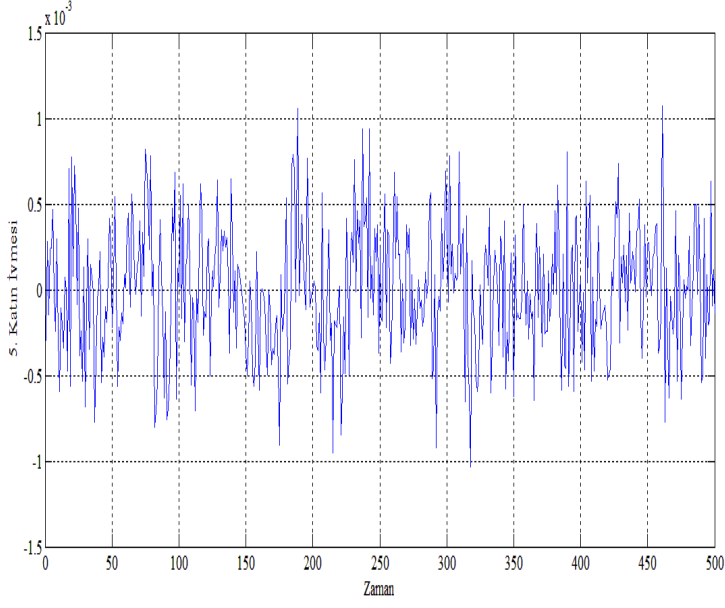
Şekil 4.114. 2. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



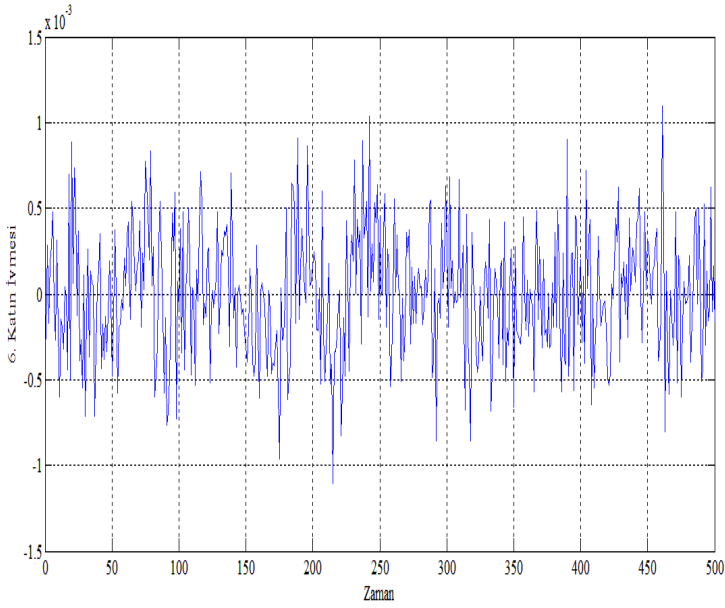
Şekil 4.115. 3. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



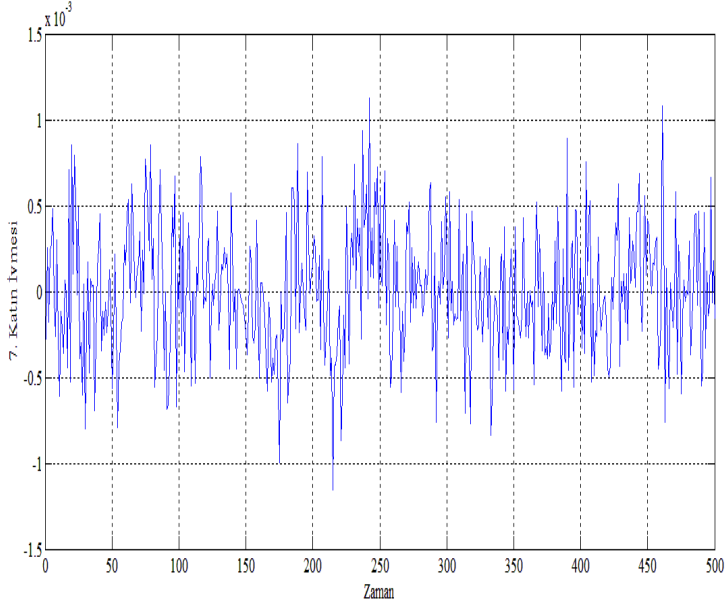
Şekil 4.116. 4. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



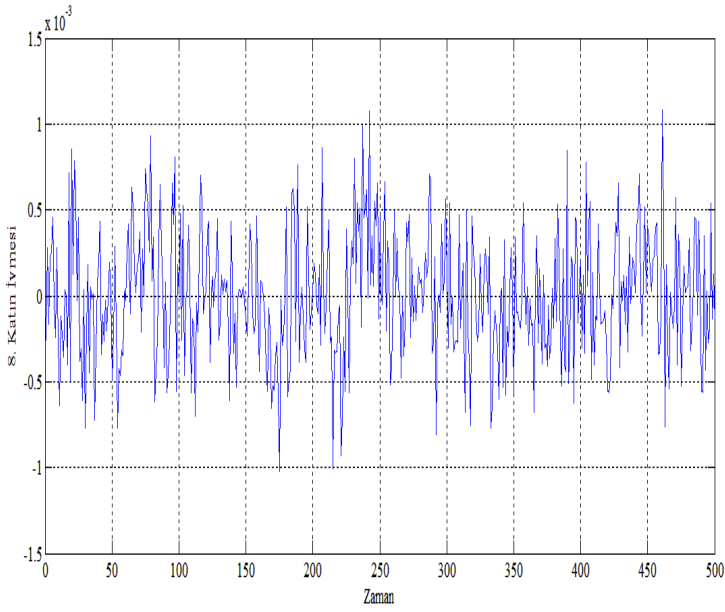
Şekil 4.117. 5. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



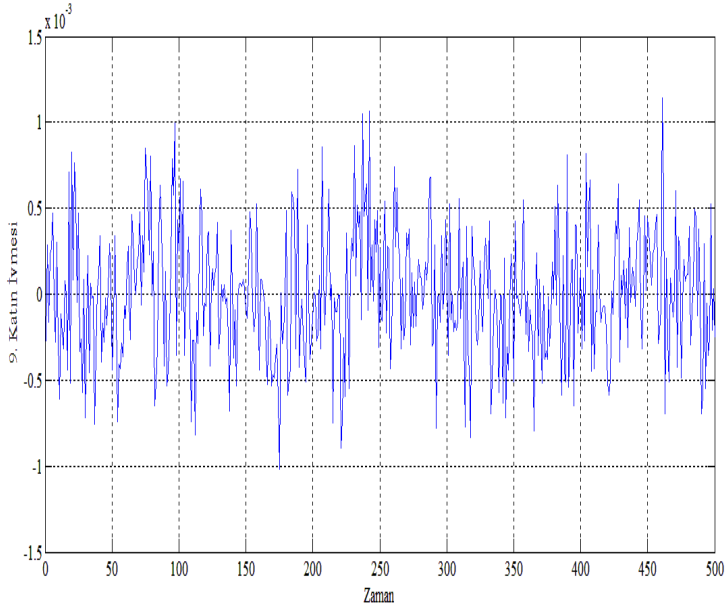
Şekil 4.118. 6. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



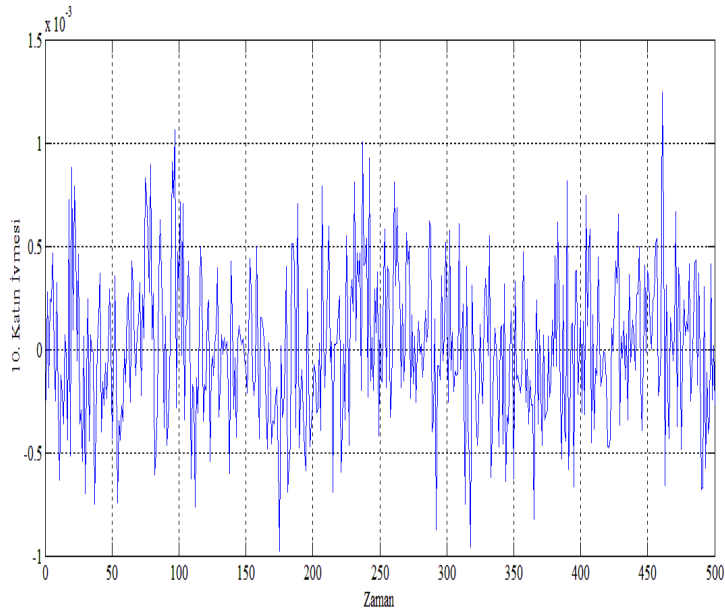
Şekil 4.119. 7. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



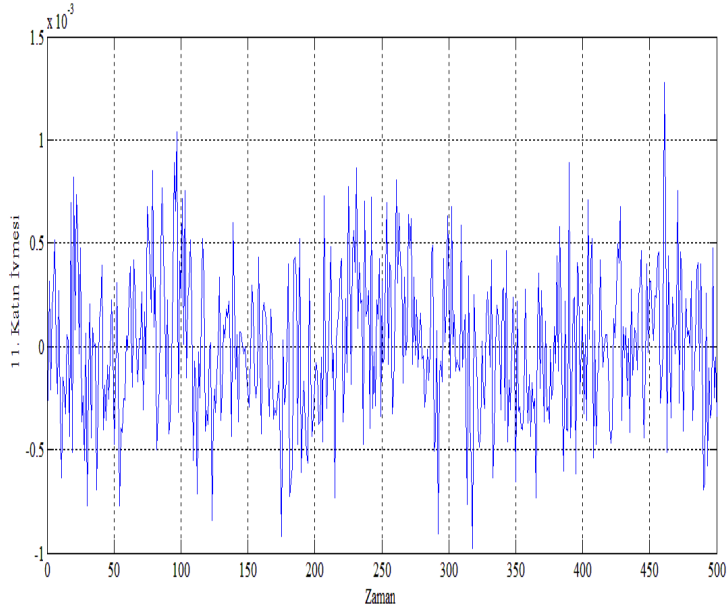
Şekil 4.120. 8. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



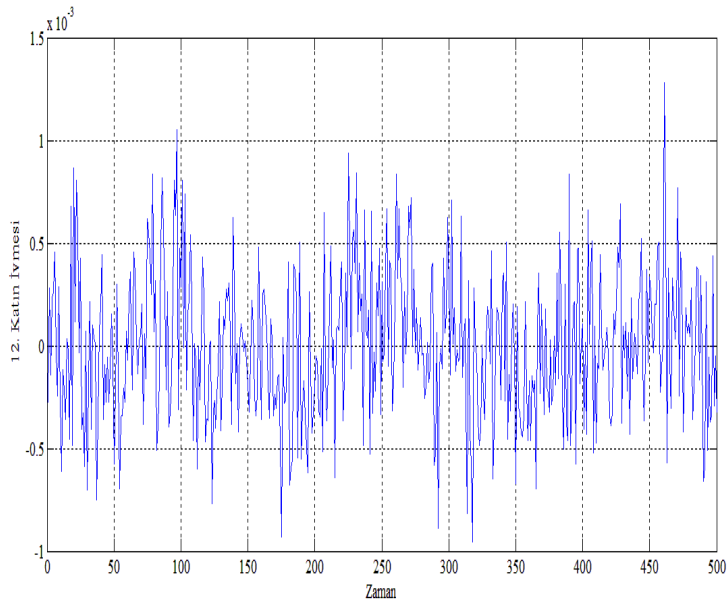
Şekil 4.121. 9. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



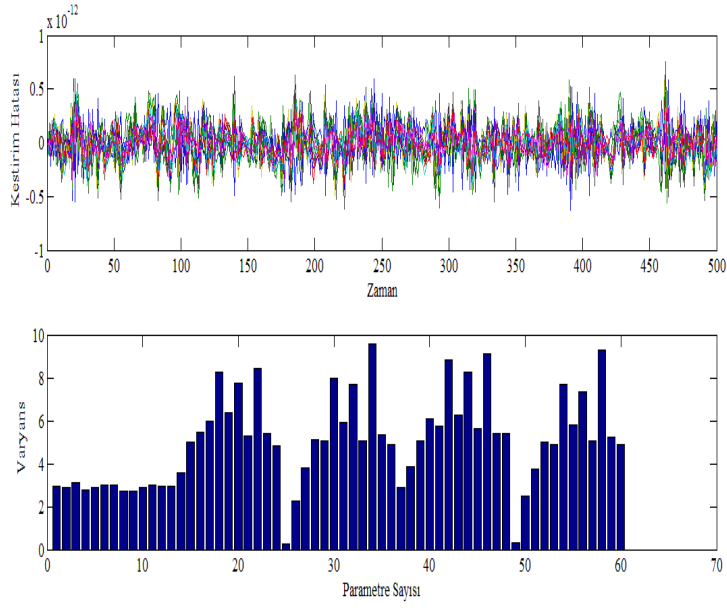
Şekil 4.122. 10. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 4.123. 11. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 4.124. 12. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 4.125. Kestirim hatası ve varyans değişimi

