

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



**FARKLI TİPTEKİ YAPILARIN YAPISAL SAĞLIK
TAKİBİNDE (STRUCTURAL HEALTH MONITORING)
KULLANILACAK SENSÖRLERİN SAYISININ VE
LOKASYONUNUN OPTİMİZE EDİLMESİ**

Proje No: FYL-2017-7112

Bilimsel Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Müslüm KILINÇ
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Araştırmacı:
Nurullah TOPKARAOĞLU
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Aralık 2017

KAYSERİ

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI TİPTEKİ YAPILARIN YAPISAL SAĞLIK TAKİBİNDE
(STRUCTURAL HEALTH MONITORING) KULLANILACAK
SENSÖRLERİN SAYISININ VE LOKASYONUNUN OPTİMİZE
EDİLMESİ**

**Hazırlayan
Nurullah TOPKARAOĞLU**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Müslüm KILINÇ**

Yüksek Lisans Tezi

**Aralık 2017
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI TİPTEKİ YAPILARIN YAPISAL SAĞLIK
TAKİBİNDE (STRUCTURAL HEALTH MONITORING)
KULLANILACAK SENSÖRLERİN SAYISININ VE
LOKASYONUNUN OPTİMİZE EDİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Nurullah TOPKARAOĞLU**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Müslüm KILINÇ**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2017-7112 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Aralık 2017
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Nurullah TOPKARAOĞLU

İmza:

YÖNERGEYE UYGUNLUK

Farklı Tipteki Yapıların Yapısal Sağlık Takibinde (Structural Health Monitoring) Kullanılacak Sensörlerin Sayısının ve Lokasyonunun Optimize Edilmesi adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Nurullah TOPKARAOĞLU

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Müslüm KILINÇ

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Fatih ALTUN

Yrd. Doç. Dr. Müslüm KILINÇ danışmanlığında **Nurullah TOPKARAOĞLU** tarafından hazırlanan “**Farklı Tipteki Yapıların Yapısal Sağlık Takibinde (Structural Health Monitoring) Kullanılacak Sensörlerin Sayısının ve Lokasyonunun Optimize Edilmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

25.12.2017

JÜRİ:

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Müslüm KILINÇ

Üye : Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Cihan ÇİFTÇİ

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 26/12/2017 tarih ve 2017/55-31 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi olan sayın hocam Yrd. Doç Dr. Müslüm KILINÇ’a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamdaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç Dr. Müslüm KILINÇ ve aynı laboratuvarı paylaştığımız çalışma arkadaşım Erdal Vural’a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne (Proje No: FYL-2017-7112) teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Nurullah TOPKARAOĞLU

Kayseri, Aralık 2017

**FARKLI TİPTEKİ YAPILARIN YAPISAL SAĞLIK TAKİBİNDE
(STRUCTURAL HEALTH MONITORING) KULLANILACAK SENSÖRLERİN
SAYISININ VE LOKASYONUNUN OPTİMİZE EDİLMESİ**

Nurullah TOPKARAOĞLU

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Müslüm KILINÇ

ÖZET

Günümüzde inşa edilen yapılar trafik yükü, deprem, rüzgar ve yapıda oluşabilecek olan hasarlar neticesinde çeşitli iç ve dış kuvvetlerin etkisine maruz kalmaktadır. Yapılar inşa edilme aşamasında çeşitli statik analizler yapılmakta ve bu sonuçlara göre dizayn edilerek inşa edilmektedirler. Ancak yapı inşa edildikten sonra çeşitli kuvvetlerin etkisi altında iken dizayn edildiği şekle uygun davranıp davranmadığının incelenmesi ve yapılan tespitlere göre mühendislik müdahalelerinin yapılması önem arz etmektedir. İnşa edilen yapıların yapısal durumunun izlenmesi, hasar varsa tespitinin yapılması ve gerekli müdahalelerin araştırılması gibi konuları kapsayan disipline Yapısal Sağlık Takibi (Structural Health Monitoring – SHM) adı verilmektedir. Yapısal Sağlık Takibi için köprü, stadyum veya konferans çatıları, sanayi yapıları, betonarme binalar ve tarihi binalar çeşitli sensörler (ivmeölçerler, gerilimölçer vb.) yardımıyla periyodik olarak incelenmekte ve elde edilen verilere göre modal parametrelere ulaşılabilir. Bu parametrelerin doğru olarak hesaplanması yapılara yerleştirilecek olan sensörlerin sayısına ve konumlarına bağlıdır. Eksik yerleştirilen veya doğru noktaya yerleştirilmeyen sensörler olması durumunda bazı frekans ve modlar elde edilemeyebilir ve yapı dinamik modeli doğru oluşturulamayabilir. Farklı tipteki yapılar için en uygun dinamik analizin yapılmasında kullanılacak verileri elde etmek için sensörlerin yerleşimini tayin edecek olan algoritmanın belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu yöntem kullanılarak yapıya yerleştirilecek sensörler yardımıyla yapılacak analizler neticesinde binaların hasar durumu, statik açıdan hangi seviyede olduğu tespit edilebilecek ve yapıya yapılması gerekli müdahalelere karar verilmesine yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Metodu, Yapı Dinamiği, Yapısal Sağlık Takibi

**OPTIMIZING THE QUANTITY AND LOCATION OF SENSORS WHICH
WILL BE USED IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF DIFFERENT
TYPE OF STRUCTURES**

Nurullah TOPKARAOĞLU

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, December 2017

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Müslüm KILINÇ

ABSTRACT

In today's world buildings are exposed to various internal and external forces due to traffic loads, earthquakes, winds and damages in the structure. During the construction phase, various static analyses are made and buildings are designed and built according to these results. After a structure has been constructed and while it is exposed to various loads, it is important to make investigations whether the structure behaves like the way it was designed and moreover to carry out engineering interventions according to the results. Structural Health Monitoring (SHM) is a discipline that covers topics such as monitoring the structural state of constructed structures, detecting damage if any, and investigating the necessary interventions. In SHM bridges, stadium or conference roofs, industrial buildings, reinforced concrete buildings and historical buildings are observed periodically by sensors (accelerometers, strain gauges etc.) and modal parameters are obtained. Accurate calculation of these parameters depends on the quantity and location of the sensors to be installed. In case of missing sensors or sensors that are not located at the correct point, some frequencies and modes may not be obtained and correct dynamic model of the structure can not be formed. To make precise dynamic analysis for different types of structures the location of the sensors will be obtained by an algorithm. By this method correct sensor locations are obtained and after analyses performed one can be able to determine the static condition or damage status of the buildings and it will help to decide any engineering interventions.

Keywords: Finite Element Method, Structural Dynamics, Structural Health Monitoring

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Yapısal Sağlık Takibi Tanıtım.....	4
1.2. Yapısal Sağlık Takibinde Kullanılan Sensörler	6
1.3. MEMS ve Piezoelektrik.....	7
1.4. Modal Analiz	9
1.5. Model Güncelleme.....	10

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Sonlu Elemanlar Metodu ile Sayısal Modelleme.....	11
2.2. Sistem Rijitlik Matrisinin Oluşturulması.....	13
2.3. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrislerinin Oluşturulması.....	15
2.4. Modal Tanımlama	17

2.5.	Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD).....	21
2.6.	Stokastik Alt Uzay Tanımlaması	23
2.7.	Optimum Sensör Yerleşimi.....	24

3. BÖLÜM

ANALİTİK VE DENEYSEL BULGULAR

3.1.	Modal Parametrelerin Deneysel Olarak Elde Edilmesi.....	27
3.2.	Modal Güvence Kriteri (MAC (Modal Assurance Criterion)).....	31
3.3.	MAC Değeri Kullanılarak Farklı Serbestliklerin Karşılaştırılması.....	32
3.4.	Optimum Sensör Yerleşimi için Amaç Fonksiyonu Oluşturulması	34
3.5.	Örnek Uygulama 1 - (25 katlı bina, h_1 : $h_{25}=3m$):	37
3.6.	Örnek Uygulama 2 - (25 katlı bina, $h_1=4m$, h_2 : $h_{25}=3m$):	43
3.7.	25 Katlı Yapıda Birinci Katın Farklı Yükseklikte Olduğu Durumda Sensör Konumları ve Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması	49
3.8.	İki Farklı Rijitlik Değeri İle Elde Edilen Frekans Değerleri	50
3.9.	Örnek Uygulama 3 - (30 Açıklıklı Kiriş (Açıklıklar 100 cm)):	51
3.10.	Örnek Uygulama 4 – İki Boyutlu Kafes Sistemi:.....	57

4. BÖLÜM:

TARTIŞMA VE SONUÇ.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	68

KISALTMALAR VE SİMGELER

SEM: Sonlu Elemanlar Metodu

FEM: Finite Element Method

MEMS: Mikro Elektro-Mekanik Sistem

NEtT: Natural Excitation Technique (Doğal Uyarım Tekniğı)

HFD: Hızlı Fourier Dönüşümü

ERA: Öz Değer Doğrulama Algoritması (Eigensystem Realization Algorithm)

MAC: Modal Assurance Criterion (Modal Güvence Kriteri)

K: Rijitlik Matrisi

M: Kütle Matrisi

C: Sönüm Matrisi

ω_i : Doğal Frekans

Φ : Mod Şekillerini Oluşturan Matris

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan malzemenin özellikleri.....	28
Tablo 3.2. Deney sonucunda elde edilen ilk 6 doğal frekans için mod şekilleri	30
Tablo 3.3. 25 katlı yapı için 20 ve 25 serbestlik dereceli durumlarda doğal frekansların karşılaştırması	33
Tablo 3.4. 25 katlı yapı için 20 ve 25 serbestlik derecesine gelen MAC değerleri tablosu	34
Tablo 3.5. Yapısal sistemi tanımlarken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri	37
Tablo 3.6. 25 katlı bina için kütle, rijitlik, kat yükseklik değerleri.....	38
Tablo 3.7. 25 katlı bina için oluşan mod numaraları, doğal frekans ve periyot değerleri	39
Tablo 3.8. 25 katlı örnek yapıya 12 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	41
Tablo 3.9. 25 katlı örnek yapıya 11 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	41
Tablo 3.10. 25 katlı örnek yapıya 10 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	42
Tablo 3.11. 25 katlı örnek yapıya 9 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	42
Tablo 3.12. 25 katlı örnek yapıya 8 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	42
Tablo 3.13. 25 katlı örnek yapıya 7 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	42
Tablo 3.14. 25 katlı örnek yapıya 6 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	42
Tablo 3.15. 25 katlı örnek yapıya 5 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	42
Tablo 3.16. 25 katlı örnek yapıya 4 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	43
Tablo 3.17. 25 katlı örnek yapıya 3 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	43
Tablo 3.18. 25 katlı bina için kütle, rijitlik, kat yükseklik değerleri.....	44

Tablo 3.19. Sistemde kullanılan kesitin özellikleri.....	45
Tablo 3.20. 25 katlı bina için birinci kat yüksekliği 4 metre ve birinci kat kütlesi 65000kg olduğunda oluşan mod numaraları, doğal frekans ve periyot değerleri.....	45
Tablo 3.21. 25 katlı örnek yapıya 12 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	47
Tablo 3.22. 25 katlı örnek yapıya 11 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	47
Tablo 3.23. 25 katlı örnek yapıya 10 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.24. 25 katlı örnek yapıya 9 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.25. 25 katlı örnek yapıya 8 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.26. 25 katlı örnek yapıya 7 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.27. 25 katlı örnek yapıya 6 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.28. 25 katlı örnek yapıya 5 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.29. 25 katlı örnek yapıya 4 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	48
Tablo 3.30: 25 katlı örnek yapıya 3 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları.....	49
Tablo 3.31. 25 katlı bina için oluşan mod numaraları, doğal frekans ve periyot değerleri	49
Tablo 3.32. 25 katlı yapıda farklı rijitlik değerleri ile 25 moda karşılık gelen yapı doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	51
Tablo 3.33. Yapısal sistemi tanımlarken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri	52
Tablo 3.34. 30 açıklıklı kiriş için kütle ve rijitlik yükseklik değerleri.....	52
Tablo 3.35. 30 açıklıklı kiriş için oluşan 30 adet doğal frekans ve karşılık gelen periyot değerleri	53

Tablo 3.36. 30 açıklıklı örnek giriş için 12 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.37. 30 açıklıklı örnek giriş için 11 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.38. 30 açıklıklı örnek giriş için 10 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.39. 30 açıklıklı örnek giriş için 9 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.40. 30 açıklıklı örnek giriş için 8 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.41. 30 açıklıklı örnek giriş için 7 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.42. 30 açıklıklı örnek giriş için 6 adet sensörün dağılımı.....	56
Tablo 3.43. 30 açıklıklı örnek giriş için 5 adet sensörün dağılımı.....	57
Tablo 3.44. 30 açıklıklı örnek giriş için 4 adet sensörün dağılımı.....	57
Tablo 3.45. 30 açıklıklı örnek giriş için 3 adet sensörün dağılımı.....	57
Tablo 3.46. Yapısal sistemi tanımlarken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri	57
Tablo 3.49. 2 Boyut Kafes Sistemde 10 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.50. 2 Boyut Kafes Sistemde 9 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.51. 2 Boyut Kafes Sistemde 8 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.52. 2 Boyut Kafes Sistemde 7 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.53. 2 Boyut Kafes Sistemde 6 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.54. 2 Boyut Kafes Sistemde 5 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.55. 2 Boyut Kafes Sistemde 4 adet sensörün dağılımı	60
Tablo 3.56. 2 Boyut Kafes Sistemde 3 adet sensörün dağılımı	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yapısal Sağlık Takibinin Amaçları.....	4
Şekil 1.2. Örnek bir Yapısal Sağlık Takibi Çalışma Sistemi	5
Şekil 1.3. Akıllı sensörlerle bir Yapısal Sağlık İzleme Sistemi	7
Şekil 1.4. Akıllı Sensörlerin Çalışma Şeması	7
Şekil 1.5. MEMS Tipi İvmeölçer Çalışma Prensibi	8
Şekil 1.6. Piezoelektrik Sistem Çalışma Şeması	8
Şekil 2.1. Kuvvet ve Yerdeğiştirme.....	13
Şekil 2.2. Kuvvet, yer değiştirme, rijitlik örnekleri.....	14
Şekil 2.3. Yatay rijitlik k'nın kolon kiriş rijitlik oranına (p) göre değişimi	15
Şekil 2.4. a) 2 katlı kesme çerçevesi, b) elemanlara etkiyen kuvvetler	15
Şekil 2.5. Zamana bağlı bir sinyalin sinüs fonksiyon bileşenlerine ayrılması.....	21
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan sensörlerden bir görünüm.....	27
Şekil 3.2. Yapısal Sağlık İzleme için oluşturulmuş örnek deney düzeneği.....	28
Şekil 3.3. Yapılan deneyden alınmış örnek sensör yerleşim planı.....	29
Şekil 3.4. Yapısal Sağlık İzleme deney sonucuna göre oluşan ivme - zaman grafığı.....	29
Şekil 3.5. Deney sonucunda elde edilen ilk 6 doğal frekans için mod şekilleri.....	31
Şekil 3.6. 25 Katlı Yapı için MAC Değerleri 20 ve 25 serbestlik durumunda karşılaştırılması.....	33
Şekil 3.7. Bir kiriş eleman için oluşan ilk 3 mod şekli	36
Şekil 3.8. İlk 3 mod şekline karşılık gelen olası minimum 3 sensörün konumları	37
Şekil 3.9. 25 Katlı örnek bir bina ve indirgenmiş sonlu elemanlar metodu.....	39
Şekil 3.10. Sonlu Elemanlar Metodu ile 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 9 mod şekli	41
Şekil 3.11. Sonlu Elemanlar Metodu ile 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 9 mod şekli	41
Şekil 3.12. Birinci kat yüksekliği 4 metre olan 25 Katlı örnek bir binanın ve indirgenmiş sonlu elemanlar metodu.....	43
Şekil 3.13. Sonlu Elemanlar Metodu ile birinci katı 4 metre olan 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 9 mod şekli.....	46

Şekil 3.14. Sonlu Elemanlar Metodu ile birinci katı 4 metre olan 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 3 mod şekli.....	46
Şekil 3.15. 30 açıklığa sahip kirişin indirgenmiş modeli.....	52
Şekil 3.16. 30 Açıklıklı Kiriş için elde edilen birinci mod şekli.....	54
Şekil 3.17. 30 Açıklıklı Kiriş için elde edilen ikinci mod şekli	55
Şekil 3.18. 30 Açıklıklı Kiriş için elde edilen üçüncü mod şekli.....	55
Şekil 3.19. 2 boyutlu kafes sistem elemanları ve düğüm numaraları.....	57
Şekil 3.20. 2 boyutlu ve 35 elemanlı kafes sistem	58
Şekil 3.21. 2 Boyutlu Kafes için ilk mod şekli.....	59
Şekil 3.22. 2 Boyutlu Kafes için ikinci mod şekli.....	59
Şekil 3.23. 2 Boyutlu Kafes için üçüncü mod şekli	59

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve mühendislik bilimi ile birlikte inşaat yapılarında da çarpıcı ilerlemeler kaydedilmiştir. Günümüzde geçmişe kıyasla sürekli artan bir şekilde inşaat yapıları inşa edilmektedir. Bu yapılar uzun servis hayatları süresince çok çeşitli ortam titreşimlerine maruz kalarak yıpranmaktadırlar. Sıcaklık, kuvvetli rüzgarlar, şiddetli yağmurlar, güçlü yer sarsıntıları veya patlama gibi aşırı yükler nedeniyle oluşan titreşimler yapıları etkilemektedir. Bu titreşimlerin varyasyonları ve bileşkeleri de sorunu daha karmaşık bir hale getirmektedir.

Örneğin, asma köprülerin inşasında yaşanan gelişmelerin de çok ileri seviyelere ulaştığının bir göstergesi olan Akashi Kaikyō Köprüsü'nü inceleyelim. Japonya'da yer alan ve Kobe şehri ile Awaji adasını birbirine bağlayan Akashi Kaikyō Köprüsü'nün ayaklarının arası 1991 metre uzunluğu ile dünyanın en uzun köprülerindendir. Devasa ölçekte bir açıklığa sahip, okyanus üzerinde yer alan ve sürekli olarak güçlü rüzgarların etkisinde kalan böyle bir yapıda mühendislik biliminin sadece inşa ve tasarım aşamasında yer alması elbette düşünülemez. Yapı faaliyete geçtikten sonrada üzerindeki trafik yükü ve diğer dış etkenler altında sürekli şekilde hassas bir gözlem altında bulundurulması gerekmektedir. Bahsi geçen gözlem yöntemine ise Yapısal Sağlık Takibi (Structural Health Monitoring) adı verilmekte ve yapıların kullanımı aşamasında da yapıların düzenli olarak sensörler aracılığıyla elde edilen verilerinin takip edilmesi, gerekli durumlarda da önlemlerin alınması ve yapısal hasarların tespit edilmesi konularını kapsayan geniş bir mühendislik disiplini. Akashi Kaikyō Köprüsü'nde ileri düzey bir Yapısal Sağlık İzleme sistemi bulunmaktadır ki yapı üzerinde yer alan gözleme dayalı bakım sistemi sayesinde bakım mühendislerinin köprünün durumunu gerçek zamanlı olarak izlemelerine olanak sağlamaktadır. Köprünün çeşitli yerlerine monte edilmiş olan sensörler sayesinde ivme, sıcaklık, rüzgar ve gerilme değerleri elde edilebilmektedir. Öyle ki tasarımında 1990 metre uzunluğa sahip olan köprü 17 Ocak 1995'te meydana gelen 7,3 büyüklüğündeki Kobe depremi sonrasında ayakları

arasındaki açıklık 1 metre daha arttığı için 1991 metre olarak inşa edilmiştir. Ayrıca Japonya’da 17-22 Eylül 1998’de meydana gelen tayfun sırasında rüzgar şiddeti saatte 140 km hıza kadar erişmiştir. Dolayısı ile Akashi Kaikyō Köprüsü’nün 1991 metrelik ana açıklığı ve son derece esnek yapısıyla sahip olduğu düşük frekans değerleri yüksek rüzgar dayanımına sahip olmasını zorunlu hale getirmektedir. Köprü inşa edilirken 78m/s hızındaki rüzgarlara dayanıklı olduğu test edilmiştir ki rüzgar hızı Yapısal Sağlık İzleme sistemi tarafından düzenli olarak izlenmekte ve belirlenen eşiğin geçilmesi halinde ise uyarı sistemi devreye girmektedir. (Kekare, Huddedar, & Bagde, May - Jun. 2014)

Yapıların belirli aralıklarla uzman mühendisler tarafından yerinde incelenmesi ve gözlemlenmesinin yeterli olabileceği düşünülebilir. Ancak yapısal hasarların, yorulmaların ve yıpranmaların tespitinde sürekli bir Yapısal Sağlık İzleme sistemi zorunludur. Yapısal Sağlık İzleme kullanılmadığı takdirde ise yapılarda veya köprülerde meydana gelen hasarlar ve yapısal deformasyonlar tespit edilemeyebilir. Örnek vermek gerekirse, Kuzey Amerika’da Minnesota Eyaletinin sınırları içerisindeki Mississippi Nehri üzerinde yer alan I-35W Mississippi Nehir Köprüsü düzenli bir Yapısal Sağlık İzleme sistemine sahip olmadığı için oluşan deformasyonlar zamanında fark edilememiş ve 2007 yılında aniden yıkılarak 13 insanın hayatını kaybetmesine yol açmıştır. Tabiki köprünün yıkılması ile toplumda her gün kullanılan altyapıya olan güven derinden sarsılmıştır. Ancak sonrasında yıkılan köprünün yerine 1 seneden kısa bir zaman içerisinde yenisi yapılmıştır. Yeni köprü yapılırken de dizayn aşamasında 100 sene kullanım ömrüne sahip olacak şekilde güvenilir bir yapı olarak tasarlanmış ve bu güvenilirliğini sürekli Yapısal Sağlık İzleme sistemi kontrolünde kalarak sürdürmesi amaçlanmıştır. Dolayısı ile yeni köprüde Yapısal Sağlık İzleme sistemi çok kapsamlı bir şekilde oluşturulmuş ve toplamda 500 adet gerilimölçer, ivmeölçer, beton bozulmasını ölçen sensör, nem sensörü gibi cihazlar da sistemin içerisinde kullanılarak yapının performansı ve yıpranması sürekli olarak kontrol altına alınmıştır. (Inaudi, ve diğerleri, 2009)

Yapı Sağlığı Takibinden (Structural Health Monitoring – SHM) bahsedilecek olursa bu alanda birçok akademik çalışma mevcuttur. Caicedo 2011 yılında yaptığı çalışmada Yapı Sağlığı Takibi (Structural Health Monitoring – SHM) üzerine genel bir yol haritası çizmeye çalışarak önemli hususların tespitine gayret sarf etmiştir. (Caicedo, 2011)

Yapısal Sağlık Takibi genellikle aşağıda sıralanacak olan maddeleri yerine getirmek amaçlı yapılmaktadır. İlk olarak, tasarım aşamasındaki kabullerin, varsayımların ve parametrelerin düzeltilmesine yardımcı olur ki bunun sayesinde gelecekte tasarlanacak olan benzer yapıların tasarım özellikleri ve kriterlerinin doğru olarak tespit edilmesi sağlanır. İkinci olarak, yapının operasyonel olarak veya dış etkenler nedeniyle maruz kaldığı yükler esnasındaki davranışı ve tepkisindeki anormalliklerin gözlemlenerek yapıdaki olası yorulma veya hasarların bulunarak yapısal ve operasyonel güvenliğin erken teşhis yapılarak sağlanmasıdır. Üçüncü olarak, Yapısal Sağlık İzleme sistemi tarafından sağlanan gerçek zamanlı bilgiler vasıtası ile afet veya benzeri bir etmen sonrasında yapıdaki güvenliğin ivedi olarak elde edilmesidir. Dördüncü olarak yapının denetlenmesi, rehabilitasyonu, bakımı ve onarımının planlanması ve önceliklendirilmesi amaçlı veri toplamasıdır. Beşinci olarak, yapılmakta olan onarım ve yenileme çalışmaları esnasında bakım ve onarım faaliyetlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi amaçlı kullanılmaktadır. Son olarak sahada gerçek zamanlı, kapsamlı ve yoğun bir verinin toplanması ile mühendislik biliminin de ilerlemesine katkı sağlamaktadır.

