

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

JAYA ALGORİTMASI KULLANARAK KÖPRÜ TÜRÜ YAPILARDA
YAPI SAĞLIĞI İZLENMESİNDE OPTİMAL SENSÖR SAYISI VE
KONUMUNUN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya AKSOY

MAYIS 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**JAYA ALGORİTMASI KULLANARAK KÖPRÜ TÜRÜ YAPILARDA
YAPI SAĞLIĞI İZLENMESİNDE OPTİMAL SENSÖR SAYISI VE
KONUMUNUN BELİRLENMESİ**

Hülya AKSOY

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 04 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 28 / 05 / 2025

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Barbaros ATMACA

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Jaya Algoritması Kullanarak Köprü Türü Yapılarda Yapı Sağlığı İzlenmesinde Optimal Sensör Sayısı ve Konumunun Belirlenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

İlk olarak çalıştığım alanı bana önererek bu konu hakkında gelişmemi sağladığı ve tez çalışması sürecinde tecrübeleri veengin bilgileri ile her türlü yardımda bulunduğu için danışman hocam Sayın Doç. Dr. Barbaros ATMACA’ya teşekkürü bir borç bilirim. Diğer bir kıymetli hocam, değerli zamanını ve emeğini harcayarak tezime büyük katkıları bulunan saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Tayfun DEDE’ye ve bana desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sürecinde ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşım Öğr. Gör. Büşra YAKAK’a teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her anımda ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Ayşe AKSOY’a, her zaman yanımda olan nişanlım Koray PİR’e, kıymetli ablalarıma ve abilerime teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Hülya AKSOY

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Jaya Algoritması Kullanarak Köprü Türü Yapılarda Yapı Sağlığı İzlenmesinde Optimal Sensör Sayısı ve Konumunun Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Barbaros ATMACA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/05/2025

Hülya AKSOY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yapı Sağlığı İzleme Sistemi	2
1.2.1. Ön Değerlendirme	3
1.2.2. Veri Toplama ve İletme	4
1.2.3. Veri Depolama ve Sonuç Analizi.....	4
1.3. Optimum Sensör Yerleşiminin Önemi	5
1.4. Sensör Konumu Belirleme Yöntemleri	6
1.4.1. Etkin Bağımsızlık Yöntemi.....	6
1.4.2. Modal Kinetik Enerji Yöntemi	7
1.4.3. Sürüş Noktası Kalıntı Yöntemi	8
1.4.4. QR Ayrıştırma Yöntemi.....	8
1.4.5. Frekans Etkili Bağımsızlık Yöntemi.....	8
1.4.6. Modal Güvence Kriteri	9
1.5. Teorik Modal Analiz	10
1.5.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	10
1.5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	12
1.6. Kafes Sistemlerin Modal Analizi	15
1.6.1. Düzlem Kafes Eleman İçin Rijitlik ve Kütle Matrisleri	16
1.6.2. Koordinatların Dönüşümü.....	17
1.7. Jaya Algoritması.....	18
1.8. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	21

1.9. Tezin Amacı	28
1.10. Tezin Kapsamı.....	30
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	32
2.1. Amaç Fonksiyonları	34
2.2. Optimum Sensör Yerleşimi Çözüm Formülasyonu	36
2.3. Tercih Edilen Modellerin Yapısal Nitelikleri.....	37
2.3.1. 17 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü Modeli.....	37
2.3.2. 77 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü Modeli.....	38
2.3.3. 396 Elemanlı Üç Boyutlu Çelik Kafes Köprü Modeli.....	40
2.4. Seçilen Örneklerin Sonlu Elemanlar Modeli.....	41
2.4.1. 77 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü'nün Sonlu Elemanlar Modeli	41
2.4.2. 396 Elemanlı Üç Boyutlu Çelik Kafes Köprü'nün Sonlu Elemanlar Modeli.....	42
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
3.1. 17 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü.....	44
3.2. 77 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü.....	52
3.3. 396 Elemanlı Üç Boyutlu Çelik Kafes Köprü.....	62
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
5. KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