4.3.1. Betonarme Binanın Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Modal Parametreleri

Açısal frekanslar (rad/sn) :

$$\omega = \begin{bmatrix} 6.4219 \cdot 10^0 \\ 1.9006 \cdot 10^1 \\ 3.1082 \cdot 10^1 \\ 4.2860 \cdot 10^1 \\ 5.4398 \cdot 10^1 \\ 6.5219 \cdot 10^1 \\ 7.4684 \cdot 10^1 \\ 8.2226 \cdot 10^1 \\ 8.7291 \cdot 10^1 \\ 9.5964 \cdot 10^1 \\ 1.0693 \cdot 10^2 \\ 2.8958 \cdot 10^2 \end{bmatrix}$$

Sönüm oranları:

$$\zeta = \begin{bmatrix} 4.9999 \cdot 10^{-2} \\ 4.9996 \cdot 10^{-2} \\ 5.0001 \cdot 10^{-2} \\ 4.9998 \cdot 10^{-2} \\ 4.9999 \cdot 10^{-2} \\ 2.2201 \cdot 10^{-1} \\ 4.3662 \cdot 10^{-2} \\ 4.5415 \cdot 10^{-2} \\ 5.4968 \cdot 10^{-2} \\ 4.2843 \cdot 10^{-2} \\ 4.0816 \cdot 10^{-2} \\ 1.8463 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Periyotlar (sn) :

$$T = \begin{bmatrix} 9.7840 \cdot 10^{-1} \\ 3.3058 \cdot 10^{-1} \\ 2.0215 \cdot 10^{-1} \\ 1.4660 \cdot 10^{-1} \\ 1.1550 \cdot 10^{-1} \\ 9.6340 \cdot 10^{-2} \\ 8.4130 \cdot 10^{-2} \\ 7.6414 \cdot 10^{-2} \\ 7.1980 \cdot 10^{-2} \\ 6.5475 \cdot 10^{-2} \\ 5.8759 \cdot 10^{-2} \\ 2.1698 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Bu incelemenin devamında elde edilmiş sistem matrislerine A_d, B_d, C_d, D_d dayanarak binanın fiziksel parametreleri (m, c, k) hesaplanmıştır.

4.3.2. Betonarme Binanın Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Fiziksel Parametreleri

Kütle matrisi (kNsn^2/m):

$$m = \begin{bmatrix} 296.96 & 1.7 \cdot 10^{-6} & -9.4 \cdot 10^{-8} & 9.0 \cdot 10^{-10} & -5.4 \cdot 10^{-9} & -4.4 \cdot 10^{-9} & -6.1 \cdot 10^{-9} & -6.4 \cdot 10^{-9} & -6.3 \cdot 10^{-9} & -7.5 \cdot 10^{-9} & -7.2 \cdot 10^{-9} & -4.2 \cdot 10^{-9} \\ 1.7 \cdot 10^{-6} & 248.2 & -2.3 \cdot 10^{-7} & -2.2 \cdot 10^{-8} & -1.7 \cdot 10^{-7} & -1.4 \cdot 10^{-7} & -1.9 \cdot 10^{-7} & -2.0 \cdot 10^{-7} & -2.0 \cdot 10^{-7} & -2.4 \cdot 10^{-7} & -2.2 \cdot 10^{-7} & -1.3 \cdot 10^{-7} \\ -9.4 \cdot 10^{-8} & -2.3 \cdot 10^{-7} & 365.08 & -2.7 \cdot 10^{-7} & -2.4 \cdot 10^{-7} & -3.5 \cdot 10^{-7} & -3.6 \cdot 10^{-7} & -4.1 \cdot 10^{-7} & -4.3 \cdot 10^{-7} & -4.7 \cdot 10^{-7} & -4.6 \cdot 10^{-7} & -2.8 \cdot 10^{-7} \\ 9.0 \cdot 10^{-10} & -2.2 \cdot 10^{-8} & -2.7 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -3.3 \cdot 10^{-7} & -3.7 \cdot 10^{-7} & -4.1 \cdot 10^{-7} & -4.6 \cdot 10^{-7} & -5.3 \cdot 10^{-7} & -5.3 \cdot 10^{-7} & -5.5 \cdot 10^{-7} & -3.4 \cdot 10^{-7} \\ -5.4 \cdot 10^{-9} & -1.7 \cdot 10^{-7} & -2.4 \cdot 10^{-7} & -3.3 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -3.7 \cdot 10^{-7} & -4.3 \cdot 10^{-7} & -5.0 \cdot 10^{-7} & -5.3 \cdot 10^{-7} & -6.6 \cdot 10^{-7} & -6.4 \cdot 10^{-7} & -3.8 \cdot 10^{-7} \\ -4.4 \cdot 10^{-9} & -1.4 \cdot 10^{-7} & -3.5 \cdot 10^{-7} & -3.7 \cdot 10^{-7} & -3.7 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -3.8 \cdot 10^{-7} & -4.5 \cdot 10^{-7} & -5.6 \cdot 10^{-7} & -6.7 \cdot 10^{-7} & -6.7 \cdot 10^{-7} & -4.2 \cdot 10^{-7} \\ -6.1 \cdot 10^{-9} & -1.9 \cdot 10^{-7} & -3.6 \cdot 10^{-7} & -4.1 \cdot 10^{-7} & -4.3 \cdot 10^{-7} & -3.8 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -4.2 \cdot 10^{-7} & -5.5 \cdot 10^{-7} & -6.8 \cdot 10^{-7} & -7.3 \cdot 10^{-7} & -4.4 \cdot 10^{-7} \\ -6.4 \cdot 10^{-9} & -2.0 \cdot 10^{-7} & -4.1 \cdot 10^{-7} & -4.6 \cdot 10^{-7} & -5.0 \cdot 10^{-7} & -4.5 \cdot 10^{-7} & -4.2 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -5.8 \cdot 10^{-7} & -7.9 \cdot 10^{-7} & -7.8 \cdot 10^{-7} & -5.4 \cdot 10^{-7} \\ -6.3 \cdot 10^{-9} & -2.0 \cdot 10^{-7} & -4.3 \cdot 10^{-7} & -5.3 \cdot 10^{-7} & -5.3 \cdot 10^{-7} & -5.6 \cdot 10^{-7} & -5.5 \cdot 10^{-7} & -5.8 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -8.3 \cdot 10^{-7} & -1.0 \cdot 10^{-6} & -4.8 \cdot 10^{-7} \\ -7.5 \cdot 10^{-9} & -2.4 \cdot 10^{-7} & -4.7 \cdot 10^{-7} & -5.3 \cdot 10^{-7} & -6.6 \cdot 10^{-7} & -6.7 \cdot 10^{-7} & -6.8 \cdot 10^{-7} & -7.9 \cdot 10^{-7} & -8.3 \cdot 10^{-7} & 331.21 & -5.8 \cdot 10^{-7} & -1.0 \cdot 10^{-6} \\ -7.2 \cdot 10^{-9} & -2.2 \cdot 10^{-7} & -4.6 \cdot 10^{-7} & -5.5 \cdot 10^{-7} & -6.4 \cdot 10^{-7} & -6.7 \cdot 10^{-7} & -7.3 \cdot 10^{-7} & -7.8 \cdot 10^{-7} & -1.0 \cdot 10^{-6} & -5.8 \cdot 10^{-7} & 331.21 & 6.8 \cdot 10^{-7} \\ -4.2 \cdot 10^{-9} & -1.3 \cdot 10^{-7} & -2.8 \cdot 10^{-7} & -3.4 \cdot 10^{-7} & -3.8 \cdot 10^{-7} & -4.2 \cdot 10^{-7} & -4.4 \cdot 10^{-7} & -5.4 \cdot 10^{-7} & -4.8 \cdot 10^{-7} & -1.0 \cdot 10^{-6} & 6.8 \cdot 10^{-7} & 198.72 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi (kNsn/m):

$$c = \begin{bmatrix} 3174.9 & -17.5 & -6.3 & -27 & -6 & 22.6 & 3.4 & -25.8 & 1.8 & 24.1 & -5.1 & -8.7 \\ -17.5 & 2085.4 & -257.7 & -903 & -202.4 & 745.4 & 108.7 & -851.3 & 59.6 & 796.7 & -167 & -287.8 \\ -6.3 & -257.7 & 2235.9 & -1108.7 & -292.1 & 584.7 & 18.1 & -622.9 & 12.5 & 619.5 & -131 & -227.9 \\ -27 & -903 & -1108.7 & 3249.5 & -197 & -1615.9 & -252.9 & 1575.6 & -120.4 & -1554.2 & 304.6 & 546.2 \\ -6 & -202.4 & -292.1 & -197 & 1898.6 & -980.4 & -56.7 & 191.8 & 10.1 & -377.8 & 48.6 & 119.8 \\ 22.6 & 745.4 & 584.7 & -1615.9 & -980.4 & 3457.8 & -535.6 & -1622.2 & -65.6 & 1613 & -339.8 & -600.6 \\ 3.4 & 108.7 & 18.1 & -252.9 & -56.7 & -535.6 & 1892.3 & -793 & -19.4 & -27.6 & -63 & -33.5 \\ -25.8 & -851.3 & -622.9 & 1575.6 & 191.8 & -1622.2 & -793 & 3495.1 & -755.1 & -1695.3 & 263 & 519.8 \\ 1.8 & 59.6 & 12.5 & -120.4 & 10.1 & -65.6 & -19.4 & -755.1 & 1819.2 & -464.5 & -194.5 & -101.7 \\ 24.1 & 796.7 & 619.5 & -1554.2 & -377.8 & 1613 & -27.6 & -1695.3 & -464.5 & 3320 & -873.3 & -771.8 \\ -5.1 & -167 & -131 & 304.6 & 48.6 & -339.8 & -63 & 263 & -194.5 & -873.3 & 1836.8 & -637.6 \\ -8.7 & -287.8 & -227.9 & 546.2 & 119.8 & -600.6 & -33.5 & 519.8 & -101.7 & -771.8 & -637.6 & 1398.4 \end{bmatrix}$$

Periyotlar (sn):

$$T = \begin{bmatrix} 9.7840 \cdot 10^{-1} \\ 3.3058 \cdot 10^{-1} \\ 2.0215 \cdot 10^{-1} \\ 1.4660 \cdot 10^{-1} \\ 1.1550 \cdot 10^{-1} \\ 9.6340 \cdot 10^{-2} \\ 8.4130 \cdot 10^{-2} \\ 7.6414 \cdot 10^{-2} \\ 7.1980 \cdot 10^{-2} \\ 6.5475 \cdot 10^{-2} \\ 5.8759 \cdot 10^{-2} \\ 2.1698 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

4.3.4. Betonarme Binanın Sonlu Elemanlar Modelinin Fiziksel Parametreleri

Kütle matrisi (kNsn²/m):

$$m = \begin{bmatrix} 296.96 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 248.20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 365.08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 198.72 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi (kNsn/m):

$$c = \begin{bmatrix} 3174.9 & -17.5 & -6.3 & -27.0 & -6.0 & 22.6 & 3.4 & -25.8 & 1.8 & 24.1 & -5.1 & -8.7 \\ -17.5 & 2085.4 & -257.7 & -903.0 & -202.4 & 745.4 & 108.7 & -851.3 & 59.6 & 796.7 & -167.0 & -287.8 \\ -6.3 & -257.7 & 2235.9 & -1108.7 & -292.1 & 584.7 & 18.1 & -622.9 & 12.5 & 619.5 & -131.0 & -227.9 \\ -27.0 & -903.0 & -1108.7 & 3249.5 & -197.0 & -1615.9 & -252.9 & 1575.6 & -120.4 & -1554.2 & 304.6 & 546.2 \\ -6.0 & -202.4 & -292.1 & -197.0 & 1898.6 & -980.4 & -56.7 & 191.8 & 10.1 & -377.8 & 48.6 & 119.8 \\ 22.6 & 745.4 & 584.7 & -1615.9 & -980.4 & 3457.8 & -535.6 & -1622.2 & -65.6 & 1613.0 & -339.8 & -600.6 \\ 3.4 & 108.7 & 18.1 & -252.9 & -56.7 & -535.6 & 1892.3 & -793.0 & -19.4 & -27.6 & -63.0 & -33.5 \\ -25.8 & -851.3 & -622.9 & 1575.6 & 191.8 & -1622.2 & -793.0 & 3495.1 & -755.1 & -1695.3 & 263.0 & 519.8 \\ 1.8 & 59.6 & 12.5 & -120.4 & 10.1 & -65.6 & -19.4 & -755.1 & 1819.2 & -464.5 & -194.5 & -101.7 \\ 24.1 & 796.7 & 619.5 & -1554.2 & -377.8 & 1613.0 & -27.6 & -1695.3 & -464.5 & 3320.0 & -873.3 & -771.8 \\ -5.1 & -167.0 & -131.0 & 304.6 & 48.6 & -339.8 & -63.0 & 263.0 & -194.5 & -873.3 & 1836.8 & -637.6 \\ -8.7 & -287.8 & -227.9 & 546.2 & 119.8 & -600.6 & -33.5 & 519.8 & -101.7 & -771.8 & -637.6 & 1398.4 \end{bmatrix}$$

Rijitlik matrisi (kN/m):

$$k = \begin{bmatrix} 24882671 & -598420 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -598420 & 1594944 & -996523 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -996523 & 1654669 & -658145 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1316290 & -658145 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -658145 & 1939681 & -1281535 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1281535 & 1281535 \end{bmatrix}$$

4.4. Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi

Bölüm 3.6. teorik detayları verilmiş olan sistem tanımlama metodu ile betonarme bina incelenmiş ve giriş-çıkış verilerine dayalı olarak:

modal parametreleri (ω =açısal frekans, ξ =sönüm oranı, T =periyot)

fiziksel parametreleri (m =kütle, c =sönüm, k =rijitlik) bulunarak yapının sonlu elemanlar modelindeki uygun parametreler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, çevresel impuls ve kuvvet oluşturucu (eksantrik kütleli titreştirici) etkilerinden sistem tanımlama metodu ile inceleme yapılmıştır.