Yapısal Sağlık Takip sistemlerini oluşturan bileşenler sensörler, sensörlerden gelen verilerin elde edildiği, transfer edildiği ve depolandığı veri toplama sistemleri ile verinin doğrulandığı ve analiz edildiği sistemlerdir. Sensör maliyetleri, sensörlerin iletişimini sağlayacak sistemlerin ve veri toplama merkezlerinin maliyetleri ve elde edilecek verilerin işlenmesini sağlayacak bilişim altyapısı maliyetleri ile veri işlemede geçen süreler dikkate alındığında sensörlerin fazla sayılarda kullanılması mümkün olmayabilmektedir. Böylesi bir durumda bütün olasılıklar dikkate alınarak oluşturulan minimum sayıda sensör konumlandırılması ve elde edilecek verilerin de yapının davranışının tespiti açısından yeterli olması gibi bir mühendislik problemi ortaya çıkmaktadır (Yi & Hong-Nan, 2012). Dolayısıyla, Yapısal Sağlık Takibinin verimli olarak yapılabilmesi için ve elde edilen verilerin mühendislik bilimine katkı sağlaması için elbette yapılarda kullanılan sensörlerin konumları son derece önemlidir ve bu konumların sensör sayıları ile birlikte optimize edilmesi gereklidir. Mühendislik bilimi elbette sorunları çözmekle görevlidir ancak sorunları çözerken ekonomik bir yaklaşımda izlemelidir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Yapısal Sağlık Takibi Tanıtım

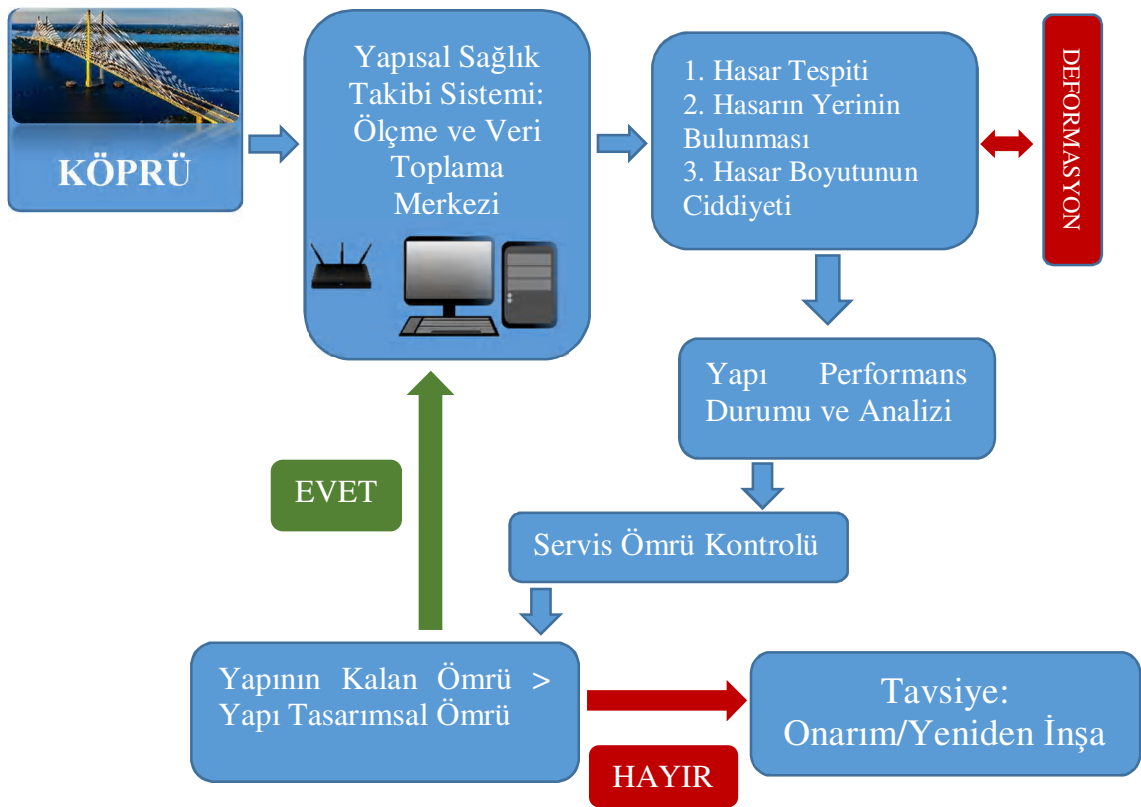
Günümüzde gelişen şehirleşme ile birlikte inşaat yapılarında da kayda değer bir artış yaşanmaktadır. Son zamanlarda ise mühendislik yapılarının dinamik davranış karakteristiğinin belirlenmesi, hasar tespitinin yapılması ve servis ömrünün belirlenebilmesi süreçlerinde Yapısal Sağlık Takibi yöntemleri değerli bir kaynak oluşturmaya başlamıştır. Yapılarda oluşan hasar denildiğinde ise yapının malzeme özelliklerinde yaşanan değişim veya yapının geometrik özelliklerinin değişimi olarak dikkate alınabilir.



Şekil 1.1. Yapısal Sağlık Takibinin Amaçları

Yapısal Sağlık Takibi ise yapıların çeşitli sensörler vasıtasıyla dinamik verilerinin düzenli olarak izlenmesi, elde edilen ölçümler kullanılarak hasar durumu hakkında çıkarımlarda bulunulması ve verilerin analizinin yapılarak yapının güncel durumunun belirlenmesi gibi adımları içermektedir.

Uzun zamanlı Yapısal Sağlık Takibi çalışmalarında yapının maruz kaldığı çeşitli yüklerin (rüzgar, yağmur, trafik yükü, sıcaklık vb.) etkisi sonucunda kaçınılmaz eskimesi ve aşınmasına bağlı olarak yapının mühendislik tasarımına uygun davranıp davranmadığının tespitinin yapılması amaçlanmaktadır. Ayrıca yapıların maruz kalabileceği deprem, fırtına, patlama yükü vb. hadiseler sonrasında yapıların Yapısal Sağlık Takibi yöntemleri ile hızlı bir şekilde yapısal bütünlüğünün ve durumunun tespitinin gerçek zamanlı olarak yapılması da sağlanabilmektedir.



Şekil 1.2. Örnek bir Yapısal Sağlık Takibi Çalışma Sistemi

Bilişim ve sensör teknolojilerinde yaşanan gelişmeler sonucunda daha kesin ve yüksek miktarda verilerin ölçülmesine ve toplanmasına olanak sağlanmış ayrıca bu toplanan yüksek miktarda verilerin işleme süreçleri de hızlanmıştır. Yapısal sağlık takibi yöntemleri kullanılarak yapılan araştırmalarda yapısal hataların tespiti, yapının geriye kalan servis ömrü, yapının dinamik özelliklerinin tespit edilmesi, teorik ve gerçek

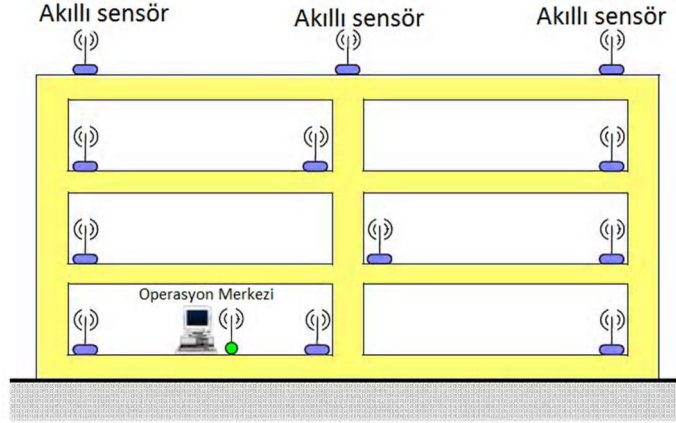
dinamik özelliklerin karşılaştırılması konuları araştırmacıların çalıştıkları belli başlı konulardır. Yapıdaki herhangi bir hasarın yerinin, büyüklüğünün ve ciddiyetinin belirlenmesi ile bu hasarın yapının servis ömrüne etkisinin de çeşitli yöntemler kullanılarak ortaya çıkarılması Yapısal Sağlık Takibinin görevleri arasındadır. Genel anlamda Yapısal Sağlık Takibi üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama ölçme ve veri toplamadır, ikinci aşama veri analizi, üçüncü aşama ise yapıların bakım, onarım ve rehabilitasyon kısmıdır. Uzay ve havacılık, makine mühendisliği gibi branşlarda da yoğun olarak kullanılan Yapısal Sağlık Takibi araçları inşaat mühendisliği alanında köprüler, rüzgar tribünleri, nükleer yapılar, tarihi yapılar, gökdelenler, tren yolları gibi farklı tipte ve özellikte yapıyı incelemek için kullanılmaktadır. Yapısal Sağlık Takibinin ana amaçlarından birisi ise yapılarda oluşan herhangi bir hasar veya yapısal deformasyonun anlık olarak tespit edilebilmesini sağlamasıdır. Bir araç bozulduğunda üzerindeki sensörler vasıtası ile sorunun nerede oluştuğunu bize haber verebiliyorsa ekonomik olarak çok daha değerli olan bir inşaat yapısı da Yapısal Sağlık Takibi sistemi vasıtası ile uyarı verebilir.

Yapısal Sağlık Takibi ölçümleri sonucunda elde edilen verilerden doğal frekanstaki değişimler ile yapısal durum hakkında ipuçları elde edilebilir. Doğal frekanstaki değişimler ölçülerek yapısal hasar ortaya konabilmektedir (Gardner-Morse & Huston, 1993). Örneğin, doğal frekans ölçümleri ile kablolu asma köprüde yer alan kablo desteklerindeki gerilim tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte frekans ölçümlerinin hasar tespitindeki hassasiyeti zayıftır. Çatlakların global modlarda çok düşük bir etkisi vardır ama her elemanın lokal yüksek frekanslı bükülme modları çatlak hakkında daha iyi bir veri sağlamaktadır (Begg, Mackenzie, Dodds, & Loland, 1976).

1.2. Yapısal Sağlık Takibinde Kullanılan Sensörler

Yapısal Sağlık Takibi ile ilgili yapılan araştırmalar genellikle titreşim tabanlı analize dayanmaktadır. Titreşim verileri ile yapıların dinamik analizini yapabilmek için ise öncelikle ivmeölçerler vasıtası ile elde edilen verilerden faydalanılmaktadır. Yapılarda kullanılan Yapısal Sağlık İzleme araçları gerilimölçer, sıcaklık ölçer, nem ölçer, optik tarayıcılar, piezometre, basınç dönüştürücü, deplasman ölçer, eğim ölçer ve elbette ivmeölçer gibi cihazlardan oluşmaktadır. Sensör teknolojileri son yıllarda hızlı bir

gelişim sergilemektedir. Gömülü mikro işlemci, ölçme kapasitesi, kablosuz haberleşme sağlayan ara yüz, batarya ile çalışabilmesi gibi özellikler bir akıllı sensörün belli başlı özellikleridir.



Şekil 1.3. Akıllı sensörlerle bir Yapısal Sağlık İzleme Sistemi

Akıllı sensörlerin Yapısal Sağlık İzleme maksatlı kullanılabilmesi için senkronizasyon, güvenilir haberleşme ve veri aktarma özelliklerine sahip olması gereklidir. Bu özellikler sadece inşaat mühendisliği uygulamaları için değil diğer bütün mühendislik uygulamaları için de geçerlidir (Simon, Maroti, & Ledeczi, 2004).

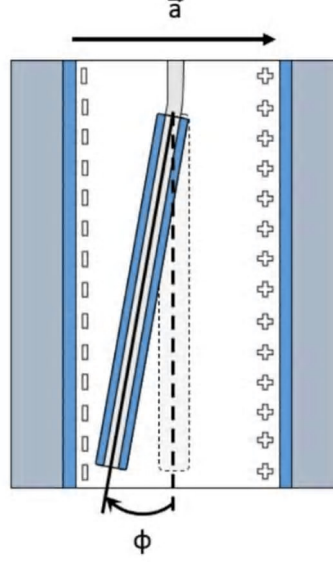


Şekil 1.4. Akıllı Sensörlerin Çalışma Şeması

1.3. MEMS ve Piezoelektrik

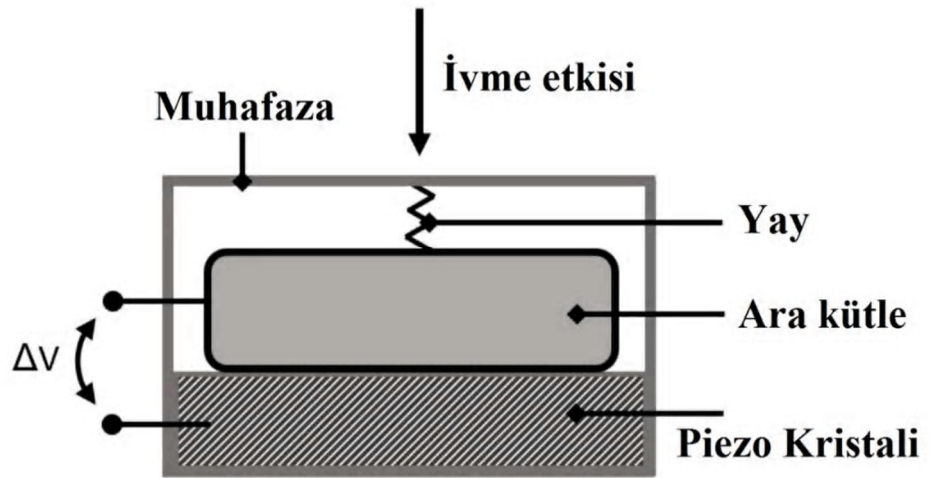
Akıllı bir sensör bir nesnenin veya ortamın, sıcaklık, ışık, ses veya hareket gibi bir fiziksel durumunu elektrik veya diğer çeşit sinyallere dönüştürür. Diğer yandan tek bir akıllı sensörde birkaç farklı özelliği ölçen mekanizmalar bulunabilir. Yapısal Sağlık Takibinde yaygın olarak ölçülen parametre ivme olmaktadır. İvme verilerini toplamak için ise genellikle MEMS (Mikro elektro-Mekanik Sistem) veya Piezoelektrik sensörler kullanılmaktadır. MEMS tabanlı cihazlar, mikrofabrikasyon teknolojisine sahip

olmaları, küçük boyutları, ucuz maliyetleri ve düşük güç tüketimleri nedeniyle genellikle sensörlerde kullanılırlar.



Şekil 1.5. MEMS Tipi İvmeölçer Çalışma Prensibi

MEMS sensörleri elektrik yükünde meydana gelen değişimin algılanması prensibine göre çalışırlar. Uygulanan ivmeye bağlı olarak, asılı durmakta olan bir kütle pozitif veya negatif bir elektrota doğru bükülür. Dolayısıyla da elektrodların yüzeyleri boyunca oluşan elektrik yükü yer değiştirmeleri tetikler ve bir voltaj farkı oluşturur. Bu voltaj farkı verisi ile de ivme verisi tespit edilebilmektedir.



Şekil 1.6. Piezoelektrik Sistem Çalışma Şeması

Bu alanda kullanılan ilk sensörlere bakıldığında piezoelektrik sensörler olduğu görülür. Piezoelektrik sensörün yapısına bakıldığında bünyesinde yer alan bir kristalin titreşimine dayalı olduğu görülebilir. İvme değişikliği voltaj farkına (piezo elektriksel etki) veya dirençteki bir değişime (Piezo dirençli etki) neden olur. Bu değişiklik sonucunda da ivme verisine ulaşılabilir. Piezo sensörleri, çok geniş bir bant genişliğinde çalışabilmektedir ve çok yüksek sıcaklıklara da dayanabilirler.

Piezo sensörleri ile karşılaştırıldığında, MEMS sensörleri yüksek çözünürlük, hassasiyette mükemmel kararlılık, düşük termal sürüklenme ve uzun dönemde istikrarlı bir sensör yapısı gibi avantajlar sunmaktadır.

1.4. Modal Analiz

Modal analiz, inşaat mühendisliği açısından bakıldığında bir yapıyı frekans, sönüm ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerini kullanarak tanımladığımız bir süreçtir diyebiliriz. Mühendislik yapıları incelendiğinde sürekli olarak çeşitli titreşimlere maruz kaldıkları gözlemlenebilir. Bu titreşimler akustik açıdan kulaklarımızı rahatsız eden titreşimler olabileceği gibi yapılara zarar verebilecek hatta yıkabilecek nitelikte titreşimlerde olabilmektedir. Son yıllarda yapıların dinamik davranışı konusunda örneğin doğal frekansları, sönüm oranları mod şekilleri gibi alanlarda yapılan çalışmalar ivme kazanmıştır. Dolayısıyla bir yapıyı doğal karakteristiğini oluşturan bu dinamik özellikler açısından tanımlamaya ve bu alanda yapılan çalışmalara modal analiz denilmektedir. (David, 2000) Modal analiz iki varsayıma dayanmaktadır ki bunlardan birincisi yapının lineer oluşudur diğeri ise yapının zamandan bağımsızlığıdır. Modal parametreler sayesinde yapıların tadilatı (Maia & Silva, 1997), yapısal bütünlüğün doğrulanması ve güvenilirliği (Melchers, 1999), yapısal sağlık takibi (Doebeling, Farrar, & Prime, 1999) ve modal güncelleme (Friswell & Mottershead, 1995) yapılabilmektedir. Modal parametreleri hesap edebilmek için iki farklı yöntem mevcuttur. Birinci metot olan teorik yöntemde yapıyı tarif eden rijitlik matrisi K, kütle matrisi M ve sönüm matrisi C'nin bilinmesi gerekmektedir. Örnek olarak sönümsüz durum için doğal frekanslar ω_i ve mod şekilleri x_i olursa;

$$(K - \omega_i^2 M)x_{(i)} = 0 \quad (1)$$

Eğer ω_i^2 sistemin bir kökü ise:

$$\det (K - \omega_i^2 M) = 0 \quad (2)$$

Bu denklemin çözümü neticesinde serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal frekans bulunur. Bulunan her doğal frekansa karşılık olarakta yapının almış olduğu şekle mod şekli adı verilmektedir.

1.5. Model Güncelleme

Deneysel model ile sayısal olarak oluşturulmuş model arasındaki farkı azaltmak amaçlı kullanılan bir yöntemdir. Zira yapıların tasarımı esnasında oluşturulan model eğer yapıyı tam olarak karşılamıyorsa yapılan dinamik ve statik analizlerin yanlış olduğu söylenebilir. Dolayısıyla eğer yapının sayısal ortamda da deprem, rüzgar, kar, operasyonel yük ve benzeri etkiler altında nasıl davrandığı doğru olarak analiz edilmek isteniliyorsa sayısal modelin güncellenmesi ve gerçek yapının davranışını taklit ederek analize tabi tutulması gereklidir.

Elbette model güncellemenin de birçok zorluğu bulunmaktadır. Sonuçta model güncelleme ile yapılmak istenilen yapıdan elde edilen veriler yardımıyla sayısal modelin güncellemesi olduğu için bu aşamada yapının doğru olarak analiz edilmesi gereklidir. Yapının doğru bir şekilde temsil edilebilmesi içinde doğru sayıda sensörün doğru noktalara yerleştirilmesi gereklidir. Eğer kısıtlı sayıda sensör ile çalışılıyorsa yapının karakteristiği veriler vasıtasıyla tam olarak elde edilemeyebilir. Sonraki aşamada ise yapıdan elde edilen yoğun bir veri yığınının işlenerek doğru bir şekilde analiz edilmesi gereklidir ki bu aşamada bilgisayar işlemcileri aşırı miktarda hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır.