4.4.1. İmpuls Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi

Giriş etki matrisi:

$$d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

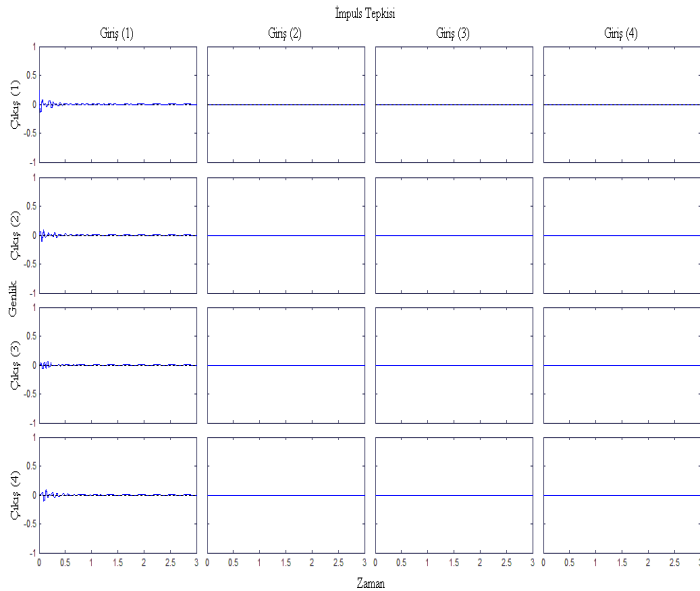
Sistem tepkileri ivme olarak ölçüldüğü kabulü ile çıkış ivme, hız ve yerdeğiştirme etki matrisleri:

$$C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Örnekleme zamanı $dt = 1 \cdot 10^{-2}$ sn kabul edilmiştir. Giriş etki matrisinden de görüldüğü üzere incelemede etkisi süresince 4.kata monte edilmiş olan kuvvet oluşturucu (eksantrik kütleli titreştirici) etkisinden kuvvetler ve ölçülmüş kat ivme değerleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.126. İmpuls tepkisinin zamana bağlı değişimi

4.4.1.1. İmpuls Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Modal Parametreleri

Açısal frekanslar (rad/sn) :

$$\omega = \begin{bmatrix} 2.1716 \cdot 10^1 \\ 5.9862 \cdot 10^1 \\ 9.0453 \cdot 10^1 \\ 1.1238 \cdot 10^2 \end{bmatrix}$$

Sönüm oranları:

$$\xi = \begin{bmatrix} 4.9599 \cdot 10^{-2} \\ 4.9666 \cdot 10^{-2} \\ 4.9724 \cdot 10^{-2} \\ 4.9875 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Periyotlar (sn) :

$$T = \begin{bmatrix} 2.8934 \cdot 10^{-1} \\ 1.0496 \cdot 10^{-1} \\ 6.9464 \cdot 10^{-2} \\ 5.5909 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Bu incelemenin devamında elde edilmiş sistem matrislerine A_d , B_d , C_d , D_d dayanarak binanın fiziksel parametreleri (m , c , k) hesaplanmıştır.

4.4.1.2. İmpuls Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Fiziksel Parametreleri

Kütle matrisi (kNsn²/m):

$$m = \begin{bmatrix} 4.23 & -4.91 \cdot 10^{-15} & 3.77 \cdot 10^{-15} & 1.94 \cdot 10^{-15} \\ -5.09 \cdot 10^{-15} & 3.44 & 1.77 \cdot 10^{-15} & -6.56 \cdot 10^{-15} \\ 3.80 \cdot 10^{-15} & 1.81 \cdot 10^{-15} & 3.44 & 1.06 \cdot 10^{-14} \\ 1.91 \cdot 10^{-15} & -6.60 \cdot 10^{-15} & 1.08 \cdot 10^{-14} & 2.71 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi (kNsn/m):

$$c = \begin{bmatrix} 3.09 \cdot 10^1 & -8.57 & -1.67 & -6.94 \cdot 10^{-1} \\ -8.57 & 2.67 \cdot 10^1 & -8.87 & -1.88 \\ -1.67 & -8.87 & 2.55 \cdot 10^1 & -9.57 \\ -6.94 \cdot 10^{-1} & -1.88 & -9.57 & 1.58 \cdot 10^1 \end{bmatrix}$$

Rijitlik matrisi (kN/m):

$$k = \begin{bmatrix} 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 & 8.00 \cdot 10^{-11} & -1.65 \cdot 10^{-11} \\ -1.24 \cdot 10^4 & 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 & -8.28 \cdot 10^{-12} \\ 2.00 \cdot 10^{-11} & -1.24 \cdot 10^4 & 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 \\ 1.63 \cdot 10^{-11} & -9.09 \cdot 10^{-11} & -1.24 \cdot 10^4 & 1.24 \cdot 10^4 \end{bmatrix}$$

Binanın mevcut durumu için modal ve fiziksel parametreleri uygun şekilde bulunmuştur.

4.4.1.3. Çelik Deney Yapısının Sonlu Elemanlar Modelinin Modal Parametreleri

Açısal frekanslar (rad/sn) :

$$\omega = \begin{bmatrix} 2.1715 \cdot 10^1 \\ 5.9862 \cdot 10^1 \\ 9.0452 \cdot 10^1 \\ 1.1238 \cdot 10^2 \end{bmatrix}$$

Sönüm oranları:

$$\xi = \begin{bmatrix} 5.0000 \cdot 10^{-2} \\ 5.0000 \cdot 10^{-2} \\ 5.0000 \cdot 10^{-2} \\ 5.0000 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Periyotlar (sn) :

$$T = \begin{bmatrix} 2.8930 \cdot 10^{-1} \\ 1.0500 \cdot 10^{-1} \\ 6.9500 \cdot 10^{-2} \\ 5.5900 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

4.4.1.4. Çelik Deney Yapısının Sonlu Elemanlar Modelinin Fiziksel Parametreleri

Kütle matrisi (kNsn²/m):

$$m = \begin{bmatrix} 4.23 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.44 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.44 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.71 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi (kNsn/m):

$$c = \begin{bmatrix} 3.09 \cdot 10^1 & -8.57 & -1.67 & -6.94 \cdot 10^{-1} \\ -8.57 & 2.67 \cdot 10^1 & -8.87 & -1.88 \\ -1.67 & -8.87 & 2.55 \cdot 10^1 & -9.57 \\ -6.94 \cdot 10^{-1} & -1.88 & -9.57 & 1.58 \cdot 10^1 \end{bmatrix}$$

Rijitlik matrisi (kN/m):

$$k = \begin{bmatrix} 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 & 0 & 0 \\ -1.24 \cdot 10^4 & 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 & 0 \\ 0 & -1.24 \cdot 10^4 & 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 \\ 0 & 0 & -1.24 \cdot 10^4 & 1.24 \cdot 10^4 \end{bmatrix}$$

4.4.2. Çevresel Mikrotremor Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile İncelenmesi

Giriş etki matrisi:

$$d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

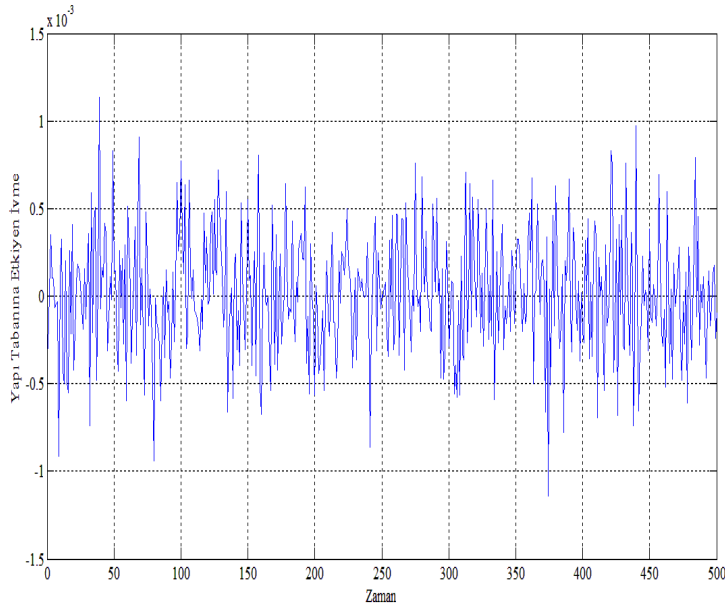
Sistem tepkileri ivme olarak ölçüldüğü kabulü ile çıkış ivme, hız ve yerdeğiştirme etki matrisleri:

$$C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

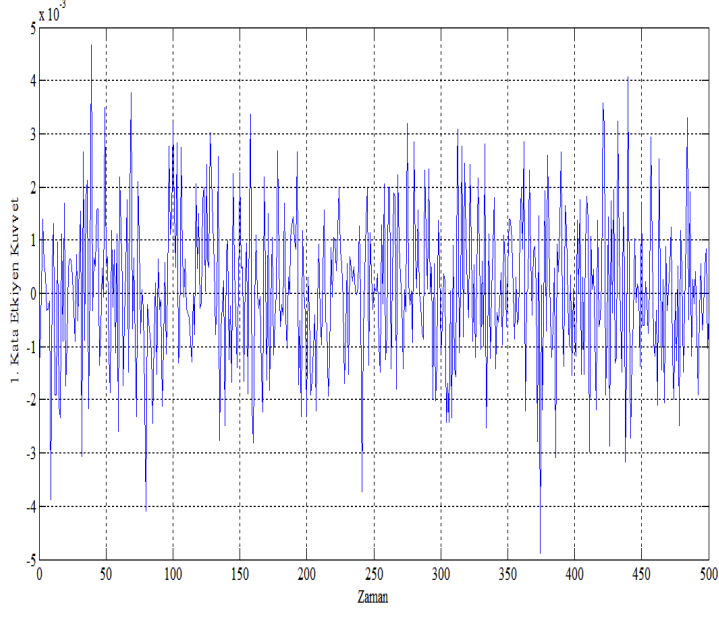
$$C_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

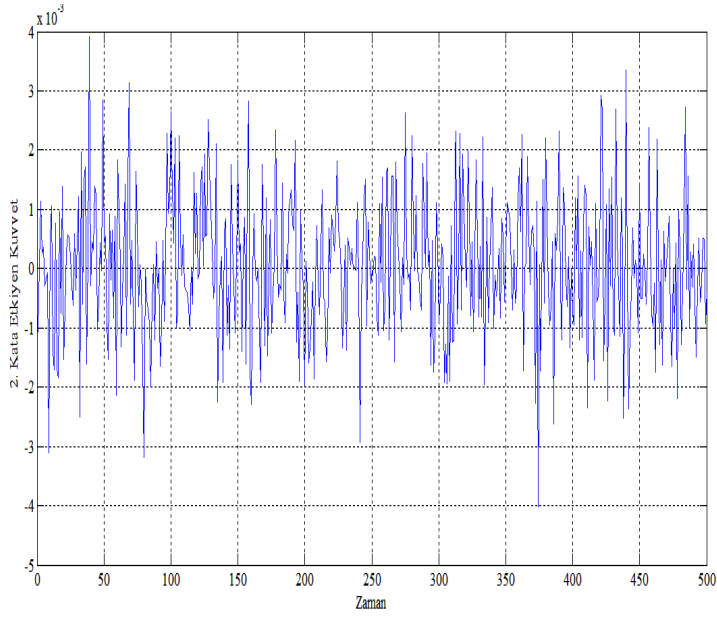
Örnekleme zamanı $dt = 1 \cdot 10^{-2}$ sn kabul edilmiştir. İncelemede yapı tabanı düzleminde monte edilmiş olan kuvvet oluşturu (eksantrik kütleli titreştirici) etkisinden kuvvetler ve ölçülmüş kat ivme değerleri aşağıda verilmiştir.



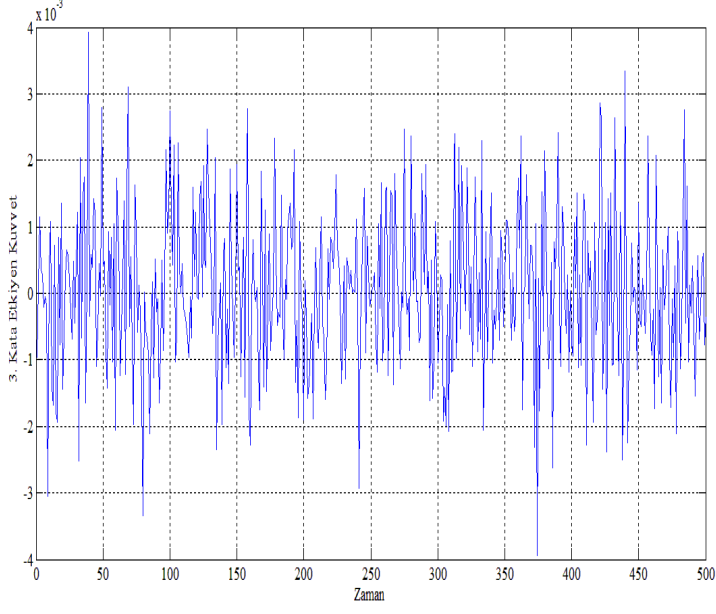
Şekil 4.127. Yapı tabanına etkiyen ivmenin zamana bağlı değişimi



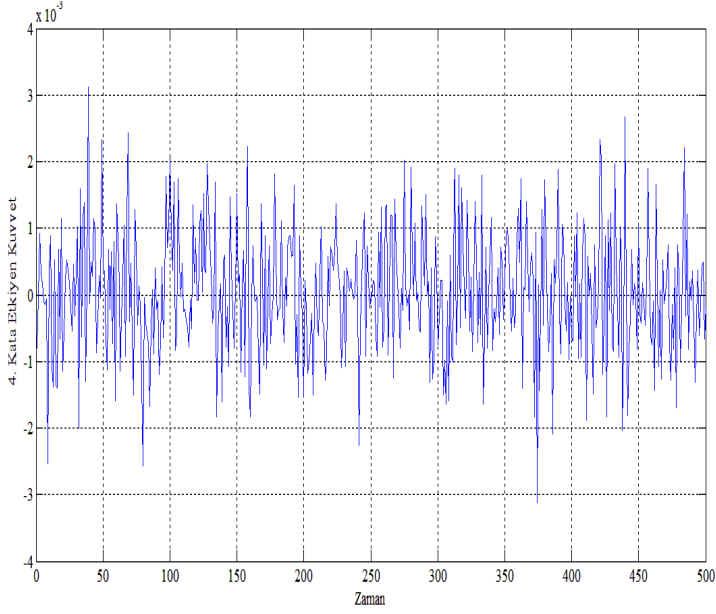
Şekil 4.128. 1. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



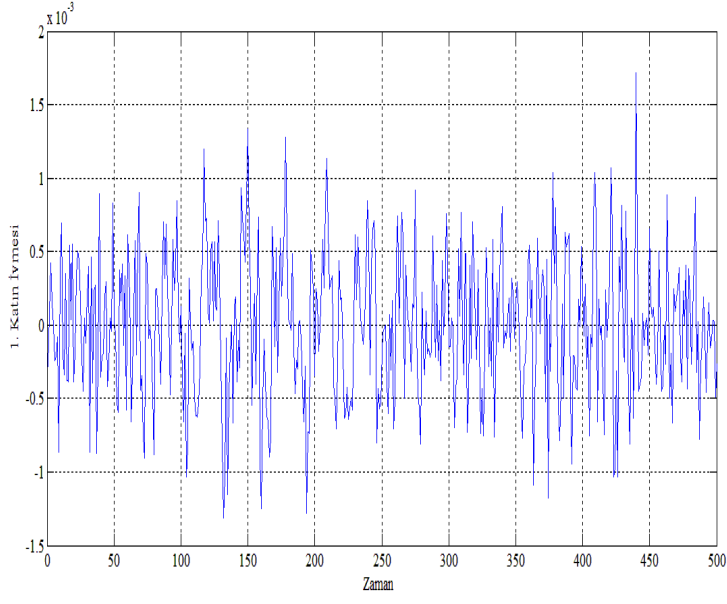
Şekil 4.129. 2. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



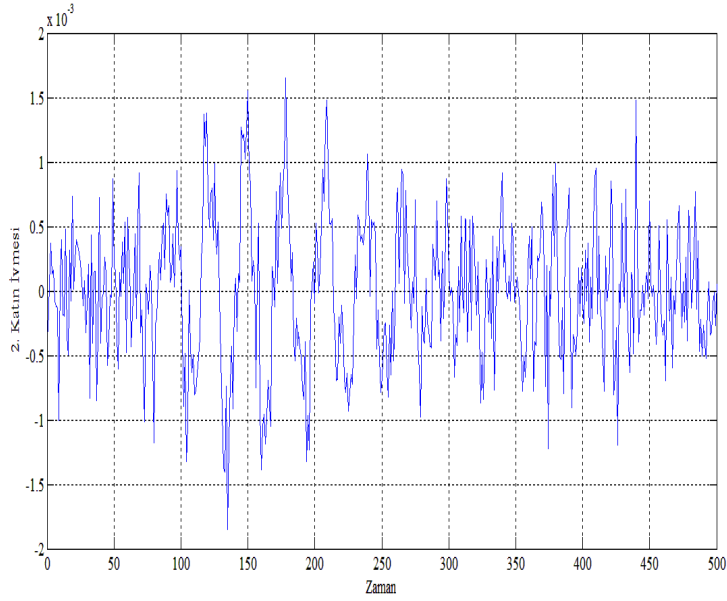
Şekil 4.130. 3. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



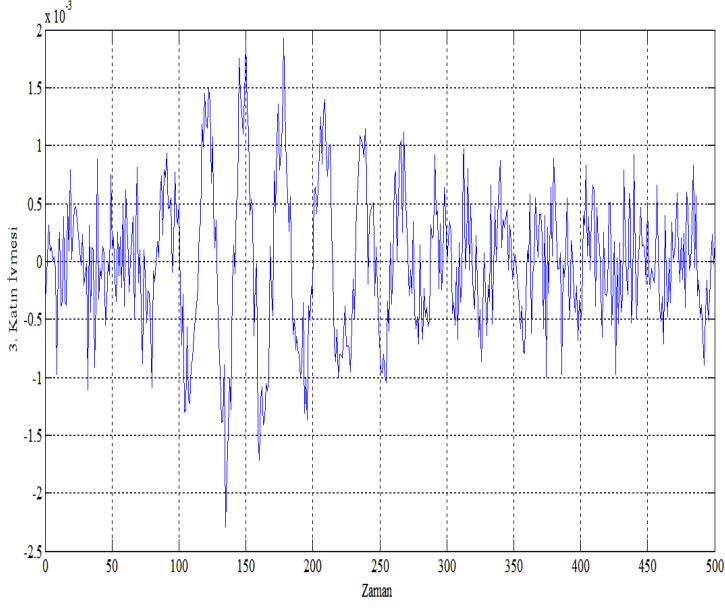
Şekil 4.131. 4. kata etkiyen kuvvetin zamana bağlı değişimi



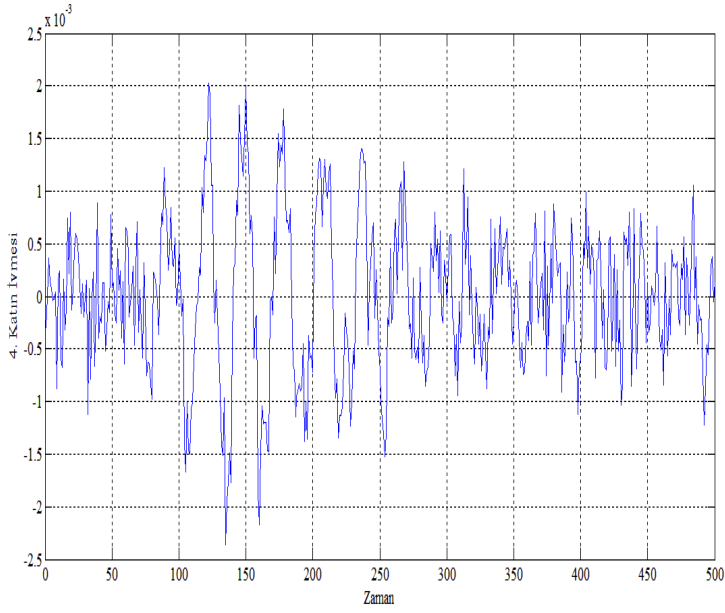
Şekil 4.132. 1. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



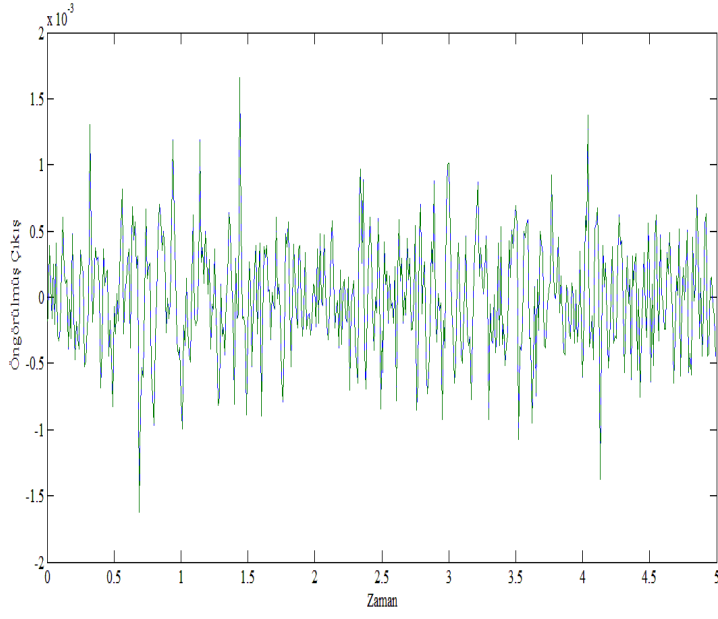
Şekil 4.133. 2. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



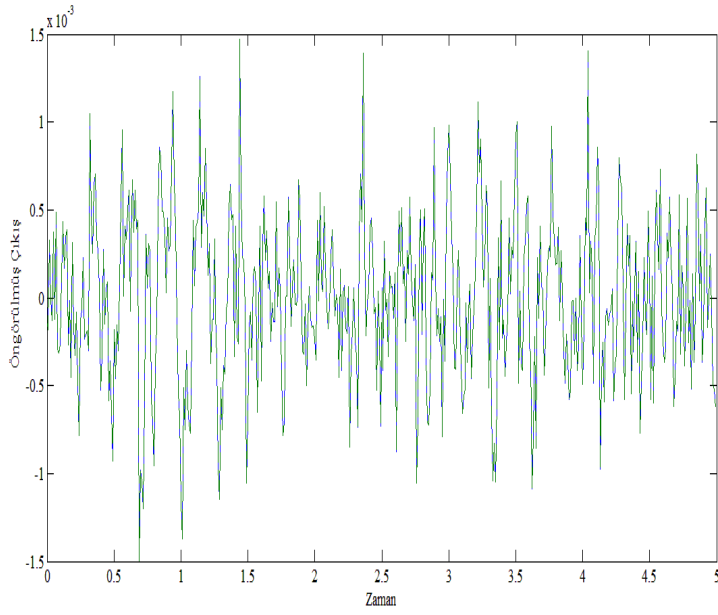
Şekil 4.134. 3. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



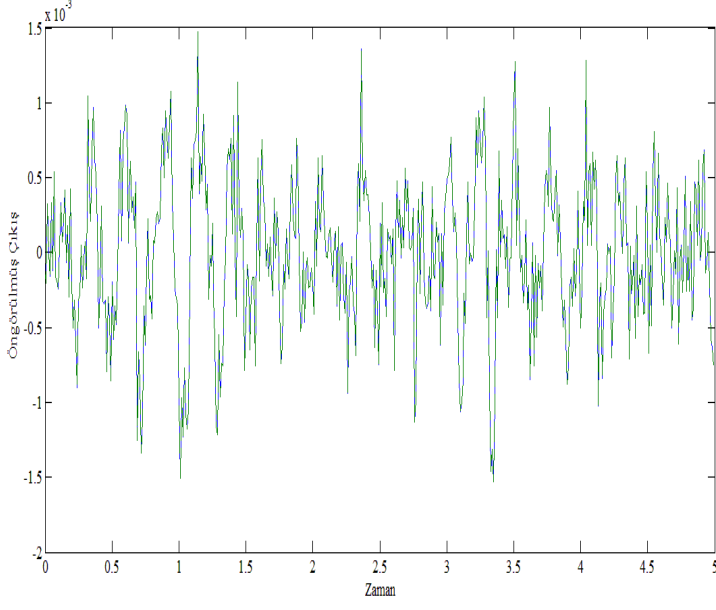
Şekil 4.135. 4. katta ölçülmüş ivmenin zamana bağlı değişimi