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Sonlu Elemanlar Metodu ile Sayısal Modelleme

Mekanik sistemlerin mühendislik analizi, denge, enerji korunumu, kütlenin korunumu, termodinamiğin yasaları ve Newton'un hareket kanunları gibi temel fiziksel ilkeler aracılığıyla değişkenleri içeren diferansiyel denklemlerin türetilmesi ile ele alınmaktadır. Bununla birlikte, formüle edildikten sonra, elde edilen matematiksel modelleri çözmek, özellikle de sonuçta ortaya çıkan modeller doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler içerdiğinden dolayı imkânsızdır.

Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method - FEM), yapısal bir bütünü parçalara ayırma tekniğidir. FEM'in fiziksel olarak oluşturulmasındaki temel mantık, matematiksel modelin birbiriyle örtüşmeyen (üst üste gelmeyen) bileşenlerine ayrılmasıdır ki buna da sonlu elemanlar adı verilmektedir. Burada her elemanın tepkisi sonlu sayıda serbestlik derecesi ile ifade edilmekte ve bu da bir dizi düğüm noktasındaki bilinmeyen fonksiyonların bir değerini içermektedir.

Matematiksel modelin tepkisi, daha sonra, ayrıık modelde yer alan tüm elemanların bir araya getirilmesi ya da birleştirilmesi ile elde edilen elemanlar bütünü tepkisiyle aynı kabul edilir. Aslında bu yöntemde sistemlerin parçalara ayrılması ve birleştirilmesi zaten birçok sistemin doğal oluşumunda mevcuttur. Örneğin, daha basit bileşenlerden inşa edilmiş olan bir köprüyü, binayı, uçağı, gemiyi veya makineyi görselleştirmek kolaydır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, betonarme, çelik veya kompozit malzemeden inşa edilmiş yapıların doğrusal olmayan davranışını içeren karmaşık problemler

çözölebilmektedir. Mühendislik yapıları yapısal ömürleri boyunca statik veya dinamik yüklemelere maruz kalırlar. Bu tür yüklerle yapıların gösterdikleri tepkiyi ölçmek mühendislerin farklı yük kombinasyonları altında yapının davranışını tespit edebilmeleri açısından son derece önemlidir. Yapısal parametrelerin sonsuz sayıdaki permütasyonuna ve deneysel testlerin maliyetine bağılı olarak, yapısal tepki tahmininde sayısal bir araç kullanılması gerekmektedir ki bu amaçla kullanılmakta olan farklı birçok bilgisayar yazılımı mevcuttur.

FEM bir sistemi parçalara ayırıştırma yöntemi olduğu için, bir FEM modelinin serbestlik derecesi mutlaka sonlu sayıdadır. Bunlar bir sütun vektöründe toplanırlar. Bu vektöre genellikle serbestlik derecesi vektörü veya durum vektörü denir.

FEM'in uygulanması aşamasındaki adımlar incelenecek olursa öncelikle yapı düğüm elemanlarında parçalara bölünür. Sonrasında ise bütün yapı için yaklaşık denklem sistemini oluşturmak amacıyla düğümlerdeki elemanlar birbirine bağlanır. İleriki aşamada ise düğüm elemanlardaki deplasman gibi bilinmeyen değerleri içeren sistemsel denklemler çözölür. Son olarak ise yapısal elemanlarda meydana gelen kuvvet değerleri hesaplanır.

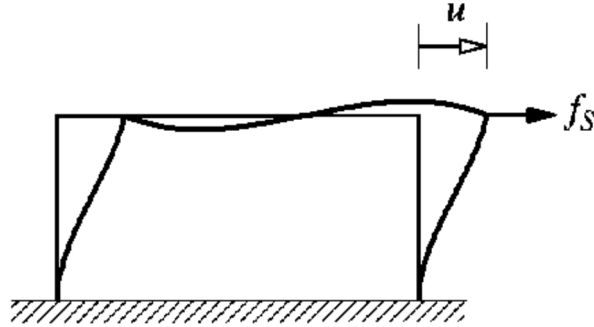
Sonlu elemanlar analizinin, sıcaklıkları, gerilmeleri veya bilinmeyen diğör değerleri elde etme şekli, aslında enerji fonksiyonunun indirgenmesidir. Bir enerji fonksiyonu, belirli sonlu elemanlar modeli ile ilişkili tüm enerjilerden oluşur. Enerji korunumu yasasına dayanarak, sonlu elemanlar enerji fonksiyonu sıfıra eşit olmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi sonlu elemanlar modeli için doğru çözüm denklemi şu şekildedir.

$$\frac{dF}{dp} = 0 \quad (3)$$

Burada F enerji fonksiyonudur ve p hesaplanacak olan bilinmeyen noktanın potansiyelidir ki bu mühendislik çalışmalarında genellikle deplasmanı ifade eder. Bu, sanal iş ilkesine dayanmaktadır ki bir parçacık bir dizi güç sistemi altında dengede iken ve herhangi bir deplasmana maruz kaldığında sanal iş sıfır olarak ortaya çıkar. Her sonlu elemanın kendine has enerji fonksiyonu olmaktadır.

2.2. Sistem Rijitlik Matrisinin Oluşturulması

Sistemlerin rijitlik matrisleri çeşitli yöntemler vasıtası ile elde edilebilmektedir.



Şekil 2.1. Kuvvet ve Yerdeğiştirme

Doğrusal bir sistem için, yanal itme kuvveti ile oluşan deformasyon arasındaki ilişki doğrusaldır şöyleki:

(4)

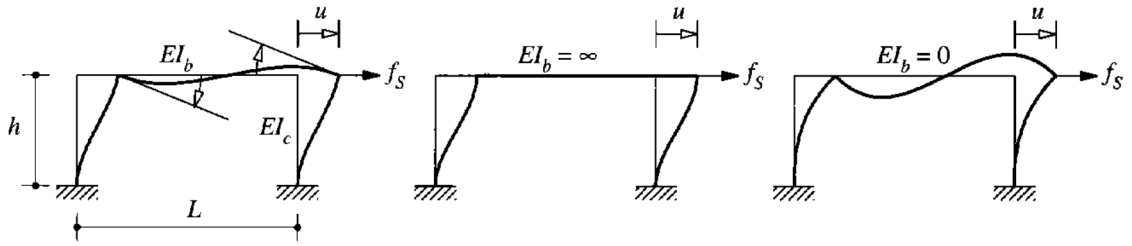
Burada k sistemin yanal rijitliği olup birimi kuvvetin uzunluğa oranıdır. Yukarıdaki denklemde aslında ifade edilmekte olan yapının küçük deformasyonları için belirlenen lineer f_s - u ilişkisinin daha büyük deformasyonlar için de geçerli olduğudur. Direnç kuvveti, u 'nun tek değerli bir fonksiyonudur ve dolayısıyla sistem elastiktir; bununla ilintili olarakta sistem için doğrusal elastik sistem ifadesi kullanılır.

Aşağıda yer alan şekilde açıklık L , yükseklik h , elastisite modülü E ve kesit alanının bükülme eksenindeki ikinci momenti sırasıyla I_b ve I_c olarak tanımlanabilir. Kolonlar alt kısımlarında sabitlenmiştir. Çerçevenin yanal rijitliği, iki aşırı durum için kolayca tespit edilebilir. Eğer kiriş rijit ise sert ise (aşağıdaki şeklin ortasındaki sistemde olduğu gibi):

_____ (5)

Diğer taraftan rijitliği olmayan bir kiriş için (aşağıdaki şeklin sağındaki sistemde olduğu gibi):

_____ (6)



Şekil 2.2. Kuvvet, yer değiştirme, rijitlik örnekleri

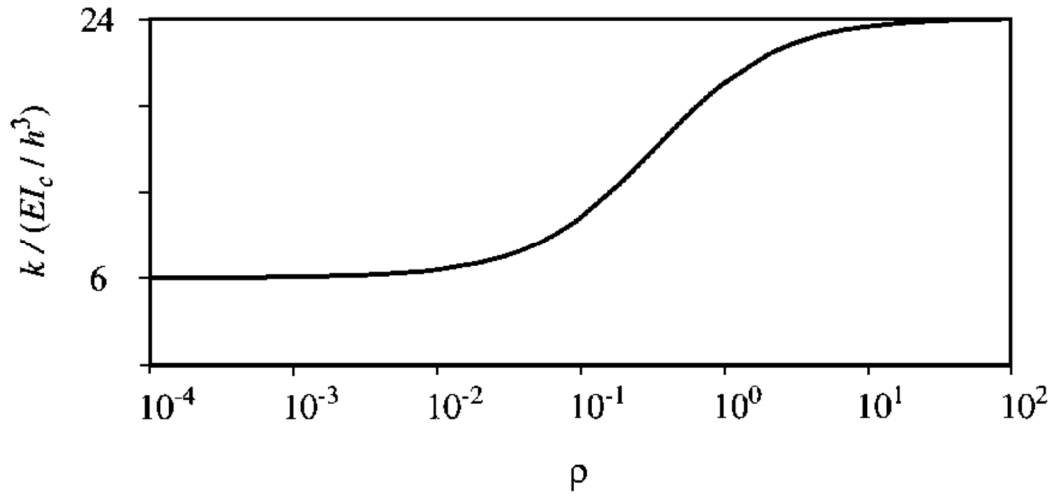
Kiriş rijitliğinin iki aşırı değeri için, çerçevenin yanal rijitliği kiriş uzunluğu L 'den bağımsızdır. Kirişin ortalama ve gerçekçi bir rijitliği kullanılarak çerçevenin yanal rijitliği statik yapısal analiz yönteminin standart prosedürleri ile hesaplanabilir. Çerçevenin rijitlik matrisi, serbestlik derecesi 3'e göre formüle edilir: yanal deplasman u ve iki kiriş-kolon bağlantısının rotasyonları (yukarıdaki şeklin solunda yer alan sistemde olduğu gibi). Sistemi statik olarak yoğunlaştırarak ya da rotasyonel serbestlik derecelerini ortadan kaldırarak kuvvet denklemindeki kuvvet - yer değiştirme ilişkisi elde edilir. Bu işlemi, $L = 2h$ ve $E I_b = E I_c$ olan bir çerçeveye uygularsak, yanal rijitlik aşağıdaki gibi oluşur:

$$\text{---} \text{---} \quad (7)$$

Çerçevenin yatay rijitliği herhangi bir I_b ve I_c değeri için rijitlik katsayıları kullanılarak hesaplanabilir. Eğer elemanlardaki kesme deformasyonları ihmal edilirse, sonuç aşağıdaki gibi oluşur.

$$\text{---} \text{---} \quad (8)$$

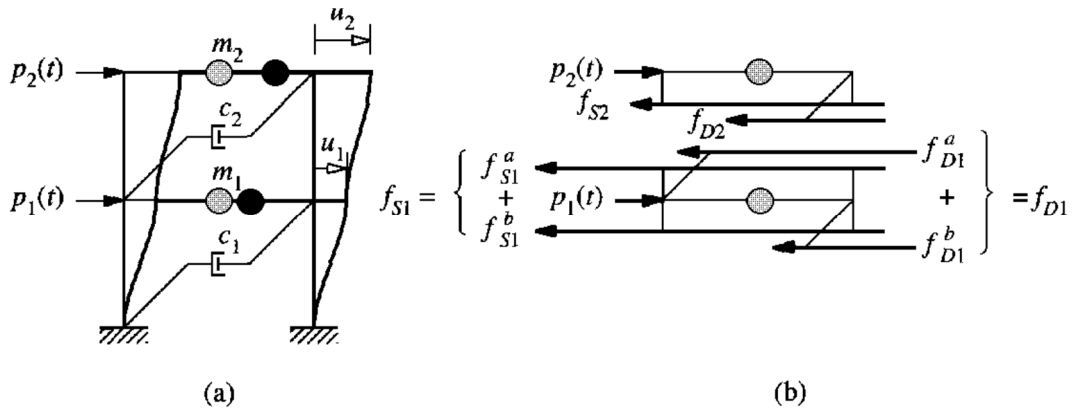
Burada $\frac{I_b}{I_c}$ olup kolon kiriş rijitlik oranı olarak ifade edilir. olduğunda son denklem önceki üç denkleme dönüşür. Yatay rijitlik ve kolon kiriş rijitlik oranı arasındaki değişim ise aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Yatay rijitlik k'nın kolon kiriş rijitlik oranına (ρ) göre değişimi

2.3. Sistem Rijitlik ve Kütle Matrislerinin Oluşturulması

Öncelikle mümkün olan en basit çok serbestlik dereceli aşağıdaki şeklin sol tarafındaki sistem olan iki katlı bir çerçeve için, $p_1(t)$ ve $p_2(t)$ dış kuvvetlerine maruz kalındığındaki durumu incelenecektir. Bu sadeleştirilmiş sistemde kirişler ve döşeme sistemleri sonsuz rijitliğe sahiptir. Burada kirişlerin ve kolonların eksenel deformasyonu ve eksenel kuvvetin kolonların rijitliği üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir. Bu yapı gerçeği tam anlamıyla temsil etmese de, çok serbestlik dereceli bir sistem için hareket denklemlerinin nasıl geliştirildiğini göstermek anlamında kullanışlıdır.



Şekil 2.4. a) 2 katlı kesme çerçevesi, b) elemanlara etkiyen kuvvetler

Daha sonra ise formül, kiriş bükülmesi ve eklem rotasyonlarını ve binalardan başka yapıları da dikkate alan daha gerçekçi ve kapsamlı bir şekle dönüştürülecektir. Kütle aslında binanın her yerine dağılmış durumdadır ancak bu hesaplamada kat seviyelerinde yoğunlaştırılmış olarak dikkate alınacaktır. Bu varsayım genellikle çok katlı binalar için uygundur, çünkü kütlenin çoğunluğu yapının kat seviyelerinde bulunur. Ayrıca tek serbestlik dereceli sistemlerde olduğu gibi lineer bir viskoz sönümleme mekanizmasının bir yapıdaki enerji dağılımını temsil ettiği varsayılacaktır.

Kütlelerin orijinal denge durumuna göre yer değiştirmiş konumlarını tanımlamak için gereken bağımsız yer değiştirmelerin sayısına serbestlik derecesi sayısı denir. Yukarıdaki şekilde yer alan iki katlı çerçevenin her kat seviyesinde kütleler yoğunlaştırılmış olarak yer almakta ve serbestlik derecesi 2 olmaktadır.

Her kat kütlesi m_j 'ye etki eden kuvvetler yukarıdaki şeklin sağ tarafında gösterilmektedir. Bunlar dış kuvvet $p_j(t)$, elastik (veya inelastik) direnç kuvveti f_{sj} ve sönümleme kuvveti f_{dj} 'yi ifade etmektedir. Dış kuvvet, x eksenine paralel olarak pozitif yönde ele alınır. Elastik ve sönümleme kuvvetleri, hareketlere karşı koyan iç kuvvetler oldukları için ters yönde hareket ettikleri gösterilir. Her kütle için Newton'un ikinci hareket kanunu:

$$m_j \ddot{u}_j + f_{Dj} + f_{Sj} = p_j(t) \quad (9)$$

Yukarıdaki eşitlik $j = 1$ ve 2 için iki eşitlik içerir ve bunlar matris formunda yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Bu denklemde kompakt olarak şu şekilde yazılabilir:

$$m\ddot{u} + f_D + f_S = p(t) \quad (11)$$

Aşağıdaki tanımlama dikkate alındığında

$$u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}, m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, f_D = \begin{Bmatrix} f_{D1} \\ f_{D2} \end{Bmatrix}, f_S = \begin{Bmatrix} f_{S1} \\ f_{S2} \end{Bmatrix}, p = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

M matrisi iki katlı çerçevenin kütle matrisidir.

Doğrusal davranış varsayıldığında, elastik direnç kuvvetleri f_s , kat yer değiştirmeleri olan u ile ilişkilidir. Bu amaçla, j 'inci katın yanal rijitliği k_j tanımlanır ki burada; kattaki kesme V_j kattaki deformasyon ya da kayma ile bağlantılıdır. $\Delta_j = u_j - u_{j-1}$

$$V_j = k_j \Delta_j \quad (13)$$

Kat rijitliği katta yer alan tüm kolonların yanal rijitliklerinin toplamıdır. Yüksekliği h , elastisite modülü E ve alanının ikinci derece momenti I_c olan bir kolon için, yanal rijitlik $12E I_c/h^3$ 'tür. Böylece rijitlik:

$$k = \sum_{columns} \frac{12EI_c}{h^3} \quad (14)$$

Son olarak yukarıdaki denklemleri kullandığımızda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (15)$$

Bu matris denklemi, dış dinamik kuvvet $p_1(t)$ ve $p_2(t)$ 'ye maruz kalan iki katlı çerçevede oluşan yer değiştirmeleri yani $u_1(t)$ ve $u_2(t)$ 'yi içeren ikinci dereceden diferansiyel denklemi temsil eder. Her denklem, hem bilinmeyen u_1 hem de u_2 'yi içerir. Dolayısıyla, iki denklem birbirine bağlanır ve bunların mevcut haliyle aynı anda çözülmesi gerekir.

2.4. Modal Tanımlama

Dinamik testler kullanılarak yapıların tanımlanması yani modal tanımlama yapı tasarımının geliştirilmesi, kalite kontrolü ve dinamik sistemlerin değerlendirilmesi gibi ögeler içermektedir. Dinamik testlerde sisteme uygulanan kuvvet etkileşiminin sonucunda oluşan veriler gözlemlenmektedir. Sonuç olarak elde edilen verilerde kullanılarak yapısal tasarım iyileştirilebilmekte ve yapının tasarımındaki varsayımlar kontrol edilebilmektedir. Sistem hakkında bildiğimiz veriler, statik ve dinamik özellikler bir model olarak düşünülebilir. Model hakkında bilinmeyenler transfer fonksiyonları, diferansiyel denklemler ve modal parametreler gibi çeşitli şekillerde tanımlanabilir. (Juang & Pappa, 1986).

Yapısal Sağlık İzleme uygulamalarında bir takım düzenleyici hesaplama yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır. Doğal uyarım tekniği (NExT - Natural Excitation

Technique), öz değer doğrulama algoritması (ERA - Eigensystem Realization Algorithm) kullanılan yöntemlerden bazılarıdır.

NExT Yapısal Sağlık Takibinde kullanılan ve esasen köprü, bina gibi kullanılmakta olan yapıların modal parametrelerinin araştırılması aşamasında titreşimi oluşturan kuvvetlerinin kesin olarak bilinmemesi sebebi ile kullanılan bir yöntemdir. Teorik ve analitik veriler yapılan çalışmalarla karşılaştırılarak NExT yönteminin doğruluğu kanıtlanmıştır (James, Carne, Lauffer, & Nord, 1992). Yöntemi teorik olarak doğrulamak için aslında çoklu girdi ve çoklu çıktıya sahip olan çoklu mod sistemleri rastgele uyarıldığında azalan sinüs eğrilerinin toplamı olan öz ilinti ve çapraz ilinti fonksiyonları oluşturduğunu doğrulamak gerekir. Azalan sinüs eğrileri ise sistemin modları ile aynı sönümlenme oranı ve sönümlenme frekanslarına sahiptir. Bahsi geçen ilinti fonksiyonları ise etki tepki fonksiyonları ile aynı forma sahip olmaktadır. 4 ana aşamadan oluşan NExT yönteminde ilk aşamada sisteme verilen girdi kuvveti bilinmemesine rağmen değişen bir frekansa sahip geniş bantta bir rastgele uyarım varsayımı ile başlanır ve yapıdan elde edilen veriler toplanır. İkinci aşamada öz ilinti ve çapraz ilinti fonksiyonları hesap edilir. Üçüncü aşamada ise zaman bazlı bir modal tanımlama kullanılarak ve ilinti fonksiyonlarını serbest titreşim tepkileri gibi dikkate alarak modal parametreler tahmin edilir. Son aşamada ise tanımlanan modal parametreler ile her sensörden elde edilen veriler irdelenir.