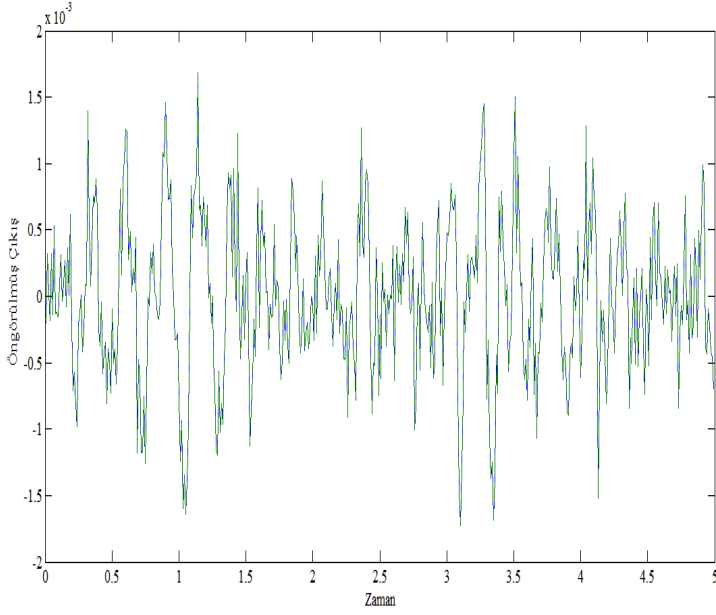
Şekil 4.136. 1. katta öngörülünmüş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması



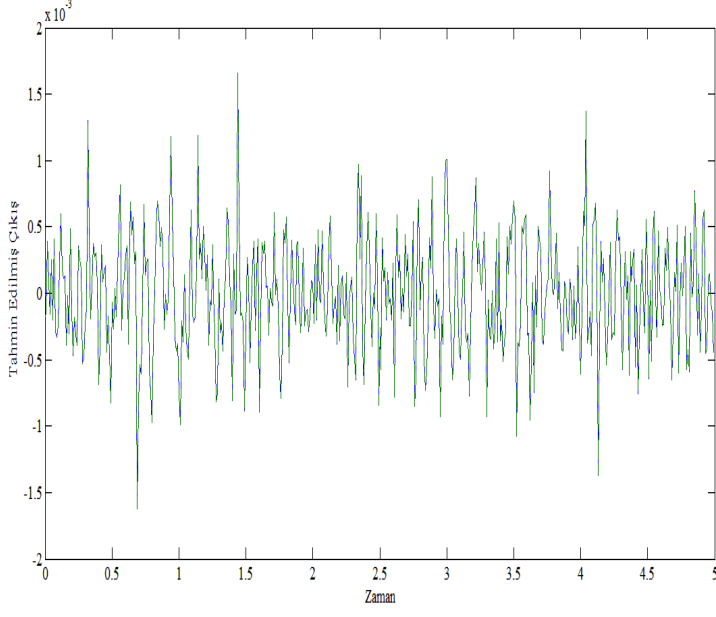
Şekil 4.137. 2. katta öngörülünmüş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması



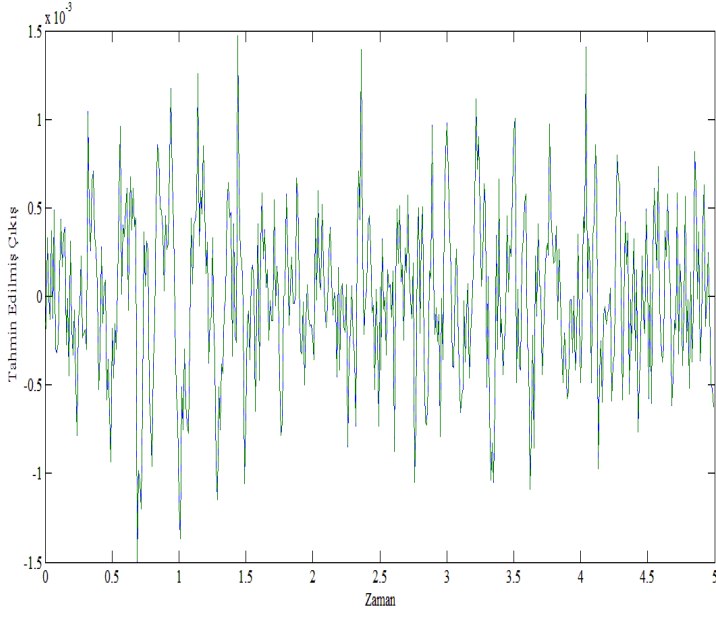
Şekil 4.138. 3. katta öngörölmüş çıkış ile ölçölmüş çıkışın karşılaştırılması



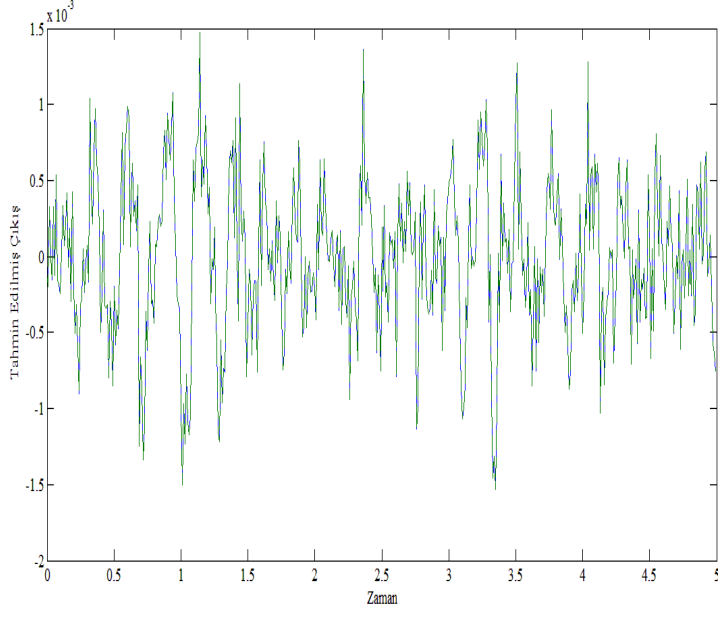
Şekil 4.139. 4. katta öngörölmüş çıkış ile ölçölmüş çıkışın karşılaştırılması



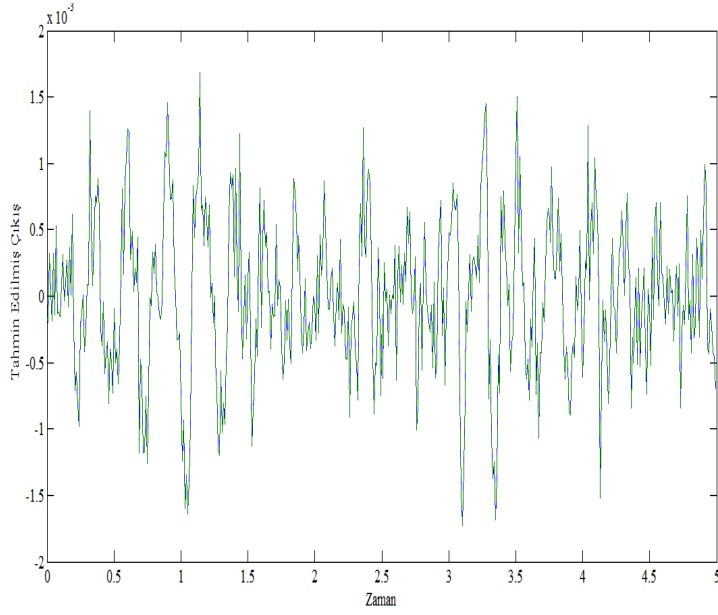
Şekil 4.140. 1. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması



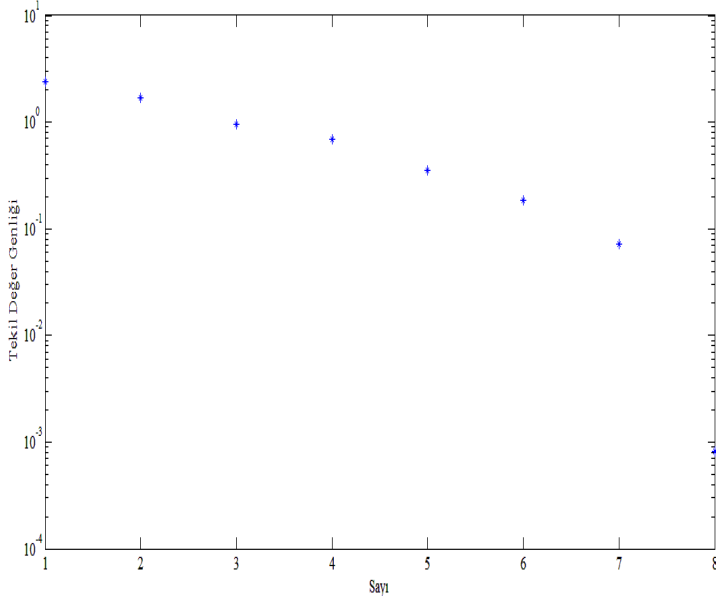
Şekil 4.141. 2. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması



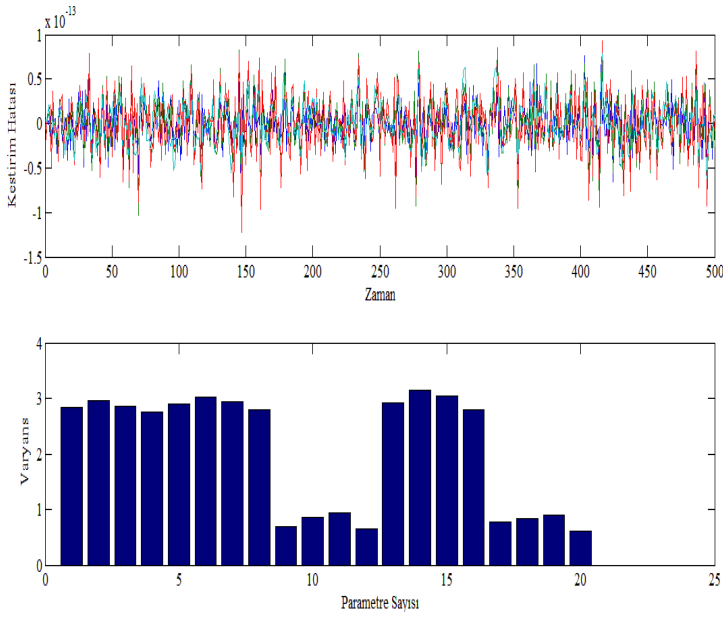
Şekil 4.142. 3. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması



Şekil 4.143. 4. katta tahmin edilmiş çıkış ile ölçülmüş çıkışın karşılaştırılması



Şekil 4.144. Tekil değerlerin dağılımı



Şekil 4.145. Kestirim hatası ve varyans değişimi

4.4.2.1. Çevresel Mikrotremor Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Modal Parametreleri

Açısal frekanslar (rad/sn) :

$$\omega = \begin{bmatrix} 2.1716 \cdot 10^1 \\ 5.9862 \cdot 10^1 \\ 9.0453 \cdot 10^1 \\ 1.1238 \cdot 10^2 \end{bmatrix}$$

Sönüm oranları:

$$\xi = \begin{bmatrix} 4.9599 \cdot 10^{-2} \\ 4.9666 \cdot 10^{-2} \\ 4.9724 \cdot 10^{-2} \\ 4.9875 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Periyotlar (sn) :

$$T = \begin{bmatrix} 2.8934 \cdot 10^{-1} \\ 1.0496 \cdot 10^{-1} \\ 6.9464 \cdot 10^{-2} \\ 5.5909 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix}$$

4.4.2.2. Çevresel Mikrotremor Etkisinde Çelik Deney Yapısının Sistem Tanımlama Metodu ile Bulunmuş Fiziksel Parametreleri

Kütle matrisi (kNsn²/m) :

$$m = \begin{bmatrix} 4.23 & 6.17 \cdot 10^{-12} & 3.26 \cdot 10^{-12} & 1.48 \cdot 10^{-13} \\ 6.17 \cdot 10^{-12} & 3.44 & 4.75 \cdot 10^{-12} & 3.57 \cdot 10^{-12} \\ 3.26 \cdot 10^{-12} & 4.75 \cdot 10^{-12} & 3.44 & 7.72 \cdot 10^{-12} \\ 1.48 \cdot 10^{-13} & 3.57 \cdot 10^{-12} & 7.72 \cdot 10^{-12} & 2.71 \end{bmatrix}$$

Sönüm matrisi (kNsn/m):

$$c = \begin{bmatrix} 3.09 \cdot 10^1 & -8.57 & -1.67 & -6.94 \cdot 10^{-1} \\ -8.57 & 2.67 \cdot 10^1 & -8.87 & -1.88 \\ -1.67 & -8.87 & 2.55 \cdot 10^1 & -9.57 \\ -6.94 \cdot 10^{-1} & -1.88 & -9.57 & 1.58 \cdot 10^1 \end{bmatrix}$$

Rijitlik matrisi (kN/m):

$$k = \begin{bmatrix} 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 & 1.53 \cdot 10^{-9} & -1.20 \cdot 10^{-8} \\ -1.24 \cdot 10^4 & 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 & -7.39 \cdot 10^{-10} \\ 1.55 \cdot 10^{-9} & -1.24 \cdot 10^4 & 2.48 \cdot 10^4 & -1.24 \cdot 10^4 \\ -1.20 \cdot 10^{-8} & -7.18 \cdot 10^{-10} & -1.24 \cdot 10^4 & 1.24 \cdot 10^4 \end{bmatrix}$$

5. SONUÇLAR

Yapıların, deprem güvenliğinin değerlendirilmesi çalışmaları kapsamında, yapı parametrelerinin tahribatsız belirlenmesi ve deprem performansı konusunda tezin giriş kısmında algoritması verilmiş olan (Şekil 1.1) “Deneysel İnceleme Sistemi” oluşturularak incelemeler yapılmıştır. Daha sonra teze özgü olarak oluşturulmuş “sistem tanımlama metodu” başlığı altında teorik esasları verilmiş olan yöntem incelemelerin kolaylıkla her yapı türüne uygulanabilmesi için bilgisayar yazılımı haline getirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Yazılıma ait algoritma Ek-A’ da verilmiştir.