NExT yönteminde değişmeyen rasgele süreç altında aşağıdaki hareket denklemi kullanılmıştır. Burada M , C ve K boyutları $n \times n$ olan sırasıyla kütle, sönüm oranı ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. Yine aynı denklemde $y(t)$ boyutu $n \times 1$ olan yer değiştirme vektörünü ve $F(t)$ ise boyutu $m \times 1$ olan kuvvet vektörünü ifade etmektedir.

$$M \ddot{y}(t) + C \dot{y}(t) + K y(t) = F(t) \quad (16)$$

Yukarıdaki denklemin içerisine $[\Phi]$ modal dönüşüm ve $\{q\}$ modal koordinat vektöründen oluşan aşağıdaki $\{x\}$ denklemi eklenir.

$$\{x\} = [\Phi] \{q\} \quad (17)$$

Sonrasında Duhamel integrali de kullanılarak çözüm yapılır ve $x(t)$ elde edilir. Aşağıdaki denklemde n mod sayısını, Φ^r ise $[\Phi]$ modal dönüşüm matrisinin r 'inci

kolonundaki r 'inci mod şeklini, $\{f\}$ ise rastgele titreşim fonksiyonları vektörünü ifade eder.

$$\{x(t)\} = \sum_{r=1}^n \{\phi^r\} \int_{-\infty}^t \{\phi^r\}^T \{f(r)\} g^r(t-r) dr \quad (18)$$

Denklem k noktasında tekil çıktı ve tekil girdi kuvveti ile çözümlenir ve aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$G_r = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha \phi_i^r \phi_k^r \phi_j^s \phi_k^s}{m^r m^s \omega_d^r} \left[\frac{I_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad (19)$$

$$H_r = \sum_{s=1}^n \frac{\alpha \phi_i^r \phi_k^r \phi_j^s \phi_k^s}{m^r m^s \omega_d^r} \left[\frac{J_{rs}}{J_{rs}^2 + I_{rs}^2} \right] \quad (20)$$

Burada I_{rs} ve J_{rs} sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$I_{rs} = 2\omega_d^r (\zeta^r \omega_n^r + \zeta^s \omega_n^s) \quad (21)$$

$$J_{rs} = (\omega_d^{s^2} - \omega_d^{r^2}) + (\zeta^r \omega_n^r + \zeta^s \omega_n^s)^2 \quad (22)$$

Yukarıdaki denklemde ω^r r 'inci modal frekans, ζ^r r 'inci modal sönüm oranını ifade etmektedir. Sonuç olarak asıl sistemin etki tepki fonksiyonu ile çapraz ilinti fonksiyonu azalan sinüs eğrileri ile aynı şekle sahiptir. (James, Carne, Lauffer, & Nord, 1992)

ERA (öz değer doğrulama algoritması) modal parametreleri serbest titreşim verilerini kullanarak ortaya koyan bir yöntemdir (Juang & Pappa, 1986). Ölçüm vektörü $y[n]$ ölçümleri yapılırken p sayıda sensör mevcutsa aşağıdaki denklem ortaya konulabilir:

$$\mathbf{Y}[n] = [y[1], y[2], y[3], \dots, y[m]] \quad (23)$$

Burada Hankel matrisi $\mathbf{H}_{rs}[k-1]$, $r \times s$ boyutunda oluşturulursa:

$$H_{rs}[k-1] = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}[k] & \mathbf{Y}[k+j_1] & \cdots & \mathbf{Y}[k+j_{s-1}] \\ \mathbf{Y}[h_1+k] & \mathbf{Y}[h_1+k+j_1] & \cdots & \mathbf{Y}[h_1+k+j_{s-1}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}[h_{r-1}+k] & \mathbf{Y}[h_{r-1}+k+j_1] & \cdots & \mathbf{Y}[h_{r-1}+k+j_{s-1}] \end{bmatrix} \quad (24)$$

Tekil değer ayrışması yöntemi ile de aşağıdaki bağıntıya ulaşılır:

$$H_{rs}[0] = PDQ^T \quad (25)$$

Burada T devrik matrise işaret etmektedir ve gürültü olarak değerlendirilebilecek küçük değerler sıfırla değiştirildiğinde aşağıdaki ifadenin yapısal sistemin en alt düzeydeki gerçekleşmesi olduğu bulunmuştur.

$$\{D^{-1/2}P^T H_{rs}[1]QD^{-1/2}, D^{1/2}Q^T E_m, E_p^T PD^{1/2}\} \quad (26)$$

Sistemin öz değer problemi çözüldüğünde:

$$(D^{-1/2}P^T H_{rs}[1]QD^{-1/2}) \psi_i = z_i \psi_i \quad (27)$$

Doğal frekanslar ve sönüm oranları öz değerler z_i kullanılarak hesap edilirse:

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \ln z_i / (k\Delta t) \\ f_i &= |\lambda_i| / (2\pi) \\ \zeta_i &= \text{Re}(\lambda_i) / |\lambda_i| \end{aligned} \quad (28)$$

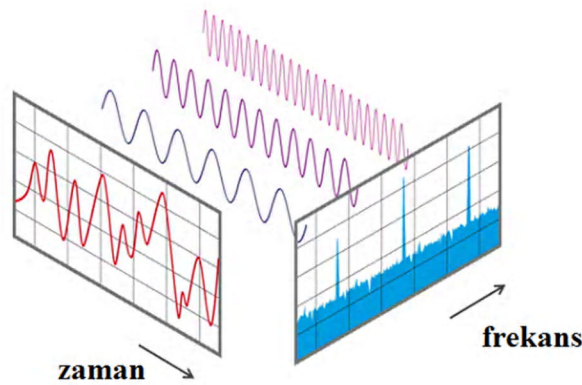
Yukarıdaki denklemde Δt örnekleme periyodunu ifade eder ve $\text{Re}(\cdot)$ ise karmaşık bir sayının gerçek kısmını alır. Sonrasında ise z_i 'ye karşılık gelen mod şekli ϕ_i ve modal genlik olarak ifade edilen Θ aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} \phi_i &= E_p^T PD^{1/2} \psi_i \\ \Theta &= \psi^{-1} D^{1/2} Q^T E_m \end{aligned} \quad (29)$$

Özetle NExT ve ERA yöntemlerinin genel anlamda üç aşamadan oluştuğu söylenebilir. Öncelikle NExT yöntemi kullanılarak sistemde çevresel kaynaklı veri analiz edilerek serbest titreşim verisine benzeyen bir sinyal oluşturulmaya çalışılır. Sonrasında ise ERA ile sistem sabit olduğu durumda serbest titreşim verileri kullanılarak sistemin sayısal modeli elde edilir. Bu aşamada tahmin edilen titreşim modları, Hankel matrisinin sıra ve sütunları tanımlama sürecini etkileyebilmektedir. Son olarak elde edilen sayısal model kullanılarak mod şekilleri, doğal frekanslar, sönüm oranlarına ulaşılır. (Caicedo, 2011)

2.5. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD)

Hızlı Fourier dönüşümü bir sinyali zaman veya uzay ekseninde örnekleyip onu frekans bileşenlerine ayıran bir algoritmadır. Fourier serisi kullanıldığında oluşan hesaplama yoğunluğu Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) sayesinde azaltılabilmektedir. Sinyalin bileşenleri olarak farklı frekanslarda ve her biri ayrı genlik ve fazda bulunan sinüs salınımları değerlendirmeye alınır.



Şekil 2.5. Zamana bağlı bir sinyalin sinüs fonksiyon bileşenlerine ayrılması

Bir HFD algoritması dikkate alınan zaman aralığında Ayırık Fourier Dönüşümü (AFD) ve Ters Hızlı Fourier Dönüşümü hesaplamalarını yapar. Ayırık Fourier Dönüşümü (AFD) ise dijital sinyal işlemede kullanılan en etkin araçlardan biridir. AFD sistemleri frekans alanında doğru ve etkin bir şekilde analiz etme ve tasarlama imkanı verir. Bu etkinliğin sebebi olarakta HFD algoritması gösterilebilir. HFD algoritması birçok mühendislik dalında, bilimse ve matematiksel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. HFD ile ilgili kullanılan bazı algoritmalara bakıldığında geçmişlerinin 18. Yüzyıla kadar dayandıkları görülmektedir. (Heideman, Johnson, & Burrus, 1984)

Fourier dönüşümünün temelinde ise esasında Fourier serileri kullanılmaktadır. Fourier seriler incelendiğinde karmaşık ama periyodik özellikteki fonksiyonların sinüs ve kosinüs dalgalarının toplamı şeklinde ifade edildiği görülmektedir. Fourier Dönüşümü ise Fourier serilerinin devamı niteliğindedir ki burada temsil edilen fonksiyon uzatılır ve sonsuza yaklaştırılır.

f fonksiyonunun Fourier dönüşümü geleneksel olarak bir $\hat{f}$ ile gösterilir. İntegrali alınabilen bir f fonksiyonun Fourier dönüşümünü tanımlamak için birçok farklı yöntem vardır. Burada kullanılacak olan ise herhangi bir gerçekte sayı ξ için:

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx \quad (30)$$

Denklemden bağımsız değişken x zamanı ifade eder, dönüşüm değişkeni ξ ise hertz olarak frekansı temsil eder. Uygun koşullar altında f , ters dönüşüm $\hat{f}$ vasıtasıyla ile belirlenir: Herhangi bir gerçekte sayı x için:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\xi) e^{2\pi i x \xi} d\xi \quad (31)$$

$\hat{f}(\xi)$ 'da ki eksi işaretinin nedeni, integralin $f(x)e^{-2\pi i x \xi}$ fonksiyonun 0 frekansında genlik ve fazını üretmesidir ki burada $f(x)$ fonksiyonu ξ frekansındaki genlik ve faz ile uyumludur, $\hat{f}(\xi)$ da burada bunu temsil etmektedir.

f 'nin $\hat{f}$ kullanılarak yeniden üretilebileceği ifadesi, Ters Fourier Teoremi olarak bilinir ve ilk olarak Fourier'in Analitik Isı Analizi'nde (Bochner & Chandrasekharan, 1949) bahsedilmiştir. Modern standartlara göre kuvvetli bir kanıt kabul edilen bu yöntemin tanınması zaman almıştır. f ve $\hat{f}$ işlevleri sıklıkla bir Fourier integral çifti veya Fourier dönüşüm çifti olarak adlandırılır. Öklid uzayındaki ise Fourier dönüşümü ayrı olarak ele alınmaktadır ki burada x değişkeni konumu ve ξ momentumu temsil etmektedir.

Hızlı Fourier dönüşümü (HFD ise ayrık bir Fourier dönüşümü algoritması olup N nokta için gereken hesaplamaların sayısını $2N^2$ 'den $2N \lg(N)$ 'e düşürür ki, burada $\lg 2$ tabanında bir logaritmadır. Ancak HFD ayrık Fourier dönüşüm algoritmalarına göre çok daha hızlı ve bazı durumlarda da daha kesin hesap yapabilme özelliğine sahiptir. $x_0, \dots, x_{N-1}$ arasında kompleks sayılar bulunsun. Ayrık Fourier dönüşümü burada aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (32)$$

Bu tanımın değerlendirilebilmesi için $O(N^2)$ tane işlem gerekmektedir ki her X_k için N adet çıktı vardır ve her çıktı bir N adet terimin toplanması gerekmektedir.

HFD'ler ilk olarak (Cooley & Tukey, 1965) tarafından tartışılmıştır. Hızlı Fourier dönüşümü (HFD) algoritmaları genel anlamda zaman tabanlı ve frekans tabanlı olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Cooley-Tukey HFD algoritması ilk olarak giriş elemanlarını ters sıraya göre düzenler, daha sonra çıkış dönüşümünü zamana bağlı olarak oluşturur. Buradaki ana fikir, N uzunluğundaki bir dönüşümü, $N / 2$ uzunluğundaki iki dönüşüme ayırmaktır:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-i2\pi kn/N} &= \sum_{n=0}^{N/2-1} a_{2n} e^{-i2\pi(2n)k/N} + \sum_{n=0}^{N/2-1} a_{2n+1} e^{-i2\pi(2n+1)k/N} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} a_n^{even} e^{-i2\pi nk/(\frac{N}{2})} + e^{-2\pi ik/N} \sum_{n=0}^{N/2-1} a_n^{odd} e^{-i2\pi nk/(\frac{N}{2})} \end{aligned} \quad (33)$$

2.6. Stokastik Alt Uzay Tanımlaması

Stokastik Alt Uzay Tanımlaması sadece output verisi ile çalışılan sistem tanımlamalarında kullanılmaktadır. Yani çevresel titreşim vasıtası ile oluşan veriler kullanılarak modal analiz uygulanabilmektedir. Modal analiz öz değer frekansları, sönüm oranları, mod şekilleri, modal katılım faktörleri titreşim verisini kullanarak elde edilmektedir. Çevresel titreşimin tesbiti zorluklar içermektedir. Dolayısı ile input verisinde oluşan parazitleri de dikkate alarak input verisinin yerine stokastik bir sistem tanımlaması yapılır. Zira çevresel titreşim kaynaklı parazitler sistemin öz değer frekansı ile karışabilir.

Özetle incelersek, Stokastik Altuzay Tanımlamasını kullanan Modal tanımlamanın çeşitli adımları vardır. Süreç sistemin uyarılması sonrası elde edilen iki sinyal ile başlar, bunlar genlik-frekans ve faz-frekans sinyalleridir. Transfer fonksiyonu sayesinde iki sinyal birleştirilmekte ve bundan sonra Fourier Dönüşüm algoritmasının da tersi alınarak Ani Tepki Fonksiyonu (Impulse Response Function (IRF)) elde edilmektedir. Sonuçta Olasılıklı Altuzay Belirlenmesi (SSI) tekniği algoritması ile doğal frekansları, sönüm oranlarını ve mod şekillerini içeren bir numerik model elde edilmektedir. Ani

Tepki Fonksiyonu parametrelerine ilaveten kutup değerleri, Stokastik Altuzay tanımlamasını kullanarak frekans sayılarını bulmak için diğer bir yöntemdir. Süreç için uygulanabilecek bir diğer adım ise denge fonksiyonu kullanarak daha kesin sonuçlar elde etmektir. Denge fonksiyonu ise farklı sayılarda kutup kullanarak sonuç elde etmektedir. Bu yöntemler izlenerek tanımlama süreci sona ermektedir. Stokastik Altuzay Tanımlaması yöntemi uzun yıllardan bu yana kullanılmaktadır.

2.7. Optimum Sensör Yerleşimi

Yapısal Sağlık İzleme sistemi sensör sistemi, veri işleme sistemi (veri toplama, aktarma ve depolama) ve yapısal sağlık durumunu değerlendirme sistemi olmak üzere genel olarak 3 ana başlıktan oluşmaktadır. Yapısal Sağlık Takibinde önemli parametreleri yakalamanın ve veri kalabalığına neden olmadan optimum sayıda veri elde edebilmenin yöntemi yapılara ideal sayıda ve ideal konumlarda sensörler yerleştirmektir. Ancak bu yapıldığı takdirde gerekli ve yeterli dinamik sistem verilerine ulaşmak mümkün olacaktır ki böylece büyük ölçekli yapılarda güvenilir ve etkili bir Yapısal Sağlık Takibi sistemi kurulabilecektir. Bahsi geçen optimum sensör yerleşimi konusu bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilebilir ki minimum sayıda sensör ile sensörlerin konumu tespit edilmeye çalışılmaktadır. Deneysel çalışmalarda sınırlı sayıda düğüm noktası olduğu için sensör yerleşim problemi nispeten kolay olmakla birlikte gerçek yapılarda düğüm noktaları aşırı miktarda fazladır. Gerek ekonomik olarak, gerek yapıda her kısma ulaşmanın zorluğu açılarından sensörler sınırlı sayıda düğüm noktasına yerleştirilebilmektedir, bu da bir optimizasyon problemi ortaya çıkarmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda ise sınırlı sayıda sensör ile yapıdan maksimum sayıda dinamik veri toplayabilen bir sistem için optimum sensör yerleşimi yaklaşımı geliştirilmeye çalışılmıştır. Optimum sensör yerleşimi problemini çözmek için öncelikle sınır koşullarını vererek ayrık optimizasyon problemi formüle edilmektedir ki çıktı tam sayı olduğu zaman olası sensör konumuna işaret etmektedir. Optimizasyon problemi için oluşturulan amaç fonksiyonu indirgenmiş modelden seçilen mod şekillerinden hesaplanan MAC (Modal Assurance Criteria - Modal Doğrulama Kriteri) cinsinden de ifade edilebilir. Ayrık Sanal Arı Kolonisi Algoritması (Discrete Artificial Bee Colony) kullanılarak yapılan 3 adet çalışmada uygun sensör konumları tespit edilmiş ve

belirtilen yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların da etkili olduğu ifade edilmiştir. (Sun & Büyüköztürk, 2015)

Bina, köprü, uzay ve havacılık araçları, makine vb. mühendislik yapılarında olası bir hasarın tespiti mühendisler açısından en önemli vazifelerden birisidir. Mühendislik yapılarının düzenli olarak izlenerek performans durumlarına karar verilmesi, operasyonel yük altındaki davranışlarının incelenmesi ve yapısal sağlık durumlarının tespiti gerekmektedir. Zira mühendislik bilimi sadece yapıyı inşa etme aşamasında değil esasen daha kritik olan yapı kullanımı aşamasında müdahil olarak olası gerekli tedbirleri ivedi olarak alabilecek konumda olmalıdır. Yapının sürekli gözlemlenmesi ve olası hasarların tespiti yapılırken minimum işgücü kullanılarak, yapıdan elde edilecek düzenli verilere ihtiyaç vardır ki bu aşamada sensörler mühendislik biliminin yanında yer almaktadır. Yapısal Sağlık İzlemesinin en temel gereksinimlerinden biriside sensörlerin yerleşimi konusudur. (Vachtsevanos & Zhang, March 2007) Son yıllarda birçok araştırmaya da konu olan optimum sensör yerleşimi ile ilgili Kammer büyük ölçekli yapılar için etkin bağımsızlık yöntemini önermiştir. (Kammer, 1991) Worden ve Burrows ise sinirsel ağlar ve güdümlü optimizasyon yöntemini kullanarak hasar tespiti üzerine çalışmışlardır (Worden & Burrows, 2001). Bilgi entropisi yöntemini kullanan Papadimitrou optimum sensör yerleşimi konusunda yaptığı çalışmalarında çeşitli sensör yerleşimlerinin performanslarını irdelemiştir. (Papadimitriou C. , 2004) (Papadimitriou & Lombaert, 2012). Diğer bir çalışmada ise Rao ve Anandakumar tarafından sensör yerleşim optimizasyonu ile ilgili çeşitli etkenlerin olduğu dikkate alınarak karma parçacık sürü optimizasyon metodu kullanılmıştır. (Rao & Anandakumar, 2007) Konu ile ilgili yapılan başka bir çalışmada ise sensörlerin konumunu optimize etmek için ardışık sensör yerleşimi ve genetik algoritma gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır (Yi, Li, & Zhang, 2015). Bayes kuramını temel alan sensör yerleşim optimizasyonu çalışmasında ise hata tespit teorisinin ana şeması oluşturulmaya çalışılmıştır (Flynn & Todd, 2010). Yapılan bir diğer çalışmada ise esnek yapılar araştırılarak bu yapıların çok boyutlu mod şekilleri irdelenmiştir (Chang & Pakzad, 2015). Optimizasyon yöntemi ile eldeki kısıtlı kaynakların en uygun kullanımı hedeflenir ve belli kısıtlar altında çalışarak matematiksel açıdan en iyi çözümü yakalamaya çalışır. Sensör yerleşim optimizasyonu ile de n sayıda nokta arasından $m < n$ koşulunu sağlayan m adet noktayı bulmak amaçlanır. Optimizasyon ile ilgili kullanılan yöntemlerden Tekil Değer Ayırıştırmasında

frekans tepki fonksiyonu analiz edilerek enerjinin sistemde nasıl dağıldığı tespit edilmektedir. Ölçülen serbestlik dereceleri sistemin kinetik enerjisinin büyük kısmını saklar ki, her mod için ölçülen kinetik enerji değeri kullanılarak gerçek mod şekli ortaya konabilir. Bu da sensörlerin yerleşim noktalarının tespitini kolaylaştırır. Genellikle yapısal hasarın tespit edilmesi doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri gibi özdeğer parametrelerindeki değişimlerin bulunması ile gerçekleştirilmektedir. Böylece mod şekilleri kullanılarak yorum yapılabilmektedir. Başka bir çalışmada ise yine mod gerilim enerjisi yöntemi kullanılarak ilk sensör yerleşimi oluşturulmakta ve uyarlanabilir genetik algoritma kullanılarak optimum sayıda sensör elde edilebilmektedir. (Harshita, Sakthieswaran, Brintha, & Babu, 2016)

3. BÖLÜM

ANALİTİK VE DENEYSEL BULGULAR

3.1. Modal Parametrelerin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

Genel anlamda yapıların sayısal modelleri vasıtası ile yapının dinamik özellikleri hakkında bir takım bilgilere ulaşılabilmektedir. Tez çalışması kapsamında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında yapısal deney modeli oluşturularak Yapısal Sağlık İzleme yöntemleri ile dinamik parametreler tespit edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan ivmeölçerler vasıtası ile yapının titreşimi esnasındaki dinamik veriler toplanmıştır. Burada kullanılan yöntem output-output yöntemidir ki mevcut yapıların dinamik verilerini toplarken başka bir metot kullanılması neredeyse imkânsızdır. Çünkü bu metodu kullanırken yapıdaki titreşimin ve diğer dinamik özellikleri oluşturan kuvvetlerin bilinmesine gerek duyulmamaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan aşağıdaki sensör MEMS tabanlı olup 1000 Hz veri görüntüleyebilme ve kablosuz olarak veri aktarımı yapabilme özelliğine sahiptir.



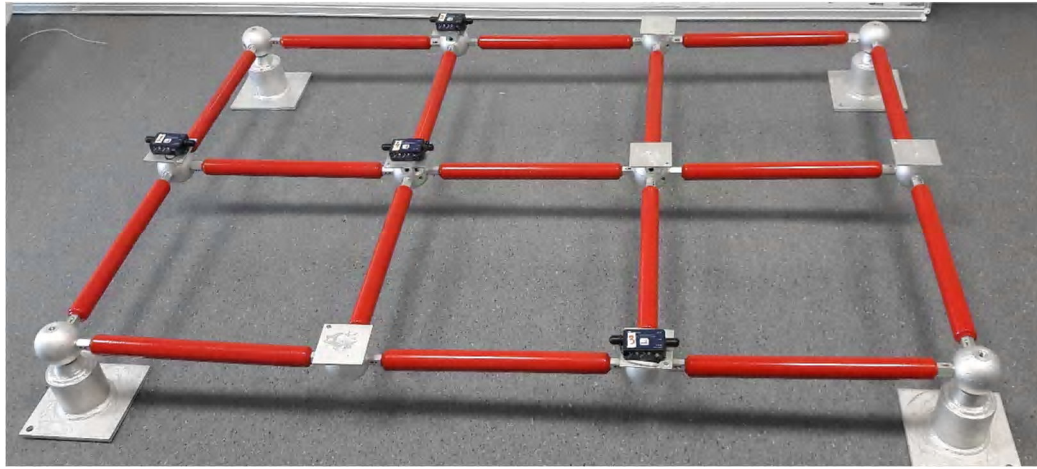
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan sensörlerden bir görünüm

Yapısal Sağlık İzleme sisteminin modellendiği deneysel çalışmada boru kesit elemanlar kullanılmış ve küre mafsallar yardımıyla birbirlerine bağlanmışlardır. Yüksek açıklıkları geçmek amaçlı sıkça kullanılan bu sistem sayesinde farklı tipteki yapılarda modellenebilmektedir. Deneyde kullanılan malzeme ve kesit özellikleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan malzemenin özellikleri

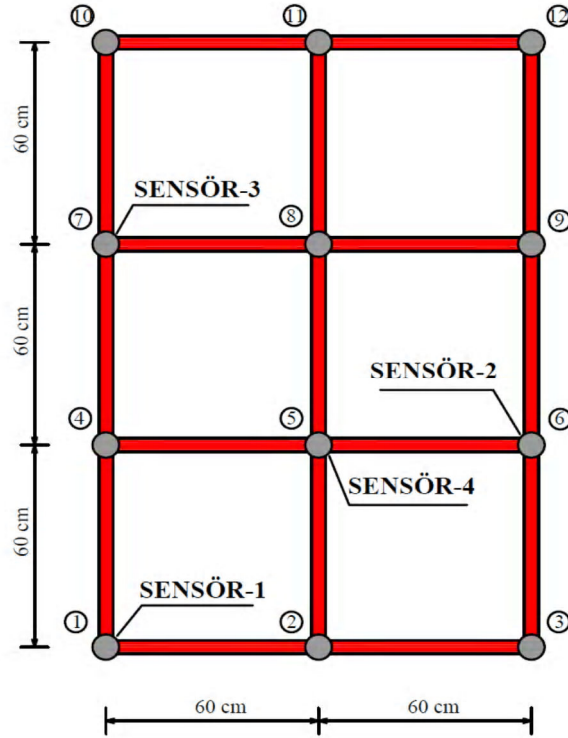
Kesit Özellikleri		Malzeme Özellikleri	
Alan (mm²)	399,73	E (GPa)	190
I (mm⁴)	77.111,85	Yoğunluk (kg/m ³)	7700
J (mm⁴)	154.223,7	J (poisson oranı)	0,3

Yukarıda bahsedilen kesit ve malzeme kullanılarak aşağıdaki resimde yer alan yapı modeli oluşturulmuştur.