Tüm bu incelemelerden elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Veri toplama ile ilgili olarak, yapılmış olan çalışmalar göstermiştir ki deneysel modelin (DM) koordinatları ile sonlu eleman modelinin koordinatları tam olarak çakıştığında giriş ve çıkış verileri kesin olarak ölçülebilmektedir. Aksi takdirde ivme ölçerlerin koordinatlarından kaynaklı problemler oluşabilmektedir.
- Tepki ölçümlerinde göze çarpan en önemli ayrıntı, ÇGÇÇ sistemlerin üstünlüğünün bir kez daha kanıtlanmış olmasıdır. Bunun sebebi, ÇGÇÇ ölçümlerde etki noktasının birden fazla oluşu ve ölçüm noktaları değişken olduğundan FTF matrisinin birden fazla sütununun ölçülmesidir. Tezdeki incelemelerde de ÇGÇÇ ölçümler kullanılmıştır.
- Diğer bir gözlemlenmiş sonuçta yapısal olmayan mod şekillerinin, MGK değerlerini dikkate alarak göz ardı etmenin gerekliliğidir. Eğer MGK değerinde herhangi bir sınırlama olmadan modal eşleşme yapılır ise, hem işlemlerin süresi hem de yapının hassaslığa sebep olan katsayılarının aralığı genişler. Buda yapıların modal ve fiziksel parametrelerinin güncellenmesinde sonucun sapmasına neden olur.
- Materyal ve metot kısmında verilmiş olan dış artığın “0” olması $\{E(e_k)\} = \{0\}$ koşulunun kapalı döngü olarak kullanılması da teze ayrıca bir özgünlük katmıştır. Kalman filtresi kullanılarak modal ve fiziksel parametreler netleştirilirken (güncellenirken) dış artığın “0” olmaması durumunda işlemler tekrarlanmaktadır. Burada güncelleme metotlarından tekrarlı yöntemlerin kullanımı sağlanarak sonuca gidilmiştir.
- Elde edilmiş niteleyici ve sayısal sonuçlar, sonlu elemanlarla model güncellenmenin özellikle çelik yapılarda eleman düğüm bağlantısı rijitliklerinin belirlenmesinde ve

bağlantı türüne uygun rijitliğin sistem tanımlama metodunda daha gerçekçi hesaba katılmasında temel araştırma yöntemi olduğunu ortaya koymuştur.

- MGK değeri, sonlu eleman modeli (SM) ve deneysel model (DM) arasındaki eşleşmelerin aynı kalmasına rağmen değişim göstermektedir. Bu sonucun ortaya çıkmasındaki sebebin güncelleme sırasında değişen modal ve fiziksel parametrelerden kaynaklandığı belirlenmiştir.
- Betonarme binanın sonlu eleman model güncellemesinde, parametre olarak sırasıyla betonarme elastisite modülü (E), betonarme birim hacim ağırlığı (ρ) ve betonarme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı birlikte ($E + \rho$) seçilmiştir. Bu seçimlerdeki MGK değerlerinin güncelleme öncesi ve sonrası değerleri incelendiğinde, aynı anda iki parametre seçmenin MGK değerlerini toplamda olumlu yönde değiştirdiği ve bu açıdan daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında tüm yapılar için aynı anda birden fazla güncelleme parametresi seçmenin daha faydalı olacağı tespit edilmiştir.
- X ve Y doğrultularındaki eksentrisite ve taşıyıcı sistem düzensizlikleri betonarme binanın güncellemesi sırasında 2. kattaki elemanlarda kendini göstermiştir. Hasar tespiti yapılır iken eksentrisite ve taşıyıcı sistem düzensizlikleri olan katlara odaklanılmasında fayda olduğu görülmüştür.
- Betonarme binada yapılmış olan incelemelerde hasarlı olabilecek bölgeler tespit edilmiş ve bu bölgelerdeki elemanlar belirlenmiştir. Hasar terimi, malzeme elastisite modülü (E) ve birim hacim ağırlığı (ρ)'nın projede kabul edilmiş değerleri yansıtmadığını ortaya koymuştur. Bilindiği gibi yapının fiziksel parametreleri direkt olarak modal parametrelerini etkilemektedir. Bu açıdan, yapıların kütle (m) ve rijitlik (k) değerlerini etkileyecek olan her değişim yapının fiziksel parametrelerinin yanında modal parametrelerini de etkileyecektir.
- Malzeme olarak betona göre daha homojen olan çelik yapıların model güncellemesi sırasında parametre seçiminde, çok dar bir aralıkta değişen malzemeye bağlı özellikler seçilmemelidir. Bunun yanında eleman kesit özelliklerine bağlı (kesit alanı, atalet momenti, v.s.) seçimler yapmak daha verimli olmaktadır.
- Sistem tanımlama metodu ile yapılan incelemelerde iki yapı (betonarme bina ve çelik deney yapısı) içinde mevcut durumdaki modal ve fiziksel parametreler giriş-çıkış verilerine dayanarak yüksek kesinlikte bulunmuştur. Bu sonuca dayanarak, yeterli

düzeyde giriş-çıkış verisi ölçülmüş olan tüm yapıların modal ve fiziksel parametreleri kesin olarak bulunabilmektedir. Ayrıca bulunmuş olan modal parametrelere (ω, ξ, T) ve güncelleme sonuçlarına dayalı olarak yapıların deprem performansı hakkında değerlendirmeler yapılabilmektedir.

- Sistem tanımlama metodunun işleyişinde sadece çıkış (tepki) ve/veya giriş (etki) verilerine ihtiyaç vardır. Deneysel inceleme sistemi olarak ifade edilmiş olunan algoritma ile de sonuçlar kontrol amaçlı değerlendirilebilmektedir.
- Deneysel inceleme sistemi ile yapılmış olan incelemelerde de sistem tanımlama metodu ile ulaşılmış olan modal sonuçlara aynen ulaşılmıştır. Fiziksel parametrelere geçildiğinde de sonuçların çakıştığı görülmüştür.
- Yapının hasarlı olabilecek bölgeleri tahribatsız olarak tahmin edilebilir, bu bölgelerin hasar dereceleri lokal incelemeler yapılarak değerlendirilebilir. Yapıların güvenilirliğinin tespiti bu sonuçlara dayalı olarak incelenmektedir. Model güncellemesiyle çok sayılı uygulama sonuçları istatistiğine dayanarak daha güvenli yapı imalatı mümkün olabilecektir. Mevcut yapıların onarım ve güçlendirmesi daha net yapılabilecektir. Bu kapsamda, MF-046 no' lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolon ve kirişlerin sayısal (SEM)-deneysel incelemesi yapılmıştır (Kasımzade ve Tuhta, 2005).

6. KAYNAKLAR

- Ackerson, G.A., Fu, K.S., 1970. On State Estimation in Switching Environments. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-15; 10-17.
- Alengrin, G., Zerubia, S., 1987. A Method to Estimate the Parameters of an ARMA Model, IEEE Transactions on Automatic Control. AC-32, 12, 1113-1116.
- Andersen P., Brincker R., Goursat M., Mevel L. 2007, Automated Modal Parameter Estimation for Operational Modal Analysis of Large Systems, First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, 10p.
- Andry, A. N., Chung, J.C., 1983. Eigenstructure assignment for linear systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 19(5), s. 711-729
- Aström, K.J., Wittenmark, B., 1989. Adaptive Control. Addison-Wesley Publishing Company, USA. 526 p.
- Bar-Shalom, Y., Li, X.R., 1993. Estimation and Tracking Principles, Techniques, and Software. Artech House, Inc., Londra.
- Berger, H., Chaquin, J.P., Ohayon, R., 1984. Finite Element Modal Adjustment Using Experimental Modal Data, 2th Int. Modal Analysis Conf, s. 1-5
- Berman, A., 1979. Mass Matrix Correction Using an Incomplete Set of Measured Modes. AIAA Journal, 17(1), 1147-1148.
- Berman, A., 1984. "System Identification of Structural Dynamic Models -Theoretical and Practical Bounds." AIAA conference paper 84-0929, pp. 123-129
- Bicanic, N., Chen, H., 1997. Damage identifications in frame structures using natural frequencies, Int. J. Numer. Methods Eng., 40, 4451-4468
- Brownjohn J., Carden P. 2007, Reliability of Frequency and Damping Estimates from Free Vibration Response, First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, 8p.
- Brownjohn, J.M.W., Xia, P.Q., 2000. Dynamic assessment of curved cable-stayed bridge by model updating, Journal of Structural Engineering, 126, 252-260
- Caesar, B., 1986. Update and identification dynamic mathematical models, Proc. Of the 4,h IMAC, s. 394-401, Los Angeles, California
- Chai, H., Acernley, P.P., 1992. Induction Motor Parameter Estimation Algorithm Using Spectral Analysis, IEE Proceedings-B. 139, 3, 165-174.
- Chen, G., 2001. FE Model validation for structural dynamics, PhD Thesis, Imperial College, London, SW7, U.K.
- Cheni, J.C., Garba, J.A., 1980. Analytical model improvement using modal test results, AIAA Journal, 18(6), s. 684-690
- Chu, Y., Rudisi, U.C.S., 1975. Numerical methods for evaluating the derivatives of eigenvalues and eigenvectors, AIAA Journal, s. 834-837.
- Chung, H.Y., Sun, Y.Y., 1988. Analysis and Parameter Estimation of Nonlinear Systems with Hammerstein Model Using Taylor Series Approach, IEEE Transaction on Circuits and Systems. 35,12, 1539-1542.
- Collins, J.D., Hart, G.C., Hasselman, T.K., Kennedy, B., 1974. Statistical Identification of Structures, AIAA Journal, Vol. 12,2, s. 185-190.
- Collins, J.D., Young, J., Keifling, L., 1972. Methods and applications of system identification in shock and vibration, System identification of vibrating structures, annual meeting of ASME, s. 45-71.