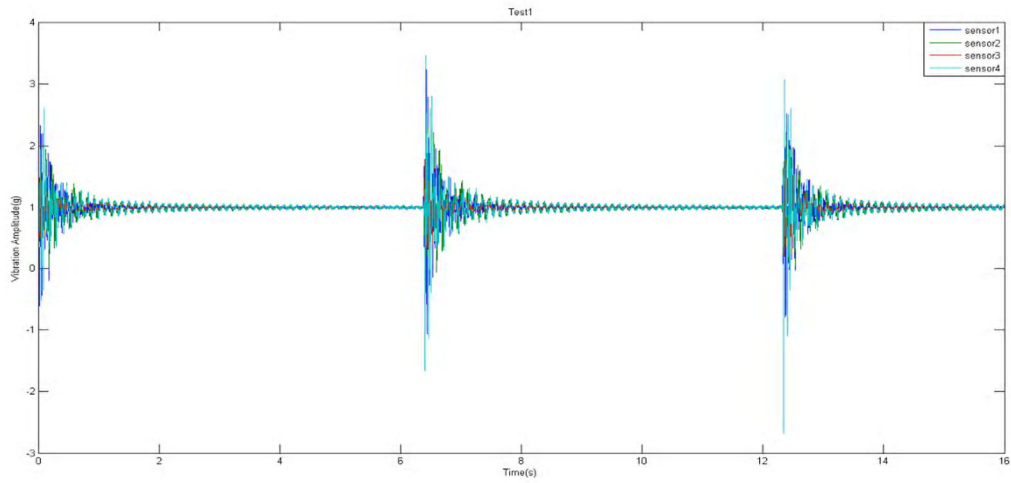
Şekil 3.2. Yapısal Sağlık İzleme için oluşturulmuş örnek deney düzeneği

Yapısal Sağlık İzleme uygulamasının test edilmesi amaçlı oluşturulan örnek deneysel düzeneğe ve kullanılan sensörlerin örnek dağılımı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Yapılan deneyden alınmış örnek sensör yerleşim planı

Yapının titreşime maruz bırakılarak serbest titreşimi esnasında oluşan verileri kaydetmek amacıyla 4 adet akıllı kablosuz ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlerden bir tanesi referans ivmeölçer olarak kabul edilerek diğer sensörler sırasıyla tüm düğüm noktalarına yerleştirilerek düşey doğrultudaki ivme-zaman grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5'te bu testlerden bir tanesi için oluşturulan ivme-zaman grafiği gösterilmektedir.

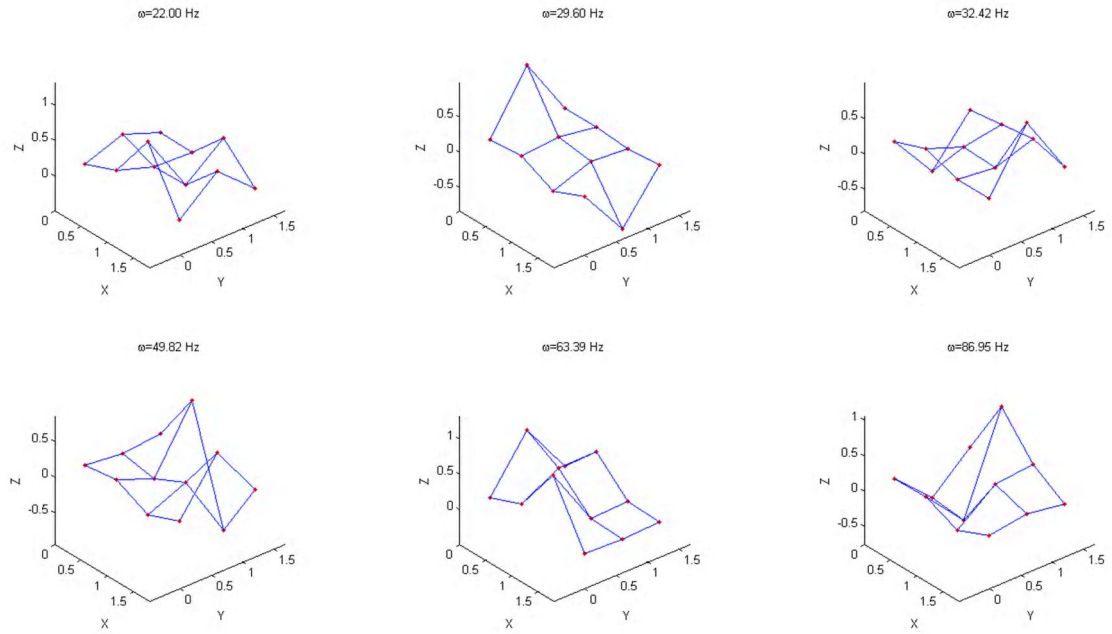


Şekil 3.4. Yapısal Sağlık İzleme deney sonucuna göre oluşan ivme - zaman grafiği

Zaman-genlik verileri tüm düğüm noktaları için birleştirilmiş ve SSI algoritması ile mod şekilleri ve doğal frekanslar elde edilmiştir. Tablo 2’de ilk altı doğal frekansa karşılık gelen modların değerleri verilmiş ve şekil 3’de ise bu modlar görselleştirilmiştir.

Tablo 3.2. Deney sonucunda elde edilen ilk 6 doğal frekans için mod şekilleri

Düğüm No	Mod Şekilleri					
	Frekans 1 22,00 Hz	Frekans 2 29,60 Hz	Frekans 3 32,42 Hz	Frekans 4 49,82 Hz	Frekans 5 63,39 Hz	Frekans 6 86,95 Hz
1	-0,004	0,012	-0,056	0,057	0,048	0,075
2	0,236	1,000	-0,766	0,074	0,864	-0,585
3	0,134	0,849	-0,522	-0,137	0,188	-0,232
4	-0,019	0,002	0,068	-0,863	0,550	1,000
5	0,001	0,092	-0,035	0,179	0,550	-0,643
6	0,209	0,048	0,195	-0,059	0,199	0,019
7	0,528	-0,048	0,147	1,000	0,037	0,338
8	0,005	0,010	-0,073	-0,066	0,018	0,281
9	1,000	-0,232	-0,004	0,203	1,000	-0,228
10	0,014	-0,073	-0,010	0,175	0,305	0,639
11	0,555	-0,820	1,000	-0,889	-0,021	0,089
12	-0,014	0,047	-0,016	0,048	-0,062	-0,040



Şekil 3.5. Deney sonucunda elde edilen ilk 6 doğal frekans için mod şekilleri

Yapılan analiz ve deney sonuçlarına göre oluşan ivme-zaman grafikleri, mod şekilleri, doğal frekanslar elde edilerek dinamik parametreler irdelenmiştir. Elde edilen parametreler yapının mevcut sayısal modeli ile elde edilecek dinamik parametrelerle karşılaştırılarak yapının sayısal modelinin yapıyı doğru şekilde tanımlayıp tanımlamadığına karar verilebilir. Aynı zamanda deneysel olarak elde edilen parametreler kullanılarak yapının sayısal modeli güncellenebilir. Yapıda herhangi bir hasar mevcut ise bu deneysel parametreler ile kontrol edilerek tespit edilebilir. Yapının mevcut sayısal modelinin güncellenmesi için ve hasar tespiti için çeşitli metotlar mevcuttur. Deney sonucunda elde edilecek olan dinamik parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi model güncelleme ve hasar tespiti için çok önemlidir. Günümüzde yaygınlaşan Yapısal Sağlık İzlemede kullanılan akıllı kablosuz sensörler ile yapıların dinamik davranışını anlık olarak takip ederek dinamik parametreler elde edilebilmektedir.

3.2. Modal Güvence Kriteri (MAC (Modal Assurance Criterion))

MAC iki mod şekli arasındaki benzerliği sayısal olarak ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Burada iki farklı normalize edilmiş mod şekli matrisi içerisinde yer alan mod vektörleri karşılaştırılır. Sonuç olarak iki farklı mod şekli matrisi içerisinde yer

alan mod şekli vektörlerinden birbirine en çok benzeyen mod şekilleri ortaya konulmuş olur.

$$MAC(i, j) = \frac{|\{\Phi_A\}_i^T \{\Phi_B\}_j|}{(\{\Phi_A\}_i^T \{\Phi_A\}_j) (\{\Phi_B\}_i^T \{\Phi_B\}_j)} \quad (34)$$

Buradaki ifadede Φ_A ve Φ_B farklı iki mod matrisidir ki bu matrisler normalize edilmiş mod şekli vektörlerinden oluşmaktadır. Bu iki matris içerisinde yer alan mod şekli vektörlerinin hepsi birbiriyle karşılaştırılarak en çok benzerliği gösterenler sonuç olarak ortaya çıkarılır.

3.3. MAC Değeri Kullanılarak Farklı Serbestliklerin Karşılaştırılması

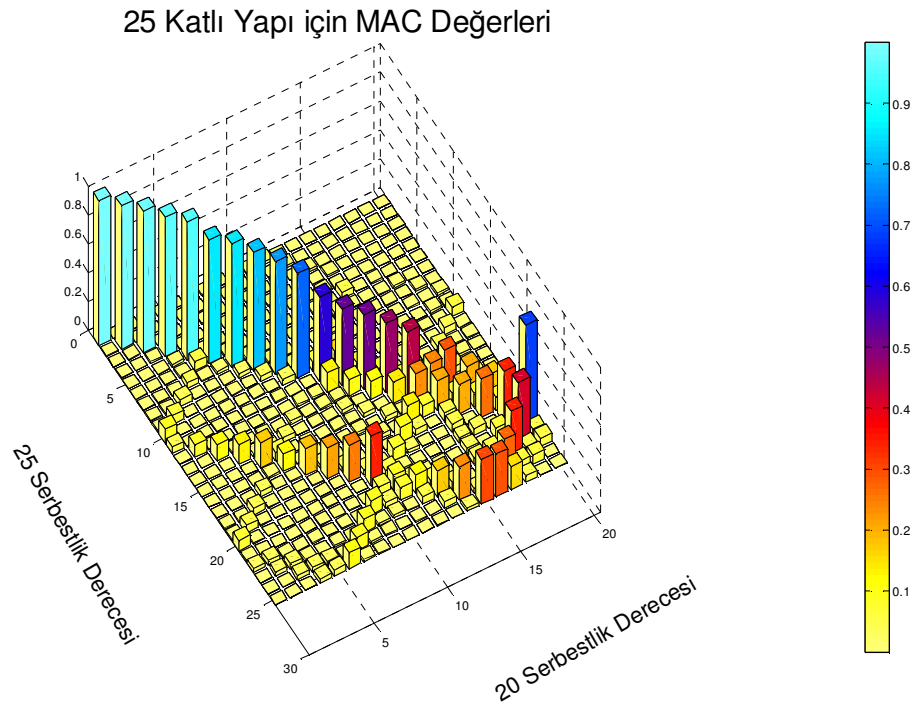
Burada önemli olan karmaşık ve serbestlik derecesi fazla olan yapılarda serbestlik derecesi indirildiği zaman hesaplamalara ve dinamik parametrelere etkisini tayin edebilmektir. Dolayısı ile çalışmanın devamında yer alan örnek 1'deki 25 serbestlik dereceli yapının serbestliği düşürülecek ve Matlab ortamında oluşturulan algoritma yardımıyla dinamik parametreler hesaplanacaktır. Sonrasında ise oluşturulan dinamik parametreler birbiriyle karşılaştırılarak en az fark oluşturacak olan metot ortaya konulmaya çalışılacaktır. 25 katlı yapı için her kat döşemesinde yoğunlaştırılmış 25 serbestlik derecesi alınmıştır. Burada öncelikle bahsi geçen yapı için sadece 5, 10, 15, 20 ve 25'inci katları serbestlikleri kaldırılarak yapı 20 serbestliğe düşürülecektir.

Yapılan analiz neticesinde aynı yapıyı temsil eden 25 ve 20 serbestlik dereceli durumlarda aşağıdaki doğal frekanslar elde edilmiştir. Doğal frekanslar karşılaştırıldığında 5 derece indirgenmiş yapı ile indirgenmemiş yapı arasındaki en yakın doğal frekans değerlerinin 1'inci, 2'nci, 3'üncü ve 6'ıncı modlarda ortaya çıktığı görülmektedir.

Tablo 3.3. 25 katlı yapı için 20 ve 25 serbestlik dereceli durumlarda doğal frekansların karşılaştırması

	A	B	C
Mod Numaraları	Doğal Frekans (25 DOF) (Hz)	Doğal Frekans (20 DOF) (Hz)	Yüzde Fark $(B/A) \times 100$
1	0,004058	0,004059	99,98%
2	0,012158	0,012180	99,82%
3	0,020212	0,020315	99,49%
4	0,028189	0,028476	98,99%
5	0,036060	0,036794	98,00%
6	0,043793	0,043984	99,57%
7	0,051361	0,052384	98,05%
8	0,058733	0,060267	97,45%
9	0,065883	0,067832	97,13%
10	0,072783	0,074620	97,54%

Ayrıca 20 ve 25 serbestlik dereceli durumlar için mod şekillerinin karşılaştırılması ile oluşan MAC değerlerinin şekilsel gösterimi aşağıda yapılmaktadır.



Şekil 3.6. 25 Katlı Yapı için MAC Değerleri 20 ve 25 serbestlik durumunda karşılaştırılması

Oluşan MAC değerlerinin tablo düzeneğinde karşılaştırılması ise aşağıda yer almaktadır. Tabloda görüldüğü üzere yüzde 95'in üzerinde benzerlik gösteren ilk 5 mod birbirini karşılayabilmiştir. Diğer modlarda ise hata değerleri artmakta ve modlar birbirini yüzde 5'in üzerinde bir hata ile karşılamaktadırlar.

Tablo 3.4. 25 katlı yapı için 20 ve 25 serbestlik derecesine gelen MAC değerleri tablosu

		20 serbestliğe karşılık gelen modlar									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25 serbestliğe karşılık gelen modlar	1	0,99928	0,00011	0,00061	0,00037	0,00082	0,00053	0,00101	0,00103	0,00364	0,00216
	2	0,00261	0,99275	0,00007	0,00086	0,00025	0,00105	0,00052	0,00364	0,00262	0,00215
	3	0,00150	0,00532	0,98010	0,00070	0,00140	0,00013	0,00328	0,00367	0,00303	0,00050
	4	0,00222	0,00153	0,00934	0,96263	0,00173	0,00236	0,00440	0,00206	0,00009	0,00000
	5	0,00203	0,00336	0,00217	0,01589	0,95412	0,00029	0,00032	0,00016	0,00000	0,00014
	6	0,00252	0,00223	0,00479	0,00684	0,06034	0,85475	0,01009	0,00016	0,00008	0,00005
	7	0,00296	0,00411	0,00609	0,04030	0,00711	0,01851	0,85341	0,01163	0,00030	0,00002
	8	0,00455	0,00653	0,04757	0,00253	0,00517	0,00017	0,02815	0,81871	0,01212	0,00025
	9	0,00865	0,06167	0,00102	0,00230	0,00001	0,00636	0,00003	0,03590	0,77816	0,00689
	10	0,09347	0,00012	0,00186	0,00024	0,00543	0,00009	0,00918	0,00003	0,03894	0,72032

Sonuç olarak ifade edilebilir ki yüksek serbestlik dereceli sistemlerde sistem indirgenerek serbestlik derecesi düşürüldüğünde ilk 3 mod şeklinde yüzde 1'i aşan ve karşılık gelen doğal frekanslarda ise yüzde 5'i aşan bir değişiklik oluşmamaktadır. Dolayısı ile özellikle yapıların indirgenmiş modelleri ile çalışılırken ilk 3 mod kullanılması uygun olacaktır. Dahası zaten yapıların doğal ortamlarında ve çevresel titreşim etkisi altında yüksek frekanslarda bir titreşim yapmaları beklenmemektedir.

3.4. Optimum Sensör Yerleşimi için Amaç Fonksiyonu Oluşturulması

Sürekli fonksiyonlar olarak tanımlanmış yapıların incelenebilmesi için optimum sensör yerleşimi konusu önemli olup ayrıık sensörlerden gelen bilgilere göre hareket edilir.

Burada problemin bir kombinasyon optimizasyonuna dönüştüğü söylenebilir. Toplam n adet aday konum arasından $m < n$ olan toplam m adet konum bulunmalıdır ki bu da en iyi sonucu vermelidir. Sensörlerin m adet olduğu dikkate alınır sa olası sensör konumlarının sayısı aşağıdaki şekilde oluşur.

$$C = \frac{n!}{m! (n - m)!} \quad (35)$$

Bilindiği üzere kombinasyon hesaplarında olası konumlardaki sıralamalar önemli değildir. Eğer incelenmek istenen yapının serbestlik derecesi düşükse ve basit bir geometrik şekle sahipse olası sensör konumları deneme yanılma yöntemiyle elde edilebilir. Ancak karmaşık yapılarda bunu sistematik bir yaklaşım yapmadan gerçekleştirmek neredeyse imkânsızdır.

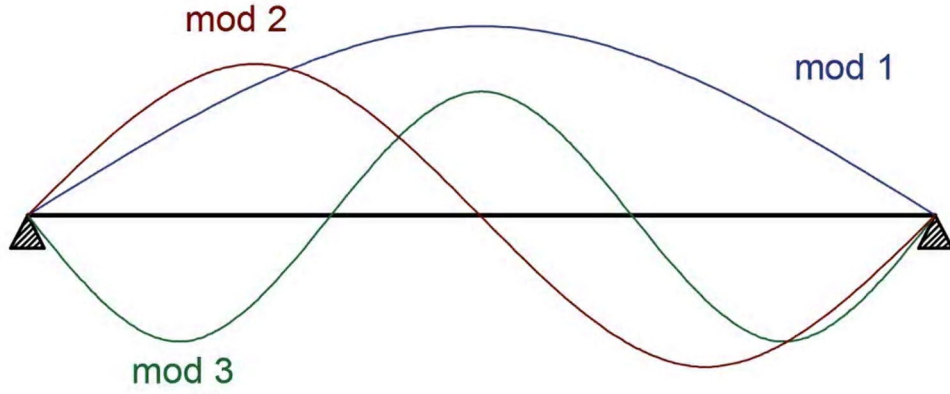
Sonraki aşamaya geçilecek olursa ki burada yapısal hareket denkleminin modal koordinat kısımları irdelenir:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i + M_i^{-1} \cdot C_i \dot{q}_i + M_i^{-1} \cdot K_i q_i &= M_i^{-1} \cdot \Phi_i^T \cdot B_0 \cdot u \\ y &= \Phi \cdot q + \varepsilon \end{aligned} \quad (36)$$

Yukarıdaki denklemlerde q_i modal koordinat vektörü q 'nın i 'inci elemanıdır ve M_i , K_i ve C_i de sırasıyla kütle, rijitlik, sönüm matrisleridir. Φ ise mod şekli matrisini ifade etmektedir ve i 'nci kolonu ise i 'nci normalize mod şeklini ifade eder, y ise ölçüm kolon vektörüdür ve yapının hangi durumunun ölçüldüğünü ifade eder. ε ise sinyal kaynaklı sabit gürültü seviyesini ifade etmektedir ancak bu çalışma kapsamında kullanılmayacaktır.

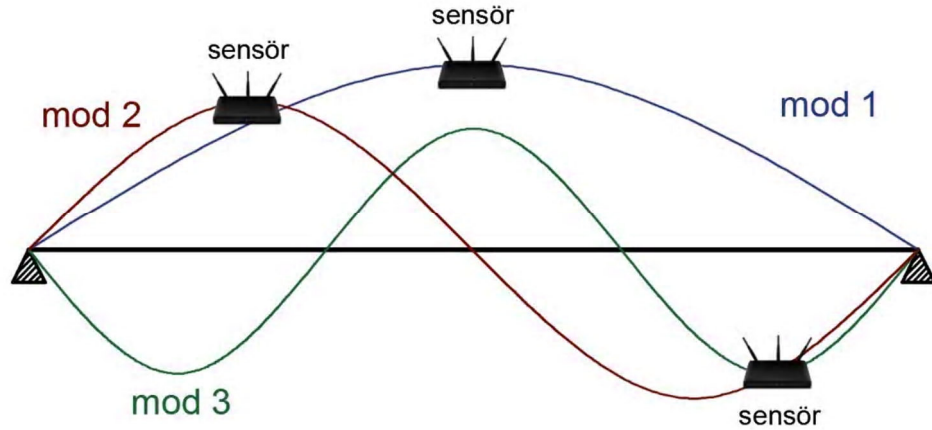
Yapılarda sensör yerleşimi incelenirken birkaç farklı başlık mevcuttur. Bu aşamada en az kaç adet sensör yerleştirileceği, bu sensörlerin nerelere yerleştirileceği ve bu sensör yerleşim metodunun etkinliğinin ölçümünün nasıl yapılacağı önem arz etmektedir. Bilinmektedir ki serbestlik derecesi kadar mod şekli oluşan yapıda elde edilmek istenen mod sayısından daha az sensör kullanılamaz. Bu çalışmada düşük frekanslarda gerçekleşen ilk 3 mod üzerinde çalışılacaktır. Ayrıca bilinmelidir ki bazı modların birleşimleri diğer modların görselleştirilmesine imkan vermektedir. Bu çalışmada yapının mod şeklini oluşturduğu esnadaki enerjisi dikkate alınacaktır ve en büyük

genliğe sahip olan düğüm noktaları tercih edilecektir. Bu yöntem sayesinde gürültü seviyesi yüksek ortamlarda yapılan ölçümlerde bile gürültünün sensör sinyaline oranı azaltılmış olacaktır ki elde edilen sinyal verileri daha sağlıklı olacaktır.



Şekil 3.7. Bir kiriş eleman için oluşan ilk 3 mod şekli

İlk 3 mod şekli yapı simetrik olduğu durumda yukarıdaki şekilde oluşmaktadır. Bu ilk 3 mod şeklini incelemek için gerekli olan minimum sayıda sensörün kaç adet olması gerektiği nasıl tahmin edilebilir? Birinci mod için enerji seviyesinin ve genliğin en fazla olduğu konuma bir sensör yerleştirildiğinde, ikinci mod için oluşan 2 tepe noktasından birisine ve üçüncü mod için oluşan tepe noktalarından sağ veya solda oluşan en yüksek genliğe sahip noktaya bir sensör yerleştirildiğinde yeterli veri elde edilebilir. Dolayısı ile toplamda minimum 3 adet sensör ile çalışmalara başlanılabilir. Mod 1 en yüksek olduğu genlik noktası ile mod 3'ün ortasında yer alan dalganın en yüksek genliğe sahip olduğu nokta aynıdır. Ayrıca mod 2'nin en yüksek genliğe sahip olduğu noktalar ile mod 3'ün sağ ve sol kısmındaki dalgaların en yüksek genlikleri arasında kiriş boyunun yüzde 8'ine yakın bir fark mevcuttur. Yani mod 2 ve mod 3 için en yüksek genliklere yerleştirilen sensörler bir diğerinin mod şekli hakkında bilgi toplanmasına yardımcı olur.



Şekil 3.8. İlk 3 mod şekline karşılık gelen olası minimum 3 sensörün konumları

3.5. Örnek Uygulama 1 - (25 katlı bina, $h_1: h_{25}=3m$):

Sonlu elemanlar metodu ile kütle ve rijitlikler indirgenerek üstte sağda görülen yapı oluşturulmuştur. İndirgenmiş olan bu yapı kullanılarak yapı doğal frekansları, mod şekilleri gibi parametreler elde edilecektir. Elde edilen parametreleri girdi olarak alıp Sonlu Elemanlar Programı Matlab ortamında oluşturulan algoritma ile de yapısal sağlık takibinde kullanılacak olan sensörlerin optimum konumları tespit edilmeye çalışılacaktır.

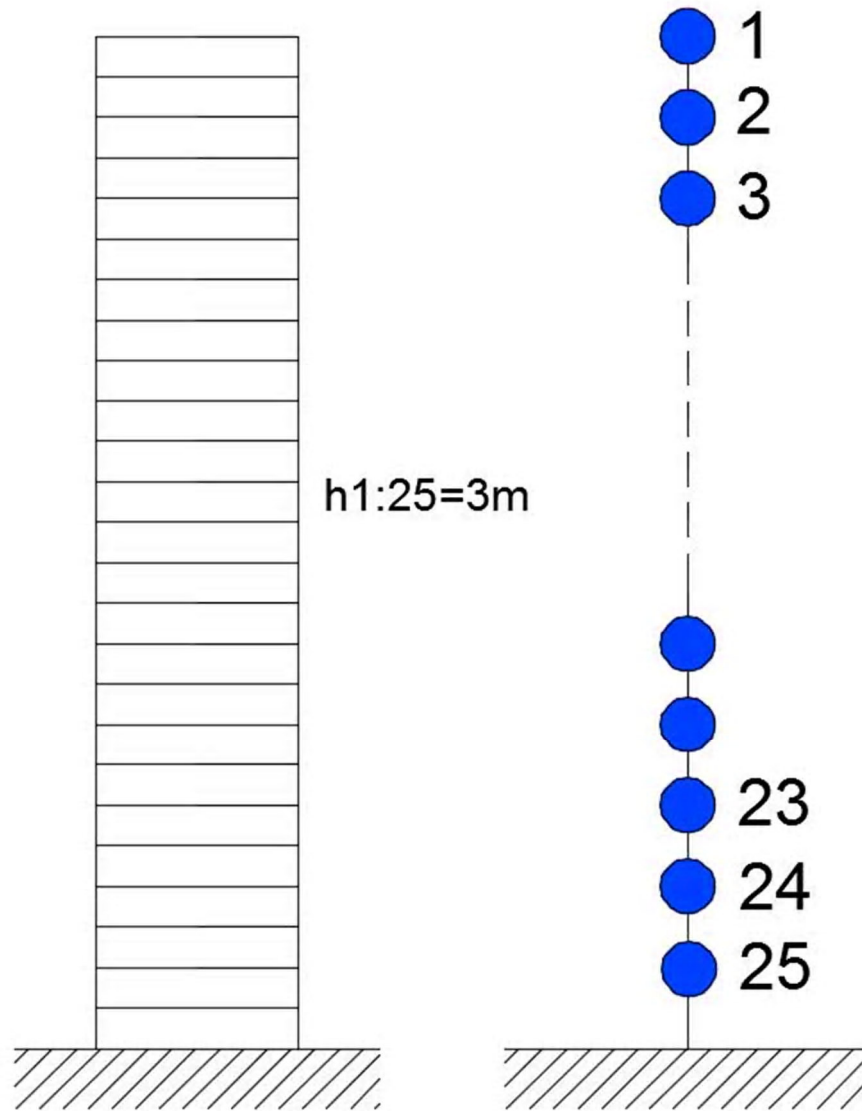
Tablo 3.5. Yapısal sistemi tanımlarken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri

Kesit Özellikleri		Malzeme Özellikleri	
Alan (mm ²)	399,73	E (GPa)	200
I (mm ⁴)	77.111,85	Yoğunluk (kg/m ³)	7700
J (mm ⁴)	154.223,7	J (poisson oranı)	0,3

Burada kullanılan modelde kütle ve kat yüksekliklerinin bütün katlarda eşit dağıldığı varsayılmıştır. Bu varsayım doğrultusunda aşağıdaki tabloda yer alan kütle ve rijitlik değerleri kullanılarak model oluşturulmuştur.

Tablo 3.6. 25 katlı bina için kütle, rijitlik, kat yükseklik değerleri

Katlar	Katlar için verilen kütle değerleri (kg)	Katlar için verilen rijitlik değerleri (N/m)	Kat Yüksekliği (metre)	Her Katın Yerden Yüksekliği (metre)
1	48500	6850	3	75
2	48500	6850	3	72
3	48500	6850	3	69
4	48500	6850	3	66
5	48500	6850	3	63
6	48500	6850	3	60
7	48500	6850	3	57
8	48500	6850	3	54
9	48500	6850	3	51
10	48500	6850	3	48
11	48500	6850	3	45
12	48500	6850	3	42
13	48500	6850	3	39
14	48500	6850	3	36
15	48500	6850	3	33
16	48500	6850	3	30
17	48500	6850	3	27
18	48500	6850	3	24
19	48500	6850	3	21
20	48500	6850	3	18
21	48500	6850	3	15
22	48500	6850	3	12
23	48500	6850	3	9
24	48500	6850	3	6
25	48500	6850	3	3

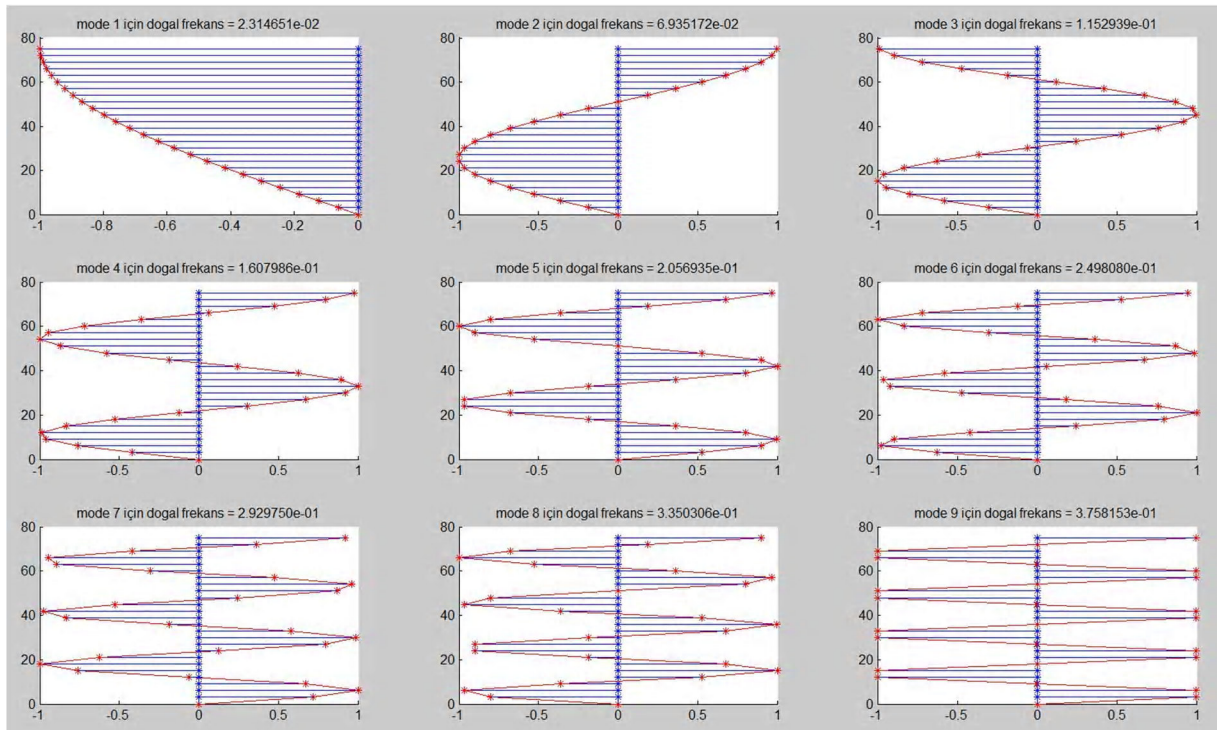


Şekil 3.9. 25 Katlı örnek bir bina ve indirgenmiş sonlu elemanlar metodu

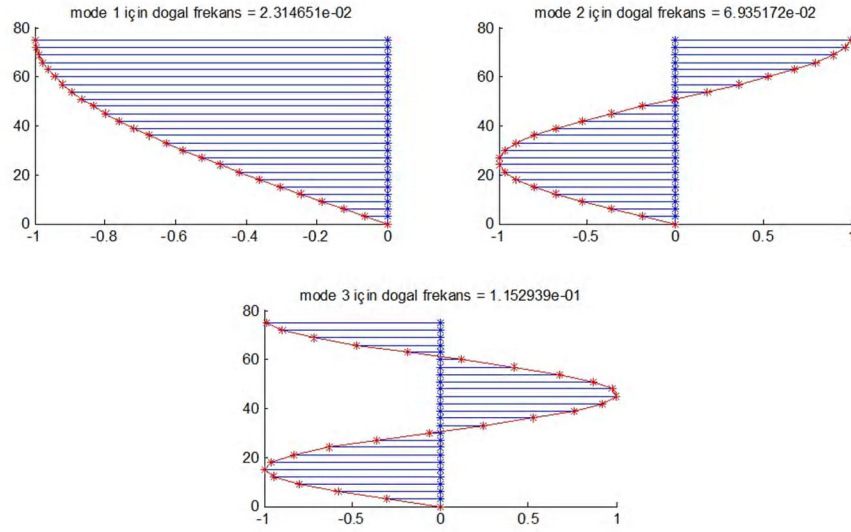
Tablo 3.7. 25 katlı bina için modal analiz sonrası oluşan mod numaraları, doğal frekans ve periyot değerleri

Mod Sırası	Frekans Değerleri (Hz) H1:H25=3m, 25 kat	Periyot (saniye)
1	0,023147	43,203
2	0,069352	14,419
3	0,115294	8,673
4	0,160799	6,219
5	0,205693	4,862
6	0,249808	4,003

7	0,292975	3,413
8	0,335031	2,985
9	0,375815	2,661
10	0,415174	2,409
11	0,452959	2,208
12	0,489025	2,045
13	0,523236	1,911
14	0,555462	1,800
15	0,585581	1,708
16	0,613479	1,630
17	0,639049	1,565
18	0,662196	1,510
19	0,682830	1,464
20	0,700875	1,427
21	0,716260	1,396
22	0,728929	1,372
23	0,738833	1,353
24	0,745934	1,341
25	0,750205	1,333



Şekil 3.10. Sonlu Elemanlar Metodu ile 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 9 mod şekli



Şekil 3.11. Sonlu Elemanlar Metodu ile 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 9 mod şekli

Örnek yapının kütle matrisi, rijitlik matrisi, doğal frekansları ve mod şekillerini içeren matrisler Matlab ortamında geliştirilen algoritma ile elde edilmiştir. Sonrasında ise amaç fonksiyonu doğrultusunda olası sensörlerin sayıları ve en iyi sensör lokasyonları ilk 3 modu yakalamak için aşağıdaki şekilde tespit edilmiştir. Amaç fonksiyonu bütün ihtimalleri değerlendirerek en iyi olanları ayıklamaktadır.

Tablo 3.8. 25 katlı örnek yapıya 12 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)											
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	6	7	8	12	13	17	18	21	22	23

Tablo 3.9. 25 katlı örnek yapıya 11 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)										
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	6	7	12	13	17	18	21	22	23

Tablo 3.10. 25 katlı örnek yapıya 10 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)									
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	12	13	17	18	21	22	23

Tablo 3.11. 25 katlı örnek yapıya 9 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)								
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	12	13	17	21	22	23

Tablo 3.12. 25 katlı örnek yapıya 8 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)							
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	13	17	21	22	23

Tablo 3.13. 25 katlı örnek yapıya 7 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)						
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	13	17	21	22

Tablo 3.14. 25 katlı örnek yapıya 6 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)					
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	13	17	21	22

Tablo 3.15. 25 katlı örnek yapıya 5 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)				
Sensör numarası	1	2	3	4	5
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	17	21	22

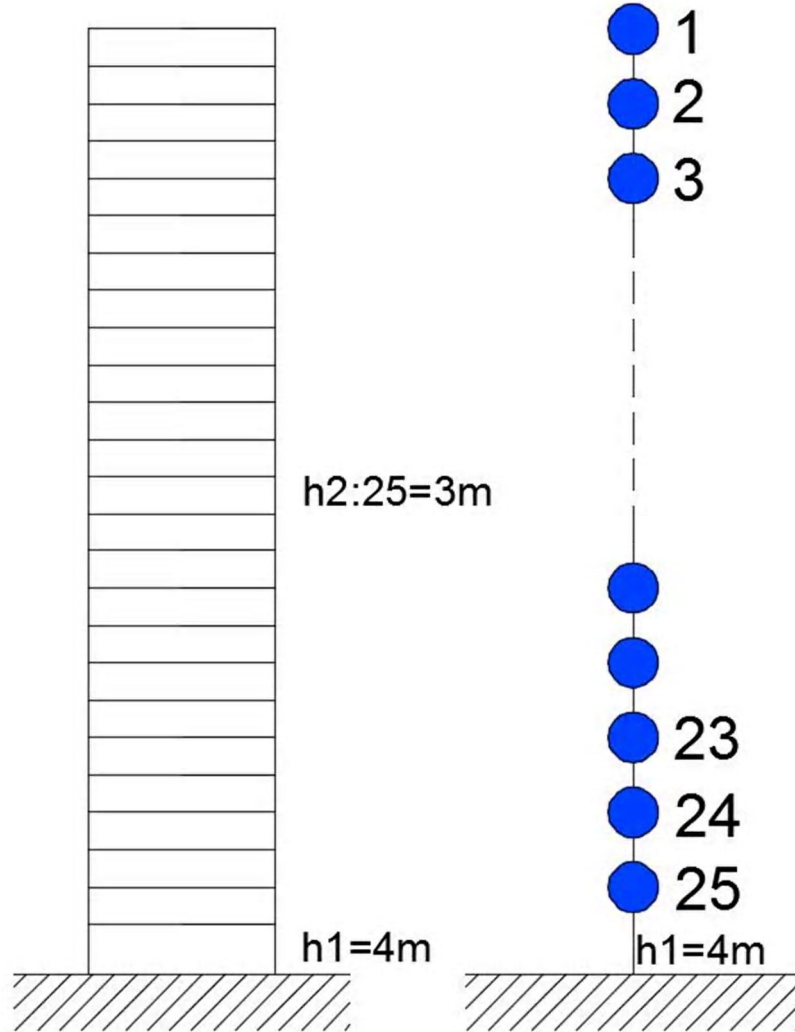
Tablo 3.16. 25 katlı örnek yapıya 4 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)			
Sensör numarası	1	2	3	4
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	17	21

Tablo 3.17. 25 katlı örnek yapıya 3 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)		
Sensör numarası	1	2	3
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	17	21

3.6. Örnek Uygulama 2 - (25 katlı bina, $h_1=4m$, $h_2:h_{25}=3m$):



Şekil 3.12. Birinci kat yüksekliği 4 metre olan 25 Katlı örnek bir binanın ve indirgenmiş sonlu elemanlar metodu

25 katlı yapı yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere indirgenerek modelleneyecektir. Sadece birinci katın kat yüksekliği ve kütlesi artırılıp 25 katlı örnek yapı için hesaplamalar bu şekilde gerçekleştirilecektir. Yapı için oluşan kat, kütle, rijitlik ve yükseklik özelliklerini içeren tablo aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

Tablo 3.18. 25 katlı bina için kütle, rijitlik, kat yükseklik değerleri

Katlar	Katlar için verilen kütle değerleri (kg)	Katlar için verilen rijitlik değerleri (N/m)	Kat Yüksekliği (metre)	Her Katın Yerden Yüksekliği (metre)
1	48500	6850	3	76
2	48500	6850	3	73
3	48500	6850	3	70
4	48500	6850	3	67
5	48500	6850	3	64
6	48500	6850	3	61
7	48500	6850	3	58
8	48500	6850	3	55
9	48500	6850	3	52
10	48500	6850	3	49
11	48500	6850	3	46
12	48500	6850	3	43
13	48500	6850	3	40
14	48500	6850	3	37
15	48500	6850	3	34
16	48500	6850	3	31
17	48500	6850	3	28
18	48500	6850	3	25
19	48500	6850	3	22
20	48500	6850	3	19
21	48500	6850	3	16
22	48500	6850	3	13
23	48500	6850	3	10
24	48500	6850	3	7
25	65000	2900	3	4

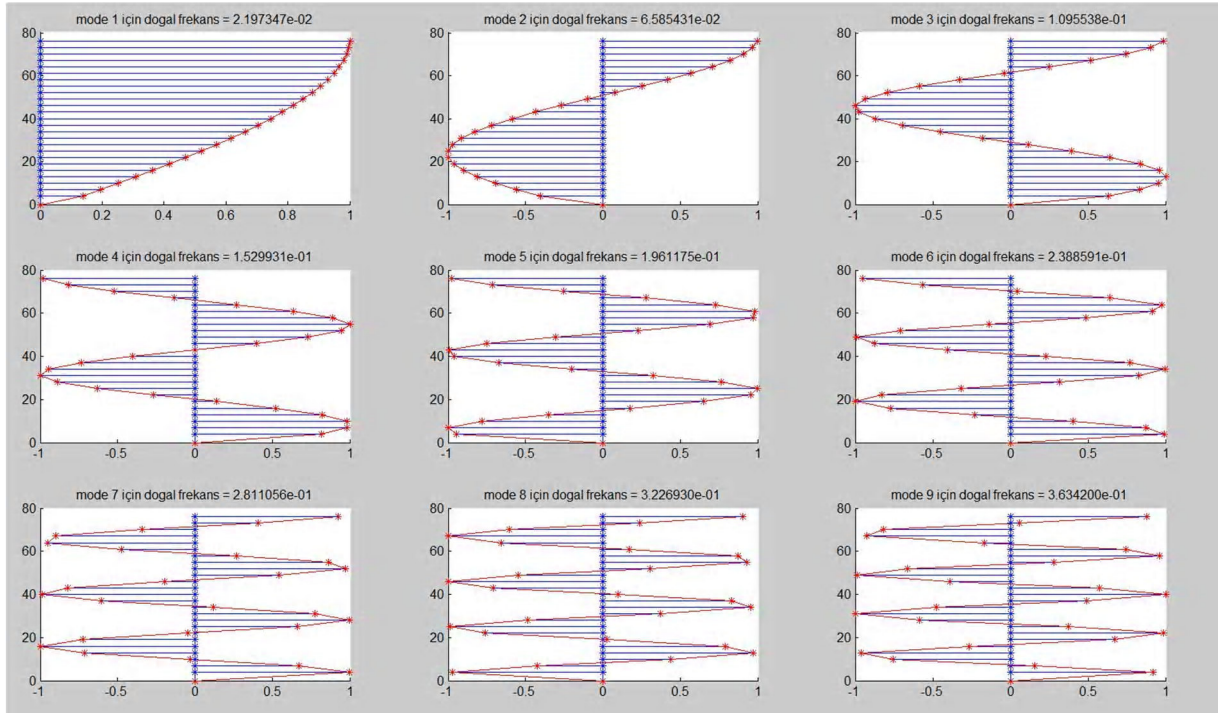
Tablodaki verilere göre Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapı oluşturulmuş ve çözümlemesi yapılmıştır. Sonuç olarak elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmektedir.