- Cunha, A., Catano E., 2005. From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures, 1st International Operational Modal Analysis Conference, p. 11-29, Copenhagen, Denmark.
- Darouach, M., 1992. Boutayeb, M., Recursive State and Parameter Estimation of SISO Singular Systems, IEE Proceedinas-D. 139, 2, 204-206.
- Darouach, M., Bassong, A., 1991. Recursive State Estimation for Linear Dynamic Systems Under Algebraic Constraints, Electronics Letters. 27, 10, 803-804.
- Dascotte, E., 1990. Practical applications of finite element tuning using experimental modal data, Proc. of the 8th IMAC, s. 1032-1037, Kissimmee, Florida.
- Dascotte, E., Vanhonacker, P., 1989. Development of an automatic model updating program, Proc. of the 7th IMAC, s. 596-602, Las Vegas, Nevada.
- De Kock, J.A., V.der Merwe, F.S., Vermeulen, H.J., 1994. Induction Motor Parameter Estimation Through an Output Error Technique, IEEE Transactions on Energy Conversion. 9,1, 69-76.
- Doubling, S.W., Farrar, C.R., 1997. Using statistical analysis to enhance modal-base damage identification, Proceeding of DAMAS 97, Sheffield, UK, 199-210.
- Elramsisi, A.M., Zohdy, M.A., Loh N.K., 1991. A Joint Frequency-Position Domain Structure Identification of Nonlinear Discrete-Time Systems by Neural Networks, IEEE Transactions on Automatic Control. 36,5, 629-635.
- Fagin, S.L., 1964. Recursive Linear Regression Theory, Optimal Filter Theory and Error Analysis Optimal System. IEEE Int. Convention Record, Vol. 16; 216-240.
- Farrar, C.R., Doebling, S.W., 1997. Cornwell, P. J. and E. G. Straser 'Variability of modal parameters measured on the Alamosa Canyon Bridge', Proc. 15th International Modal Analysis Conference, Orlando, FL.
- Farrell, J.A., Barth, M., 1999. The Global Positioning System & Inertial Navigation, McGraw-Hill, USA.
- Felrj, V., Cerrada, J.A., Cerrada, C., 1988. An Algorithm to Compute the Continuous State Model From Its Equivalent Discrete Model. Control Theory and Advanced Technology, 4(2):231-241.
- Fisette, E., Stavrinidis, C., Ibrahim, S., 1988. Error Location and Updating of Analytical Dynamic Models Using a Force Balance Method, 6th Int. Modal Analysis Conf, s. 1063-1070.
- Fitzgerald, R.J., 1971. Divergence of the Kalman Filter. IEEE Trans. Auto. Control, Vol. AC-16; 736-747.
- Fox, R.L., Kapoor., M.P., 1968. Rate of change of eigenvalues and eigenvectors, AIAA Journal, 12(6), s. 2426-2429.
- Franklin, G.F., Powell, D., 1980. Digital Control of Dynamic Systems. Addison-Wesley Publishing Company, USA. 335 p.
- Friswell, M.I., 1989. The adjustment of structural parameters using a minimum variance estimator, Journal of mechanical systems and signal processing, 3(2), s. 143-155.
- Friswell, M.I., 1990. "Candidate Reduced Order Models for Structural Parameter Estimation." Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, 112(1), 93-97.
- Friswell, M.I., Inman, D.J., Pilkey, D.F., 1998. The direct updating of damping and stiffness matrices, AI AA Journal, 36, 491-493.
- Friswell, M.I., Mottershead J.E., 1995. Finite element model updating in structural dynamics, Kluwer Academic Publishers, London.

- Fritzen, C.P., Bohle K., 1999. Identification of damage in large scale structures by means of measured FRFs-Procedure and application to the I40 highway bridge, proceeding of DAMAS 99, Dublin, Ireland, 310-319.
- Fritzen, C.P., Jennewein, D., Kiefer, T., 1998. Damage detection based on model updating methods, *Mechanical System and Signal Processing*, 12, 163-186.
- Fukuzono, K., 1986. Investigation of Multiple Reference Ibrahim Time Domain Parameter Estimation Technique. M.S. Thesis, Dept. of Mechanical and Industry Engineering, University of Cincinnati.
- Ge, M., Lui, E.M., 2005. Structural damage detection using system dynamic properties, *Computers and structures*, 83, 2185-2196.
- Giraldo, D.F., 2006. A Structural Health Monitoring Framework for Civil Structures, Ph.D. Thesis, Washington University the Henry Edwin Server Graduate School Department of Civil Engineering, 167 p.
- Gladwell, G.M.L., Ahmadian, H., 1994. "Families of Acceptable Element Matrices for Finite Element Model Updating." *Mechanical Systems and Signal Processing*, in press.
- Grewal, S.G., Weill, L.R., Andrews, P.A., 2001. *Global Positioning systems, Inertial Navigation and Integration*, John Wiley & Sons, USA.
- Hao, H., Xia, Y., 2002. Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithms, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE 16, 222-229
- Hashemipoor, H.R., Roy, S., Laub, A.J., 1988. Decentralized Structures for Paralel Kalman Filtering. *IEEE Trans. Auto. Control.*, Vol. 33.
- Herring, T.A., 1999. Geodesy by Radio Interferometry: The Application of Kalman Filtering to the Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data, *Journal of Geophysical Research*, Vol.95, B8, pp. 12,561-12, 581.
- Herring, T.A., 1999. *Global Positioning System and its Applications*, Graduate Course, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Heunecke, O., Welsch, W.M., 2001. *Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations*, FIG Publication, No: 25, ISBN: 87-90907-10-8, Frederiksberg, Denmark.
- Heylen, W., 1987. Optimization of model matrices of mechanical structures using experimental modal data, PhD Thesis, K. U. Leuven, Belgium.
- Horvath, M., 1991. Parameter Estimation for Linear Discrete-Time Models with Random Coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 36, 10, 1213-1215.
- Ibrahim, S.R., Mikulcik, E.C., 1977. A method for the direct identification of vibration parameters from the free response, *Shock and Vibration Bulletin*, Vol.47, No:4, p. 183-198.
- Imregun, M., Visser, W.J., 1991. A review of modal updating techniques, *The shock and Vibration Digest*, 23, 9-20.
- Jazwinski, A.H., 1970. *Stochastic Processes and Filtering Theory*. Academic Pres, New York.
- Johansson, R., 1993. *System Modeling and Identification*. Prentice Hail, New Jersey. 512 p.
- Johansson, R., 1994. Identification of Continuous-Time Models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(4):887-897.
- Juang J.N., Pappa, R.S., 1985. An Eigensystem Realization Algorithm For Modal Parameter Identification And Model Reduction, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No.5, pp. 620.

- Jung, H., 1992. Structural dynamic model updating using eigensensitivity analysis, PhD Thesis, Imperial College, London, SW7, U.K.
- Kabe, A.M., 1985, "Stiffness matrix adjustment using mode data," AIAA Journal 23(9), 1431-1436.
- Kalman, R.E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering, Vol. 83D, 95-108.
- Kamas, L.A., Sanders, S.R., 1993. Parameter and State Estimation in Power Electronics Circuits, IEEE Transactions on Circuits and Systems-1: Fundamental Theory and Applications. 40, 12, 920–928.
- 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. 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., 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., 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., 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. A., Tuhta, S. 2007. Ambient Vibration Analysis of Steel Structure, First International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhagen, Denmark, 9p.

- Kasimzade, A.A., Tuhta, S., 2007. Ambient Vibration Analysis of Steel Structure, Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07), Porto, Portugal, 10p.
- Kasimzade, 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.
- Kasimzade, 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.
- Kasimzade, 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.
- Kasimzade 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
- Kay, S., 1988. Modern Spectral Estimation: Theory and Application. Prentice Hall, University of Rhode Island, UK.
- Kenigsbueh, R., Halevi, Y., 1997. Generalized reference basis model updating in structural dynamics, Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference, s. 1 -9.
- Koh, C. G., and See, L. M., 1994. Identification and uncertainty estimation of structural parameters, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, V120, pp. 1219-1236.
- Kosmatka, J.B., Ricles, J.M., 1999. Damage detection in structures by modal vibration characterization, Journal of Structural Engineering, 125, 1384-1392.
- Kowalczyk, Z., Kozłowski, J., 2000. Continuous-time Approaches to Identification of Continuous-time Systems. Automatica, 36:1229-1236.
- Kuo, C.P., Wada, B.K., 1987. Nonlinear sensitivity coefficient and correction in system identification, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, s. 1463-1468.
- Labarre, D., Grivel, E., Najim, M., Todini, E., 2003. Two-Kalman Filtler Approach for Unbiased AR Parameter Estimation from Noisy Observations, Application to Speech Enhancement. Equipe Signal and Image, UMR LAP 5131, Talence France.
- Lastman, G.J., Sinha, N.K., 1989. Microcomputer-based Numerical Methods for Science and Engineering. Saunders College Publishing, New York. 463 p.
- Li, S., Dickinson W., 1986. An Efficient Method to Compute Consistent Estimates of the AR Parameters of an ARMA Model, IEEE Transactions Automatic Control. AC-31, 275-278.
- Li, S.M., Brown, D.L., 1995. Application of unified matrix polynomial approach (UNPA) to perturb boundary condition (PBC) testing, Mechanical System and Signal Processing, 9, 77-84.
- Liaw, C.M., Liu, T.S., Liu, A.H., Chen, Y.T., Lin, C.J., 1992. Parameter Estimation of Excitation Systems from Sampled Data, IEEE Transactions on Automatic Control. 37, 5, 663-666.

- Lieven, N.A.J., Ewins, D.J., 1990. Error location and updating finite element models using singular value decomposition, Proc. of the 8th IMAC, s. 768-773, Kissimmee, Florida.
- Lim, K.B., 1987. Re-examination of eigenvector derivatives, AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 10(6), s. 581-587.
- Lin, H., Atherton, D.P., 1993. Investigation of IMM Tracking Algorithm for The Maneuvering Target Tracking. First IEEE Regional Conf. On Aerospace Control System; 113-117.
- Lindholm, B.E., West, R.L., 1996. A Bayesian statistics approach to updating finite element models with frequency response data (part 1: Theory), Proceedings of IMAC 14, s. 1451-1457.
- Link., M., Weiland, M., Bassagan, J.M., 1987. Direct physical matrix identification as compared to phase resonance testing: An assessment based on practical application, Proc. of the 5th IMAC, s. 804-811, London, England.
- Ljung, L., 1987. System Identification: Theory for the User. Prentice Hall, Nevv Jersey. 519 p.
- Lus, H., De Angelis, M., Betti, R., Longman, R. W., 2003. Constructing second-order models of mechanical systems from identified state space realizations. Part I: theoretical discussions J. Eng. Mech. 129 477-88.
- Magill, D.T., 1965. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Process. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-10; 434-439.
- Maia, N., 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies. Press, UK.
- Mazor, E., Averbuch, A., Bar-Shalom, Y., Dayan J., 1993. Interacting Multiple Model Methods in Target Tracking: A Survey. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-29, Vol3; 755-771.
- Mehra, R.K., 1972. Approaches to Adaptive Filtering. IEEE Trans. Auto. control, Vol.AC-17; 693-698.
- Merwe, R., Wan, E., 2001. The Square-Root Unscented Kalman Filter for State and Parameter – Estimation. Oregon Graduate Institute of Science and Technology, Oregon, USA.
- Moore M., Wang J., 2001. Adaptive dynamic modelling for kinematic positioning. IAG Scientific Meeting, Budapest, Hungary, 3-8 September.
- Moore M., Wang J., 2002. An extended dynamic model for kinematic positioning, submitted to Navigation.
- Moore., B.C., 1976. On the flexibility offered by state feedback in multivariable system beyond closed loop eigenvalue assignment, IEEE Transactions on Automatic Control, s. 689-692 Inman, D. J., and Minas., C, 1990, Matching finite element models to modal data, Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics,s. 84-92.
- Mottershead, J.E., Friswell, M.I., 1993. Model updating in structural dynamics: a survey, Journal of Sound and Vibration, 167, 347-375.
- Nalitolela, N., Penny, J.E.T., Friswell, M.I., 1992. A mass or stiffness addition technique for structural parameter updating, International Journal of Analitical and Experimental Modal Analysis, 7, 157-168.
- Natke, H.G., 1988. Updating computational models in the frequency domain based on measured data: A survey, Probabilistic Engineering Mechanics, s. 28-35.
- Natke, H.G., Cempel, C., 1997. Model-aided diagnosis based on symptoms, Proceedings of DAMAS 97, Sheffield, UK, 363-374.

- Nelson, A., 2000. Non-Linear Estimation and Modelling of Noisy Time-Series by Dual Kalman Filtering Methods. A Dissertation Submitted to the Faculty of the Oregon Graduate Institute of Science and Technology in Partial fulfillment of the requirements for the degree Doctoral of Philosophy in Electrical and Computer Engineering, Oregon, USA.
- Nelson, A., Wan, E., 1999. Neural Speech Enhancement Using Dual Extended Kalman Filtering. 0-7803-4122-8/97 IEEE.
- Nelson, A.T., Merwe, W., 2004. Kalman Filter and Neural Networks. Mc.GrawHill, Chap.1-2-3-4-5-6-7, UK.
- Odabaşı, Y., 1997. Betonarme İnşaat Elemanları, 274 sayfa.
- Ojalvo, I.U., 1987. Efficient computation of mode shape derivatives for large dynamic systems, AIAA Journal, s. 1386-1390.
- Ojalvo, I.U., Pilon., D., 1991. A second order iteration procedure for correlation of analysis frequencies with test data, Proc. of the 9th IMAC, s. 499-502, Florence, Italy.
- 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.
- Pandey, A.K., Biswas, M., Saman, M.M., 1991. Damage detection from changes in curvature mod shapes, Journal of Sound and Vibration, 145, 321-332.
- Phan, M.Q., Longman, R.W., 2004. "Extracting Mass, Stiffness, and Damping Matrices from Identified State-Space Models," AIAA-2004-5415, Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Providence.
- Rad, S.Z., 1997. Methods for Updating Numerical Models in Structural Dynamics, PhD Thesis, Imperial College, London, SW7, U.K.
- Rao, B.S., Durrant, H.F. 1991. Fully Decentralized Algorithm for Multisensor Kalman Filtering. IEEE Proceeding-D, Vol. 138; 413-420.
- Rao, M.A., Srinivas, J., Murthy, B.S.N., 2004. Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithm, Computers and Structures, 82, 963-968
- Raol, J.R., Madhuranath, H., 1996. Neural Network Architectures for Parameter Estimation of Dynamical Systems, IEE Proc.-Control Theory Appl. 143, 4, 387-394.
- Rodoplu, M., 1995. Örneklenmiş Veriler Yardımıyla Sürekli Zaman Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa. 70 s.
- Rodoplu, M., Türe, M., 1995. Örneklenmiş Veriler Yardımıyla Sürekli Zaman Parametrelerinin Nümerik İntegral Yaklaşımıyla Bulunuşu. Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi Bildirisi. Bursa, 11-17 Eylül 1995, sayfa 968-972.
- Rodoplu, M., Türe, M., 1996. Örneklem Zamanı ve Örnek Sayısının Sürekli Zaman Parametrelerinin Kestirimine Etkisi. TOK'96 Türkiye Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı Bildirisi. İstanbul, 28-29 Mart 1996, sayfa 117-122.
- Rodrigues, J., 2004. Stochastic Modal Identification. Methods and Applications in Civil Engineering Structures, Ph.D. Thesis (in Portug.), Univ. of Porto (FEUP/LNEC).