Tablo 3.19. Sistemde kullanılan kesitin özellikleri

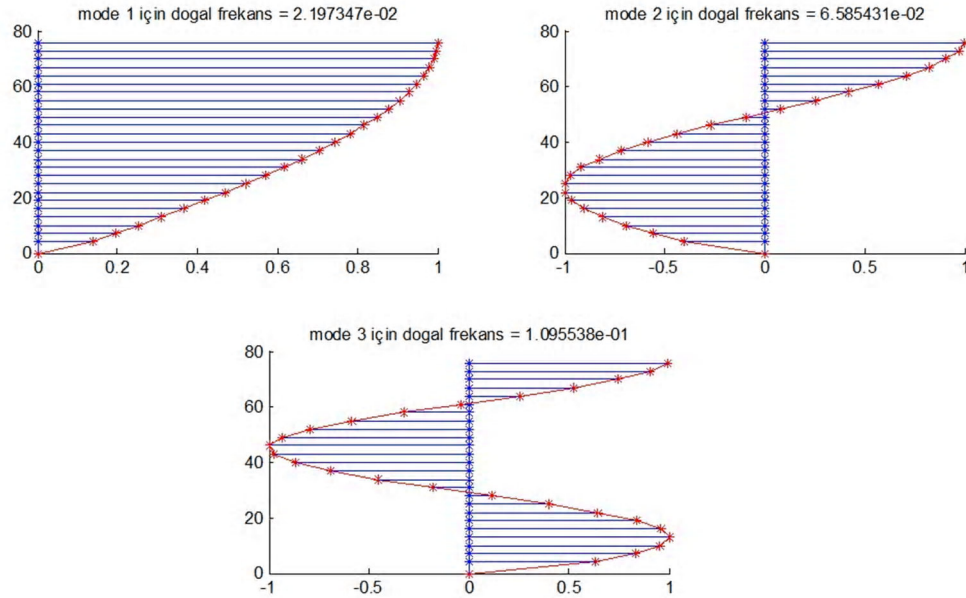
Kesit Özellikleri		Malzeme Özellikleri	
Alan (mm ²)	399,73	E (GPa)	200
I (mm ⁴)	77.111,85	Yoğunluk (kg/m ³)	7700
J (mm ⁴)	154.223,7	J (poisson oranı)	0,3

Tablo 3.20. 25 katlı bina için birinci kat yüksekliği 4 metre ve birinci kat kütlesi 65000kg olduğunda oluşan mod numaraları, doğal frekans ve periyot değerleri

Mod Numarası	Frekans Değerleri (Hz)	Periyot (saniye)
1	0,021973	45,509
2	0,065854	15,185
3	0,109554	9,128
4	0,152993	6,536
5	0,196117	5,099
6	0,238859	4,187
7	0,281106	3,557
8	0,322693	3,099
9	0,363420	2,752
10	0,403069	2,481
11	0,441421	2,265
12	0,478266	2,091
13	0,513408	1,948
14	0,546666	1,829
15	0,577871	1,730
16	0,606872	1,648
17	0,633528	1,578
18	0,657716	1,520
19	0,679322	1,472
20	0,698247	1,432
21	0,714407	1,400
22	0,727728	1,374
23	0,738150	1,355
24	0,745628	1,341
25	0,750128	1,333



Şekil 3.13. Sonlu Elemanlar Metodu ile birinci katı 4 metre olan 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 9 mod şekli



Şekil 3.14. Sonlu Elemanlar Metodu ile birinci katı 4 metre olan 25 Katlı örnek bir bina için elde edilen ilk 3 mod şekli

Günümüze kadar yapılmış olan çeşitli çalışmalarda sensörlerin yapısal sağlık takibi uygulamalarındaki en doğru ölçümü yapmaları ve istenilen mod şekillerini yakalayabilmeleri için gerekli konumları incelenmiştir. Buna göre yüksek katlı yapılarda mod şekillerinin yakalanabilmesi adına yüksek frekansta ortaya çıkan modlar yerine düşük frekansta oluşan ilk 3 mod şekli dikkate alınmıştır. Zira indirgenmiş serbestlik derecesine göre analiz yapılırken eğer örneğimiz için 25. mod şekli yakalanmak isteniliyorsa sensör sayısı yapının şeklini doğru yakalayabilmek adına fazla sayıda kullanılmalıdır. Bahsedilen durum ise ekonomik bir mühendislik çözümü değildir.

Yukarıda yer alan ilk 3 mod şeklini yakalayabilmek için bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonuna göre sensörlerin olası yerleştirilebileceği noktalar yani katlar dikkate alınarak yerleştirilmesi düşünülen sensör sayısına göre bir olasılık hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre örneğin 25 katlı yapımız için 3 adet sensörü yerleştirebileceğimiz toplam 3450 adet ihtimal bulunmaktadır ki burada sensörlerin sıralamasının önemli olmadığı dikkate alınmaktadır. Sonrasında muhtemel sensör konumları üzerinde amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi ölçümlerin elde edileceği sensör konumları bilgisayar ortamında oluşturulan algoritma ile çözümlenerek ortaya konulmuştur. 3 ila 12 sensör kullanıldığında amaç fonksiyonu doğrultusunda elde edilen sensör konumları aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 3.21. 25 katlı örnek yapıya 12 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)											
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	3	7	8	13	14	18	19	22	23	24

Tablo 3.22. 25 katlı örnek yapıya 11 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)										
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	3	7	8	13	14	18	22	23	24

Tablo 3.23. 25 katlı örnek yapıya 10 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)									
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	8	13	14	18	22	23	24

Tablo 3.24. 25 katlı örnek yapıya 9 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)								
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	13	14	18	22	23	24

Tablo 3.25. 25 katlı örnek yapıya 8 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)							
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	7	13	18	22	23	24

Tablo 3.26. 25 katlı örnek yapıya 7 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)						
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	13	18	22	23	24

Tablo 3.27. 25 katlı örnek yapıya 6 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)					
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	13	18	22	23

Tablo 3.28. 25 katlı örnek yapıya 5 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)				
Sensör numarası	1	2	3	4	5
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	18	22	23

Tablo 3.29. 25 katlı örnek yapıya 4 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)			
Sensör numarası	1	2	3	4
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	2	18	22

Tablo 3.30: 25 katlı örnek yapıya 3 adet sensör yerleştirildiğinde sensör dağılımları

Doğrultu	x (yatay)		
Sensör numarası	1	2	3
Kat numarası (yukarıdan aşağıya sıralı)	1	18	22

3.7. 25 Katlı Yapıda Birinci Katın Farklı Yükseklikte Olduğu Durumda Sensör Konumları ve Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Modellenen 25 katlı yapı için birinci kat yüksekliğinin değiştirilmesi durumunda modlarda frekans değişimleri oluşmaktadır. Aşağıda yer alan tabloda görülmektedir ki yapının birinci katının yüksekliği 3m'den 4m'ye çıkartıldığında yapıda oluşan mod şekillerine karşılık gelen frekanslarda değişimler gözlemlenmektedir. Düşük frekansa sahip modlarda yüzde 5'i aşan bir değişim oluşmaktadır. Bununla birlikte mod numaraları artıp frekans değerleri de yükselince birinci kattaki değişimin etkisi azalmakta ve sonuncu moda gelindiğinde de sifıra yakın bir değere ulaşmaktadır. Yapılmış olan çalışmada yapının ilk 3 modu yakalanmak istenildiği için sadece birinci katın kütle, rijitlik ve yüksekliği farklılaştığında olası sensör konumlarında da değişimler ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile modelin hassas ve doğru oluşturulması sensör konumlarını belirleyen amaç fonksiyonunda doğru yaklaşımlarda bulunmasını sağlayacaktır.

Tablo 3.31. 25 katlı bina için oluşan mod numaraları, doğal frekans ve periyot değerleri

A	B	C	D
Mod Sırası	Frekans Değerleri (Hz) H1=4m, H2:25=3m, 25 kat	Frekans Değerleri (Hz) H1:H25=3m, 25 kat	Yüzde Fark (C/B*100)
1	0,021973	0,023147	105,34%
2	0,065854	0,069352	105,31%
3	0,109554	0,115294	105,24%
4	0,152993	0,160799	105,10%
5	0,196117	0,205693	104,88%
6	0,238859	0,249808	104,58%
7	0,281106	0,292975	104,22%
8	0,322693	0,335031	103,82%
9	0,363420	0,375815	103,41%
10	0,403069	0,415174	103,00%
11	0,441421	0,452959	102,61%

12	0,478266	0,489025	102,25%
13	0,513408	0,523236	101,91%
14	0,546666	0,555462	101,61%
15	0,577871	0,585581	101,33%
16	0,606872	0,613479	101,09%
17	0,633528	0,639049	100,87%
18	0,657716	0,662196	100,68%
19	0,679322	0,682830	100,52%
20	0,698247	0,700875	100,38%
21	0,714407	0,716260	100,26%
22	0,727728	0,728929	100,17%
23	0,738150	0,738833	100,09%
24	0,745628	0,745934	100,04%
25	0,750128	0,750205	100,01%

25 katlı yapı için her kat 3 metre olduğunda 6 sensör için olası sensör konumlarına karşılık gelen katlar 1, 2, 13, 17, 21, 22 şeklinde oluşurken aynı yapıda sadece birinci katın yüksekliği 1 metre artırıldığında optimum sensör ölçümlerinin elde edilebileceği kat numaraları 1, 2, 13, 18, 22, 23 şeklinde değişmiştir. Sadece bir katın yüksekliği değiştirildiğinde 2 adet sensörün konumu değişmiştir. Sonuç olarak modellemedeki ve varsayımlardaki doğru tespit ve hesapların bu çalışmada kullanılan yöntemin sağlıklı olmasını doğrudan etkilediği açıktır.

3.8. İki Farklı Rijitlik Değeri İle Elde Edilen Frekans Değerleri

Burada Örnek 1’de modellenen 25 katlı yapı farklı rijitliklere sahip iki ayrı malzeme ve kesit kullanılarak sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir. İki farklı modelde kullanılan rijitlikler arasında fark oluşturularak yapı analiz edilmiştir. İki farklı durum için rijitlik değerleri arasında 10 kat fark olmasına karşın elde edilen frekans değerleri arasında yaklaşık 3,16 katına eşdeğer olarak oluşmuştur.

Tablo 3.32. 25 katlı yapıda farklı rijitlik değerleri ile 25 moda karşılık gelen yapı doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

A	B	C	D
Mod Sırası	Frekans Değerleri (Hz) H1:H25=3m, 25 kat K=685 N/m	Frekans Değerleri (Hz) H1:H25=3m, 25 kat K=6850 N/m	Yüzde Fark (C/B*100)
1	0,007320	0,023147	316%
2	0,021931	0,069352	316%
3	0,036459	0,115294	316%
4	0,050849	0,160799	316%
5	0,065046	0,205693	316%
6	0,078996	0,249808	316%
7	0,092647	0,292975	316%
8	0,105946	0,335031	316%
9	0,118843	0,375815	316%
10	0,131290	0,415174	316%
11	0,143238	0,452959	316%
12	0,154643	0,489025	316%
13	0,165462	0,523236	316%
14	0,175652	0,555462	316%
15	0,185177	0,585581	316%
16	0,193999	0,613479	316%
17	0,202085	0,639049	316%
18	0,209405	0,662196	316%
19	0,215930	0,682830	316%
20	0,221636	0,700875	316%
21	0,226501	0,716260	316%
22	0,230508	0,728929	316%
23	0,233639	0,738833	316%
24	0,235885	0,745934	316%
25	0,237236	0,750205	316%

Buradaki karşılaştırmadan çıkacak sonuç yine modellemedeki ve varsayımlardaki hataların sonucu doğrudan etkilediğidir. Çalışma kapsamında sağlıklı bir modelleme ve sonucunda da karşılık gelen optimum sensör konumları elde edilmek isteniliyorsa yapının bütün özellikleri doğru bir şekilde modele işlenmelidir.

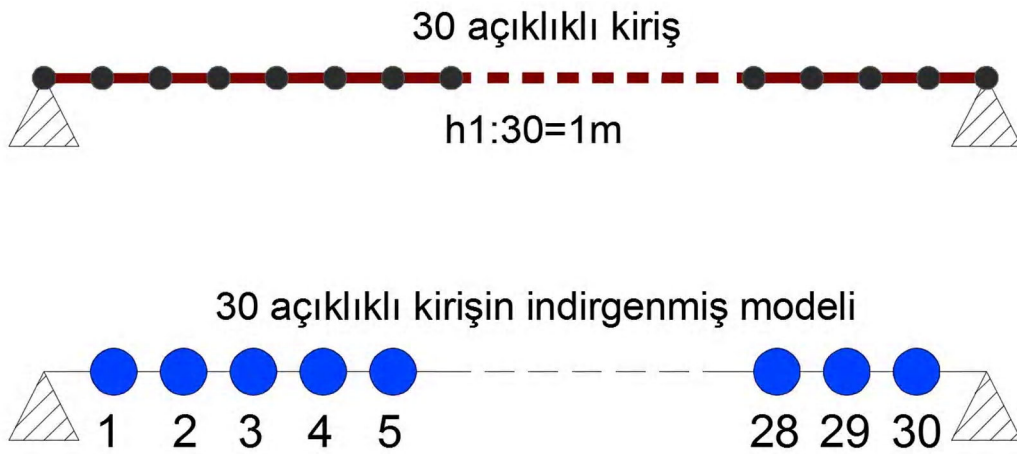
3.9. Örnek Uygulama 3 - (30 Açıklıklı Kiriş (Açıklıklar 100 cm)):

Burada 30 açıklığa sahip bir kiriş modeli incelenecektir. Matlab ortamında yazılan algoritma ile kiriş meydana getirilecektir. İncelenen kirişin 1. noktasında ve 31.

noktasında mesnet olduğu modele işlenmiş ve bu noktadaki serbestlikler kısıtlanmıştır.

Tablo 3.33. Yapısal sistemi tanımlarken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri

Kesit Özellikleri		Malzeme Özellikleri	
Alan (mm ²)	399,73	E (GPa)	200
I (mm ⁴)	77.111,85	Yoğunluk (kg/m ³)	7850
J (mm ⁴)	154.223,7	J (poisson oranı)	0,3



Şekil 3.15. 30 açıklığa sahip kirişin indirgenmiş modeli

Yukarıdaki şekilde görülen sistem indirgenerek aşağıdaki sistem oluşturulmuştur. Sistem modellenirken ise aşağıdaki tabloda yer alan malzeme ve kesit özellikleri kullanılmıştır.

Tablo 3.34. 30 açıklıklı kiriş için kütle ve rijitlik yükseklik değerleri

Kiriş Elemanları	Katlar için verilen kütle değerleri (kg)	Çubuklar için verilen rijitlik değerleri (N/m)	Eleman uzunlukları (metre)	Her elemanın sağ tarafının Y eksenine uzaklığı (metre)
30	3,5	6850	1	30
29	3,5	6850	1	29
28	3,5	6850	1	28
27	3,5	6850	1	27
26	3,5	6850	1	26
25	3,5	6850	1	25
24	3,5	6850	1	24

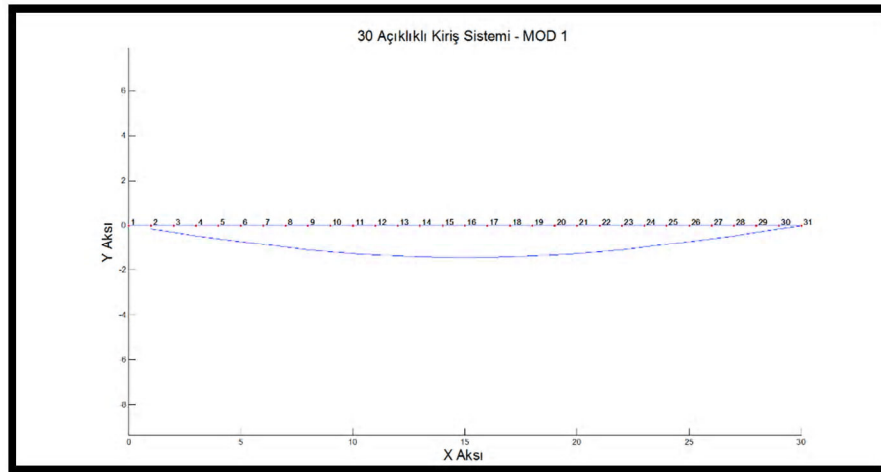
23	3,5	6850	1	23
22	3,5	6850	1	22
21	3,5	6850	1	21
20	3,5	6850	1	20
19	3,5	6850	1	19
18	3,5	6850	1	18
17	3,5	6850	1	17
16	3,5	6850	1	16
15	3,5	6850	1	15
14	3,5	6850	1	14
13	3,5	6850	1	13
12	3,5	6850	1	12
11	3,5	6850	1	11
10	3,5	6850	1	10
9	3,5	6850	1	9
8	3,5	6850	1	8
7	3,5	6850	1	7
6	3,5	6850	1	6
5	3,5	6850	1	5
4	3,5	6850	1	4
3	3,5	6850	1	3
2	3,5	6850	1	2
1	3,5	6850	1	1

Geliştirilen algoritma kullanılarak yapılan analiz sonucunda ilk 3 mod şekli elde edilir. Ayrıca 30 elemanlı kirişin oluşturduğu 30 adet mod şekline karşılık gelen frekans değerleri aşağıda yer almaktadır..

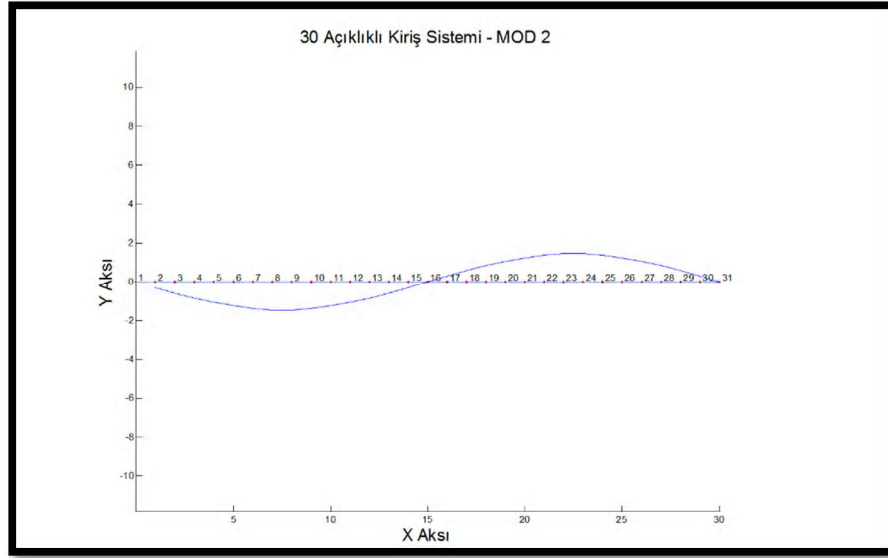
Tablo 3.35. 30 açıklıklı kiriş için oluşan 30 adet doğal frekans ve karşılık gelen periyot değerleri

Mod Numarası	Frekans Değerleri (Hz)	Periyot (saniye)
1	4,05	0,247
2	8,10	0,123
3	12,17	0,082
4	16,25	0,062
5	20,36	0,049
6	24,50	0,041
7	28,67	0,035
8	32,87	0,030
9	37,12	0,027
10	41,40	0,024

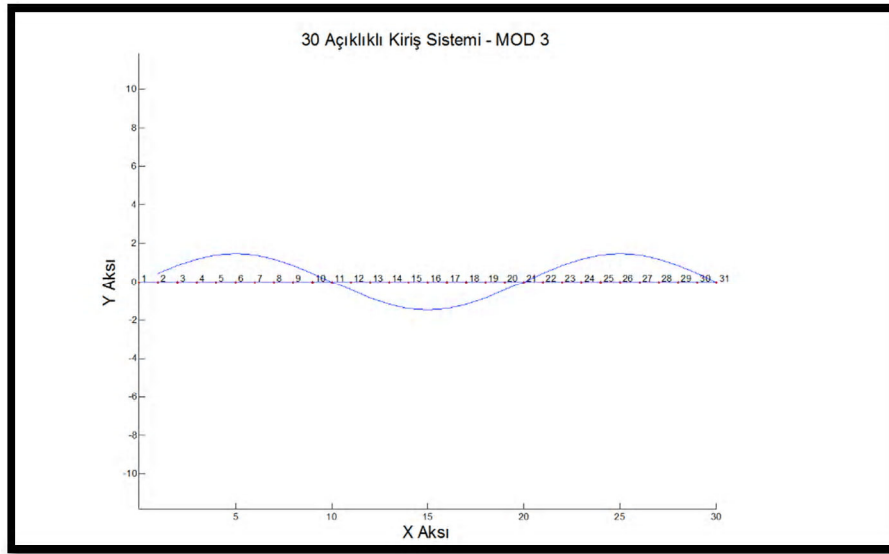
11	45,74	0,022
12	50,11	0,020
13	54,52	0,018
14	58,96	0,017
15	63,42	0,016
16	67,89	0,015
17	72,35	0,014
18	76,78	0,013
19	81,15	0,012
20	85,42	0,012
21	89,54	0,011
22	93,47	0,011
23	97,16	0,010
24	100,53	0,010
25	103,53	0,010
26	106,09	0,009
27	108,16	0,009
28	109,68	0,009
29	110,61	0,009
30	1391,43	0,001