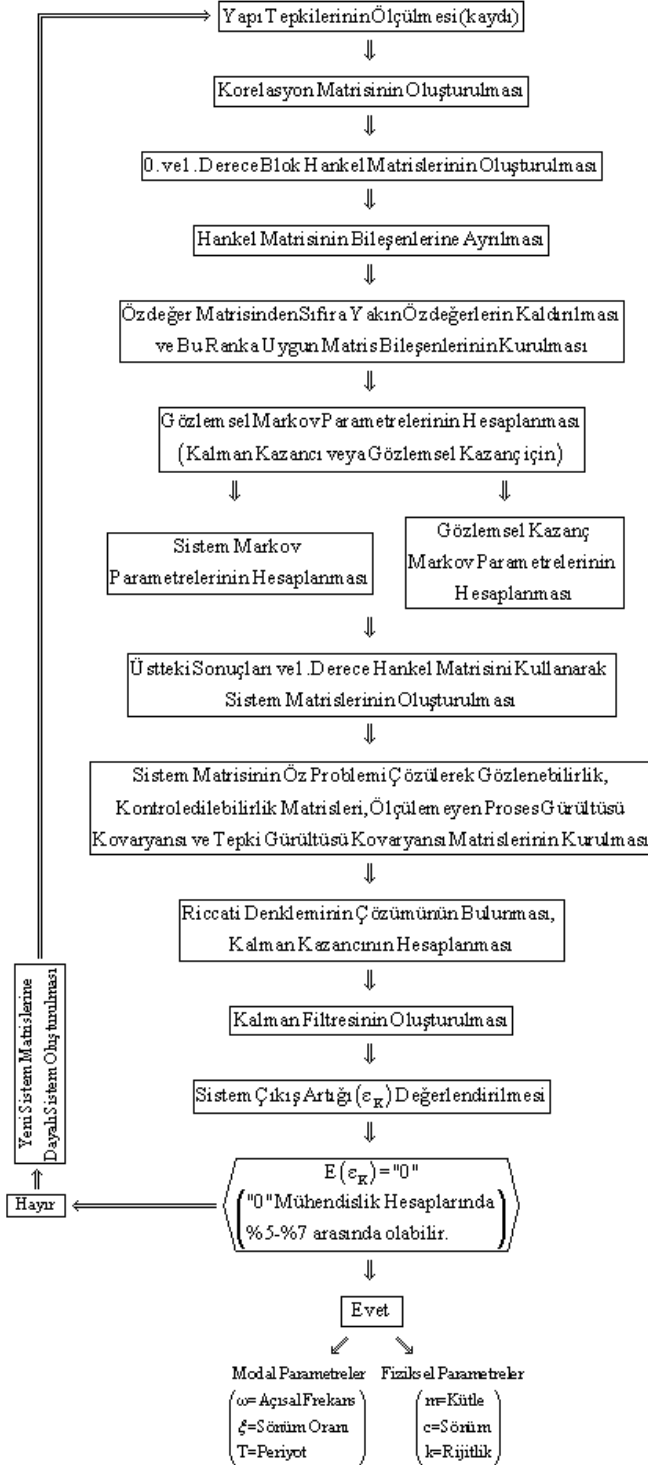
- Ross, R.G., 1971. Synthesis of stiffness and mass matrices from experimental vibration modes, *Aeronautics and Space Engineering and Manufacturing Meeting*, s. 2627-2635.
- Roth, R.S., 1981. Techniques in the Identifications of Deterministic System, *IEEE Transactions on Automatic Control*. AC-26, 5, 1169-1175.
- Şafak, E., 1997. Models and methods to characterize site amplification from a pair of records, *Earthquake Spectra*, EERI, Vol.13, No.1, pp.97-129.
- Şafak, E., Çelebi, M., 1990. Method to estimate center of rigidity of a building using vibration recordings, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.116, No.1, 1990, pp.85-97.
- Şafak, E., Çelebi, M., 1990. New techniques in record analyses: Torsional vibrations, *Proceedings of the Fourth U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, May 20-24, 1990, Palm Springs, California, Vol.2, pp.411-420.
- Sagara, S., Yang Z.J., Wada, K., 1991. Identification of Continuous Systems Using Digital Low-pass Filters. *International Journal of Systems Science*, 22(7): 1159-1176.
- Sagara, S., Yang Z.J., Wada, K., 1991. Recursive Identification Algorithms for Continuous Systems Using An Adaptive Procedure. *International Journal of Control*, 53(2):391-409.
- Sagara, S., Zhao, Z.Y., 1989. Recursive Identification of Transfer Function Matrix in Continuous Systems via Linear Integral Filter. *International Journal of Control*, 50(2):457-477.
- Sagara, S., Zhao, Z.Y., 1990. Numerical Integration Approach to On-line Identification of Continuous-time Systems. *Automatica*, 26(1):63-74.
- Sagara, S., Zhao, Z.Y., 1991. Application of Digital Filtering Techniques. In: N.K. Sinha and G.P. Rao (Editors), *Identification of Continuous-Time Systems*, Kluwer Academic Publishers, p.291-325, The Netherlands.
- Salawu, O.S., 1997. Detection of structural damage through changes in frequency: A Review, *Engineering Structures*, 19, 718-723.
- Sethi, V., Song, G., 2006. Multimode Vibration Control of a Smart Model Frame Structure, *Smart Materials and Structures*, p. 473-479.
- Shi, Z.Y., Law, S.S., Zhang L.M., 2000. Structural damage detection from modal strain energy changes, *Journal of Engineering Mechanics*, 126, 1216-1223.
- Shulz, M.J., Inman, D.J., 1994. Model updating using constrained eigenstructure assignment, *Journal of Sound and Vibration*, 178(1), 113-130.
- Sidhu, J., Ewins, D.J., 1984. Correlation of Finite Element and Modal Test Studies of a Practical Structure, *2nd Int. Modal Analysis Conf*, s. 756-762.
- Sinha, N.K., Kuzsta, B., 1983. *Modeling and Identification of Dynamic Systems*. Van Nostrand and Railroad Company, New York. 334 p.
- Sinha, N.K., Lastman, G.J., 1991. Transformation of Discrete-Time Models. In: N.K. Sinha and G.P. Rao (Editors), *Identification of Continuous-Time Systems*, Kluwer Academic Publishers, p. 123-137, The Netherlands.
- Sinha, N.K., Rao, G.P., 1991. *Identification of Continuous-Time Systems-Methodology and Computer Implementation*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 637 p.
- Smith, S.W. and Beattie, C.A., 1991, "Secant-method adjustment for structural models", *AIAA Journal* 29(1), 119-126.
- Snieder, R., Şafak, E., 2006. Extracting the building response using interferometric imaging; theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 586-598.

- Stubbs, N., Kim J.T., 1996. Damage localization in structures without baseline modal parameters, *AIAA J.*, 34, 1644-1654.
- Subrahmanyam, A.V.B., Rao, G.P., 1993. Identification of Continuous-Time SISO Systems via Markov Parameter Estimation. *IEE Proceedings-D.* 140, 1, 1-10.
- Tan, R.C.E., Andrew, A.L., 1989. Computing derivatives of eigenvalues and eigenvectors by simultaneous iteration, *Institute of Mathematics and its Application, Journal of Numerical Analysis*, 9(1), s. 111-122.
- Teughels, A., Maeck, J., Roeck G.D., 2002. Damage assesment by FE model updating using damage functions, *Computers and Structures*, 80, 1869-1879.
- Thomas, M., 1986. Identification of system physical parameters from force appropriation technique, *Proc. of the 4th IMAC*, s. 1098-1103, Los Angeles, California.
- Thoren, A.R., 1972. Derivation of mass and stiffness matrices from dynamic test data, *AIAA Conference*, 346.
- Tse, E., Weinert, H.L., 1975. Structure Determination and Parameter Identification for Multivariable Stochastic Linear System, *IEEE Transactions on Automatic Control AC-20*, 5, 603-612.
- Tseng D.H., Longman R.W., Juang J.N., 1994. Identification of the structure of the damping matrix in second order mechanical systems. *Advances in Astronautical Sciences*, 87:166–190.
- Unbehauen, H., Rao, G.P., 1990. Continuous-time Approaches to System identification-A Survey. *Automatica*, 26(1):23-35.
- Unbehauen, H., Rao, G.P., 1998. A Review of Identification in Continuous-Time Systems. *Annual Reviews in Control*, 22:145-171.
- Vestroni, F., Capecchi, D., 2000. Damage detection in beam structures based on frequency measurement, *Journal of Engineering Mechanics*, 126, 761-768.
- Visser, W.J., 1992. Updating Structural Dynamics Models Using Frequency Response Data, PhD Thesis, Imperial College, London, SW7, U.K.
- Wan, E., 1993. Finite Impulse Response Neural Networks with Applications in Time Series Prediction. A Dissertation Submitted to the Department of Electrical Engineering and The Committee on Graduate Studies of Stanford University in Partial Fulfillment of The Requirements for The Degree of Doctor of Philosophy, USA.
- Wei, F.S., 1990. Structural dynamic model improvement using vibration test data, *AIAA Journal*, 28, 175-177.
- Wei, J.C., 1989. Correction of finite element model via selected physical parameters, *Proc. of the 7th IMAC*, s. 1231-1238, Las Vegas, Nevada.
- Wong, K.Y., Polak, E., 1967. Identification of Linear Discrete Time System Using the Instrumental Variable Method, *IEEE Transactions on Automatic Control. AC-12*, 6, 707-718.
- Xia, Q., Rao, M., Ying, Y., Shen, X., 1994. Adaptive Fading Kalman Filter with an Application. *Automatica*, Vol. 30, No: 8; 1333-1338.
- Yang, Z.J., Tsuji, T., Sagara, S., 1994. Integral-equation Approach to Parameter Identification without Consideration of Initial Conditions. *International Journal of Systems Science*, 25(4):763-774.
- Yeddanapudi, M., Bar-Shalom, Y., Pattipati, K.R., 1997. IMM Estimator for Multitarget-Multisensor Air Traffic Control. *Proceedings of the IEEE*, Vol 85, No 1; 80-94.

- Young, P., 1970. An Instrumental Variable Method for Real-time Identification of a Noisy Process. *Automatica*, 6:271-287.
- Young, P., 1981. Parameter Estimation for Continuous-Time Models-A Survey. *Automatica*, 17(1):23-39.
- Yu, E., Wallace, J.W., Taciroglu, E., 2006. Parameter identification of framed structures using an improved finite element model updating method-Part II: Application to experimental data, *Earth. Eng. and Struc. Dynamic*, 36, 641-660.
- Zadeh, L.A., 1962. From circuit theory to system theory, *IRE Proceedings*, 50(5), 856-865.
- Zhang, Q., Wang, W., Allemang, R.J., Brown, D.L., 1988. Prediction of Mass Modification for Desired Natural Frequencies, *IMAC 6*, s. 1026-1032.
- Ziaei Rad, S., Imregun, M., 1996. Use of generic elements for model updating, *Proc. of the 21st International Seminar on Modal Analysis*, s.1895-1906, Leuven, Belgium.

7. EKLER

EK-A Yapıların Modal ve Fizik Parametrelerini Belirleyen Yazılıma ait Algoritma



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sertaç TUHTA

Doğum Yeri : Samsun

Doğum Tarihi : 02.05.1979

Medeni Hali : Bekar

Bildiği Yabancı Diller: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : 19 Mayıs Lisesi

Lisans : 19 Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü

Yüksek Lisans : 19 Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü

Çalıştığı Kurum ve Yıl: 19 Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, 2002-

İletişim Bilgileri: 19 Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, 55139, Atakum/SAMSUN