Şekil 3.16. 30 Açıklıklı Kiriş için elde edilen birinci mod şekli



Şekil 3.17. 30 Açıklıklı Kiriş için elde edilen ikinci mod şekli



Şekil 3.18. 30 Açıklıklı Kiriş için elde edilen üçüncü mod şekli

İlk 3 mod şeklini yakalayabilmek için tanımlanan amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonuna göre sensörlerin olası yerleştirilebileceği noktalar yani düğüm noktaları dikkate alınarak yerleştirilmesi düşünülen sensör sayısına göre bir olasılık hesabı yapılmıştır. Basit bir hesaplama 30 açıklığa sahip kiriş için 3 adet sensörün yerleştirebileceği toplam 4495 adet ihtimal bulunmaktadır ki burada sensörlerin sıralamasının önemli olmadığı dikkate alınmıştır. Sonrasında muhtemel sensör konumları üzerinde amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyi ölçümü yapabilecek olan

sensör konumları bilgisayar ortamında oluşturulan algoritma ile çözümlenerek ortaya konulmuştur. 3 ila 12 sensör kullanıldığında amaç fonksiyonu doğrultusunda elde edilen sensör konumları aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 3.36. 30 açıklıklı örnek giriş için 12 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)											
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Düğüm numarası	3	4	5	9	10	15	20	21	23	25	26	27

Tablo 3.37. 30 açıklıklı örnek giriş için 11 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)										
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Düğüm numarası	3	4	5	9	10	15	21	23	25	26	27

Tablo 3.38. 30 açıklıklı örnek giriş için 10 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)									
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Düğüm numarası	4	5	9	10	15	21	23	25	26	27

Tablo 3.39. 30 açıklıklı örnek giriş için 9 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)								
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Düğüm numarası	4	5	9	15	21	23	25	26	27

Tablo 3.40. 30 açıklıklı örnek giriş için 8 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)							
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Düğüm numarası	4	5	9	15	23	25	26	27

Tablo 3.41. 30 açıklıklı örnek giriş için 7 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)						
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7
Düğüm numarası	4	5	9	15	23	25	26

Tablo 3.42. 30 açıklıklı örnek giriş için 6 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)					
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6
Düğüm numarası	4	5	15	23	25	26

Tablo 3.43. 30 açıklıklı örnek kiriş için 5 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)				
Sensör numarası	1	2	3	4	5
Düğüm numarası	4	5	15	23	26

Tablo 3.44. 30 açıklıklı örnek kiriş için 4 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)			
Sensör numarası	1	2	3	4
Düğüm numarası	5	15	23	26

Tablo 3.45. 30 açıklıklı örnek kiriş için 3 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x (yatay)		
Sensör numarası	1	2	3
Düğüm numarası	5	15	23

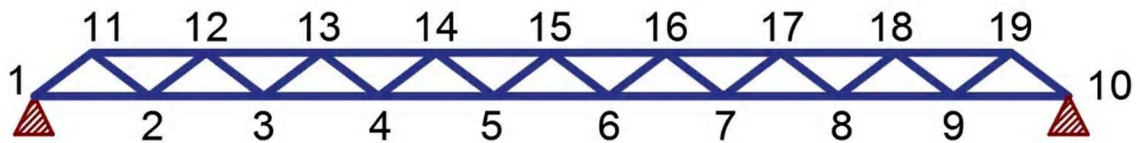
3.10. Örnek Uygulama 4 – İki Boyutlu Kafes Sistemi:

Burada 35 adet eleman kullanılarak modellenmiş olan 2 boyutlu kafes sistemi sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilecek ve mod şekilleri hesaplanacaktır. Bu kafes sistemde serbestlikler x ve y doğrultularında serbest bırakılmıştır. Sadece sağ ve sol uçta yer alan mesnetlerde serbestlik kaldırılmıştır. Matlab ortamında yazılan algoritma ile kafes sistem aşağıdaki tabloda yer alan malzeme, kesit ve düğüm noktası özellikleri kullanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 3.46. Yapısal sistemi tanımlarken kullanılan malzeme ve kesit özellikleri

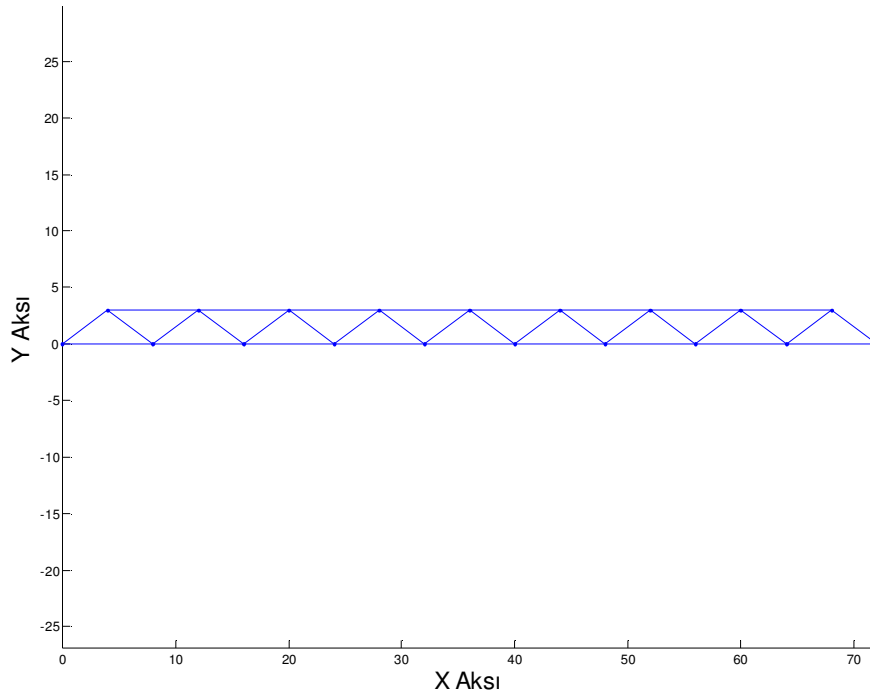
Kesit Özellikleri		Malzeme Özellikleri	
Alan (mm ²)	399,73	E (GPa)	200
J (poisson oranı)	0,3	Yoğunluk (kg/m ³)	7850

Oluşturulan kafes sistemde yer alan düğüm noktalarına karşılık gelen numaralar ve elemanlar ise aşağıda gösterilmektedir.

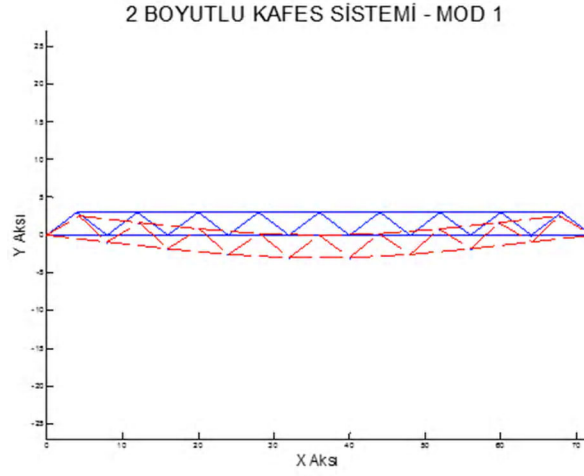
**Şekil 3.19.** 2 boyutlu kafes sistem elemanları ve düğüm numaraları

Yapılan analizler neticesinde 2 boyutlu kafes sistem için ilk 3 mod şekli elde edilmiştir. Oluşan mod şekillerinin görselleri ise aşağıda yer almaktadır. Bu mod şekilleri normalize edilip matris haline dönüştürülmektedir. Ayrıca Matlab ortamında geliştirilen optimum sensör yerleşimi algoritmasında da olası sensör konumları hesaplanmaktadır. Burada sensörlerin sadece 19 adet düğüm noktasına yerleştirileceği dikkate alınmıştır. Örneğin 19 adet düğüm noktası konumuna 3 adet sensörün yerleşebileceği toplamda 969 adet farklı seçenek vardır. Ancak sensör sayısı 10 adet olarak dikkate alındığında ve sensörlerin sıralamasının önemi olmadan olası sensör konumları hesaplandığında ise toplamda 92378 adet farklı seçenek olduğu görülmektedir. Burada her farklı seçenek için sensör konumlarına karşılık gelen tepki genlikleri amaç fonksiyonu doğrultusunda toplanarak her konum için bir değer oluşturulmaktadır. Sonuç olarak ise bu değerler kıyaslanarak optimum sensör yerleşimi elde edilmeye çalışılmaktadır. 19 adet düğüm noktasına 3'ten 12'ye kadar farklı sayılarda sensör yerleştirildiğinde farklı sayıdaki sensörler için olası en iyi konumlar hesaplanarak aşağıda tablolar halinde verilmektedir.

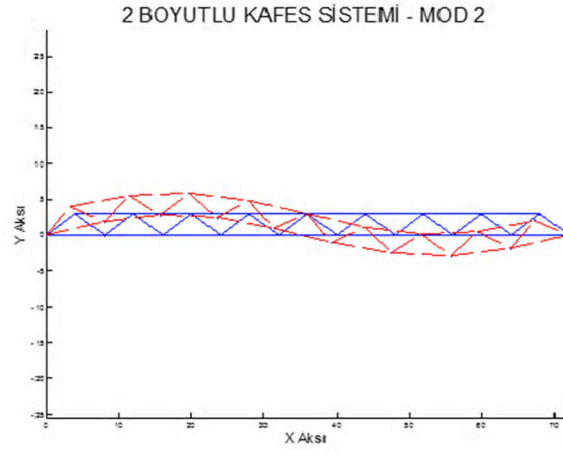
2 BOYUTLU KAFES SİSTEMİ



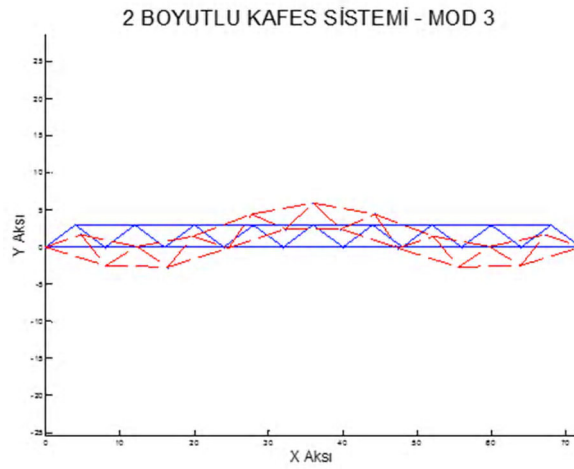
Şekil 3.20. 2 boyutlu ve 35 elemanlı kafes sistem



Şekil 3.21. 2 Boyutlu Kafes için ilk mod şekli



Şekil 3.22. 2 Boyutlu Kafes için ikinci mod şekli



Şekil 3.23. 2 Boyutlu Kafes için üçüncü mod şekli

Tablo 3.47. 2 Boyut Kafes Sistemde 10 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)									
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Düğüm numarası	2	5	6	8	9	12	14	15	16	18

Tablo 3.48. 2 Boyut Kafes Sistemde 9 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)								
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Düğüm numarası	2	6	8	9	12	14	15	16	18

Tablo 3.49. 2 Boyut Kafes Sistemde 8 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)							
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Düğüm numarası	2	8	9	12	14	15	16	18

Tablo 3.50. 2 Boyut Kafes Sistemde 7 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)						
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6	7
Düğüm numarası	2	8	12	14	15	16	18

Tablo 3.51. 2 Boyut Kafes Sistemde 6 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)					
Sensör numarası	1	2	3	4	5	6
Düğüm numarası	8	12	14	15	16	18

Tablo 3.52. 2 Boyut Kafes Sistemde 5 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)				
Sensör numarası	1	2	3	4	5
Düğüm numarası	8	12	15	16	18

Tablo 3.53. 2 Boyut Kafes Sistemde 4 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)			
Sensör numarası	1	2	3	4
Düğüm numarası	8	12	15	18

Tablo 3.54. 2 Boyut Kafes Sistemde 3 adet sensörün dağılımı

Doğrultu	x ve y (yatay ve dikey)		
Sensör numarası	1	2	3
Düğüm numarası	8	12	15

Matlab ortamında oluşturulan algoritma kafes sistemi için optimum sensör yerleşimini çözümlenmiştir. Burada hem x hem de y doğrultusunda sensör yerleşimi için arama yapılmıştır. Ancak x doğrultusunda modlardaki genlikler çok düşük olduğu için bütün sensörlerin y doğrultusuna yerleştirilmesi gerektiği sonucu çıkmıştır. 3 sensör için görülmektedir ki birinci sensör ikinci mod şeklindeki maksimum genliği, ikinci sensör üçüncü mod şeklindeki maksimum genliği ve üçüncü sensör ise birinci mod şeklindeki maksimum genliği yakalamaktadır.

4. BÖLÜM:

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada olası sensör konumları, yapının mod şekli sırasında sahip olduğu genliği ve enerjiyi amaç fonksiyonu olarak kullanarak elde edilmeye çalışılmıştır. Elbette yüksek frekansa sahip bütün mod şekilleri detaylı olarak elde edilmek isteniliyorsa kullanılması gereken sensör sayısı en az serbestlik derecesi kadar olmalıdır. Çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji sonlu arama metodu ile optimum sonucu bulmaktadır. Yapı modellerinin analizinde düşük frekansta oluşan ilk 3 mod incelenmiştir. Sensörlerin yerleştirilebileceği olası bütün konumlar çalışma kapsamında oluşturulan algoritma ile hesaplanarak kaydedilmiş ve sonrasında da her lokasyon için modlara karşılık gelen enerji değerleri yani normalizasyon sonrası tepki genlikleri dikkate alınarak sıralamaya sokulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ise yapısal sağlık takibinde kullanılan sensörlerin belirli bir gürültü seviyesinde veri kaydı yapmalarıdır. Eğer her mod için ölçülen enerji değerlerinden en yüksekleri dikkate alınırsa sensör gürültüsünün elde edilen sinyale oranı düşük olacaktır. Gürültünün sinyale oranının düşük olması da hesaplamaların doğruya yakın yapılabilmesi açısından önemlidir. Elbette bu aşamada hesaplama yoğunluğu özellikle serbestlik derecesi fazla olan yapılarda aşırı düzeylere çıkabilmektedir. Hesaplama sürelerinin azaltılabilmesi için ise yapı modeli oluşturulurken model indirgenerek hesaplamalar yapılabilir. Model indirgemesi önem arz etmektedir ki gerçek yapılar dikkate alındığında elde edilen sinyal verileri ve buna karşılık yapının dinamik hareketleri çok daha karmaşık olabilmekte ve veri hesaplama yoğunluğu ileri düzeye çıkmaktadır. Buna karşılık çalışma kapsamında model indirgendiğinde ortaya çıkan yapı ile indirgenmemiş yapının modları karşılaştırılmış ve ilk 3 modun birbirini büyük ölçüde karşıladığı sonucuna varılmıştır.

Analitik modellerin ve tahmin metodolojilerinin doğruluğunun değerlendirilmesi karmaşıktır ve sonraki kullanım modeline ve tahmin metodolojisine oldukça bağlıdır.

Modellerin ve tahmin yöntemlerinin hiyerarşik kullanımı, modelleme hatalarını ve girdi belirsizliklerini bir araya getirerek ilave bir zorluk derecesi getirir.

Genel olarak, hiyerarşik bir metodoloji içerisinde varsayım ve gözlem arasındaki küçük kabul edilebilir farklılıkların, yüksek seviyelerde varsayım ve gözlem arasında kabul edilemez şekilde büyük farklılıklar oluşturabileceği sonucuna varılabilir. Dolayısı ile sonlu elemanlar analizi yapılırken modelleme veya metodoloji oluşturma aşamalarında küçük olarak düşünülen sayısal farklılıklar, yapı modelinde büyük hatalara yol açabilmekte ve sensör yerleşimi performans tahmin seviyesinde de istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan algoritma ile mod seviyelerini yakalayabilecek uygun sensör konumları başarılı olarak elde edilebilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Bart Peeters, G. D. (2001). Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 659-666.
2. Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B., Şahin, A., & Özcan, D. M. (2010). Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. **İMO Teknik Dergi**.
3. Begg, R. D., Mackenzie, A. C., Dodds, C. J., & Loland, O. (1976). Structural Integrity Monitoring Using Digital Processing Of Vibration Signals. **Proceedings of 8th Annual Offshore Technology Conference**, (s. 305-311). Houston TX.
4. Billie F. SPENCER Jr., M. R.-S. (2004). Smart Sensing Technology For Structural Health Monitoring. **13th World Conference on Earthquake Engineering (s. 1-13)**. Vancouver, B.C., Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering.
5. Bochner, S., & Chandrasekharan, K. (1949). Fourier Transforms. **Princeton University Press**.
6. Caicedo, J. (2011). Practical Guidelines For The Natural Excitation Technique (Next) And The Eigensystem Realization Algorithm (Era) For Modal Identification Using Ambient Vibration. **Dynamic Testing of Civil Engineering Structures Series, 52-58**.
7. Chang, M., & Pakzad, S. N. (2015). Optimal sensor configuration for flexible structures with multi-dimensional mode shapes. **Smart Materials and Structures**.
8. Cooley, J., & Tukey, J. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. **Mathe. Comput.**, 297–301.
9. David, E. (2000). Modal Testing: Theory, Practice and Application. **Baldock: Research Studies Press LTD, 2nd edition**.

10. Doebling, S., Farrar, C., & Prime, M. (1999). A summary review of vibration-based damage identification techniques. **Shock and Vibration Digest** **205**, 631-645.
11. Flynn, E. B., & Todd, M. D. (2010). A Bayesian approach to optimal sensor placement for structural health monitoring with application to active sensing. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 891-903.
12. Friswell, M., & Mottershead, J. (1995). Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. **London: Kluwer Academic Publishers.**
13. Gardner-Morse, M. G., & Huston, D. R. (1993). Modal Identification Of Cable Stayed Pedestrian Bridge. **Journal of Structural Engineering.**
14. Giraldo, D. S. (2009). Modal Identification through Ambient Vibration: Comparative Study. **Journal of Engineering Mechanics** **135(8)**, 759–770.
15. Harshita, M., Sakthieswaran, N., Brintha, G., & Babu, O. (2016). Optimal Sensor Placement Techniques in Structural Health Monitoring Using Various Optimization Criteria. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET).**
16. Heideman, M. T., Johnson, D. H., & Burrus, S. (1984). Gauss and the History of the Fast Fourier Transform. **IEEE ASSP Magazine.**
17. Inaudi, D., Bolster, M., Deblois, R., French, C., Phipps, A., Sebasky, J., & Western, K. (2009). Structural Health Monitoring System for the new I-35W St Anthony Falls Bridge. **Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4).** Zurich, Switzerland.
18. James, G. H., Carne, T. G., Lauffer, J. P., & Nord, A. R. (1992). Modal testing using natural excitation. **Proceedings of 10th Int. Modal Analysis Conference.** San Diego, CA.
19. Juang, J.-N., & Pappa, R. S. (1986). Effects of Noise on Modal Parameters Identified by the Eigensystem Realization Algorithm. **Journal of Guidance Control and Dynamics.**

20. Kammer, D. C. (1991). Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 14, No. 2, 251-259.**
21. Kekare, A., Huddedar, P., & Bagde, R. (May - Jun. 2014). Bridge Health Monitoring System. **IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), 08-14.**
22. Maia, N., & Silva, J. M. (1997). Theoretical and Experimental Modal Analysis. **Taunton: Research Studies Press LTD.**
23. Melchers, R. (1999). Structural Reliability Analysis and Prediction. **Chichester: John Wiley & Sons, 2nd edition.**
24. MOOR, P. V. (1996). **Subspace Identification for Linear Systems.** Belgium: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
25. Papadimitriou, C. (2004). Optimal sensor placement methodology for parametric identification of structural systems. **Journal of Sound and Vibration, 923-947.**
26. Papadimitriou, C., & Lombaert, G. (2012). The effect of prediction error correlation on optimal sensor placement in structural dynamics. **Mechanical Systems and Signal Processing, 105-127.**
27. Rao, A. R., & Anandakumar, G. (2007). Optimal placement of sensors for structural system identification and health monitoring using a hybrid swarm intelligence technique. **Smart Materials and Structures.**
28. Simon, G., Maroti, M., & Ledecz, A. (2004). Sensor Network-Based Countersniper System. **Proceedings of SenSys.** Baltimore.
29. Sun, H., & Büyüköztürk, O. (2015). Optimal sensor placement in structural health monitoring using discrete optimization. **Smart Materials and Structures.**
30. Vachtsevanos, G., & Zhang, G. (March 2007). A methodology for optimum sensor localization/selection in fault diagnosis. **IEEE Aerospace Conference, (s. 1-8).** Montana, USA.

31. Worden, K., & Burrows, A. (2001). Optimal sensor placement for fault detection. **Engineering Structures**, 23, 885-901. .
32. Yi, T. H., Li, H. N., & Zhang, X. D. (2015). Health monitoring sensor placement optimization for Canton Tower using immune monkey algorithm. **Structural Control and Health Monitoring**, 22:123–138.
33. Yi, T.-H., & Hong-Nan, L. (2012). Methodology Developments in Sensor Placement for Health Monitoring of Civil Infrastructures. **International Journal of Distributed Sensor Networks**.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: NURULLAH TOPKARAOĞLU

Uyruğu: TÜRKİYE

Doğum Tarihi ve Yeri: 31 Ağustos 1982, Batı Almanya

Medeni Durumu: Evli

Tel: +90 507 357 41 70

email: ntopkaraoglu@gmail.com

Yazışma Adresi: Barbaros Mh. 3304. Sk. No:21/47 Kocasinan/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Boğaziçi Üniversitesi	2006
Lise	Konya Meram Fen Lisesi	2000

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2006- 2007	Çevikler İnşaat	İnşaat Mühendisi
2007- 2008	Enka İnşaat	İnşaat Mühendisi
2008- 2009	İlci İnşaat	İnşaat Mühendisi
2010- 2011	Uzunlar İnşaat	İnşaat Mühendisi
2011- Halen	Orta Anadolu Kalkınma Ajansı	Uzman

YABANCI DİL

İngilizce