JAYA ALGORİTMASI KULLANARAK KÖPRÜ TÜRÜ YAPILARDA YAPI SAĞLIĞI İZLENMESİNDE OPTİMAL SENSÖR SAYISI VE KONUMUNUN BELİRLENMESİ

Hülya AKSOY

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Barbaros ATMACA
2025, 84 Sayfa

Ulaşımın önemli bir parçası olan köprülerin güvenliğini sağlamak için yapı sağlığı izleme (YSİ) yöntemi geliştirilmiş olup, bu yöntem dinamik parametrelerdeki değişimi izleyerek olası hasarların erken tespitini sağlamaktadır. Tahribatsız bir kontrol yöntemi olan YSİ, köprülerin ulaşımı aksatmadan sürekli izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu tez çalışmasında, köprü türü yapılarda YSİ sistemlerinin etkinliğini artırmak amacıyla optimum sensör sayısı ve konumlarının belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sensörlerin doğru sayıda ve konumda yerleştirilmesi hem izleme doğruluğunu artırmak hem de maliyet ve veri yoğunluğunu optimize etmek açısından kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, optimum sensör sayısı ve konumlarının belirlenmesi sağlayan, MATLAB programı ile SAP2000-OAPI özelliklerinin ve Jaya algoritmasının etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Modal güvence kriterinden türetilen mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC yöntemleri, amaç fonksiyonları olarak optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Oluşturulan programın etkinliğini göstermek için 17 ve 77 elemanlı iki boyutlu çelik kafes köprü modeli ile 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modelleri üzerinde sensör yerleşim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak seçilen köprü modellerinden elde edilen sonuçlardan sensör sayısının artmasının doğruluğunu artırdığı ama belli bir noktadan sonra katkısının azaldığı ve oluşturulan program ile en iyi performans veren optimum sensör yerleşiminin (OSY) gerçekleştirilebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: OSY, YSİ, Köprüler, Sensörler, Jaya Algoritması, Modal Analiz

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF OPTIMAL SENSOR NUMBER AND PLACEMENT IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BRIDGE-TYPE STRUCTURES USING THE JAYA ALGORITHM

Hülya AKSOY

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Doç. Dr. Barbaros ATMACA
2025, 84 Pages

In order to ensure the safety of bridges, a structural health monitoring (SHM) method has been developed, and this method provides early detection of possible damages by monitoring the changes in dynamic parameters. SHM, which is a non-destructive control method, allows continuous monitoring of bridges without disrupting transportation. In this thesis, a study was carried out on determining the optimum number and locations of sensors in order to increase the effectiveness of SHM systems in bridge-type structures. Placing the sensors in the correct number and location is of critical importance both in terms of increasing monitoring accuracy and optimizing cost and data density. In this direction, a computer program was created that allows determining the optimum number and locations of sensors, in which SAP2000-OAPI features and Jaya algorithm work effectively with MATLAB program. The mak-MAC, ort-MAC and rms-MAC methods derived from the modal assurance criterion were used as objective functions in the optimization process. In order to demonstrate the effectiveness of the created program, sensor placement optimization was performed on 17 and 77 element two-dimensional and 396 element three-dimensional steel truss bridge models. As an example, it was observed from the results obtained from the selected bridge models that it increased the sensor accuracy but after a certain point it decreased its contribution and increased the cost. With the created program, the optimum sensor placement (OSP) that gave the best performance was realized.

Key Words: OSP, SHM, Bridges, Sensors, Jaya Algorithm, Modal Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. YSİ sisteminin akış şeması.....	3
Şekil 2. (a) TSD sistemin analitik modeli, (b) serbest cisim diyagramı.....	11
Şekil 3. ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşim analitik modeli	13
Şekil 4. Düğüm noktaları yer değiştirmelerini ve kuvvetlerini gösteren bir düzlem kafes sistemin elemanı	16
Şekil 5. Jaya algoritması akış diyagramı	20
Şekil 6. Oluşturulan programın çalışma akışı.....	33
Şekil 7. 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü modeli.....	37
Şekil 8. 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü modeli.....	38
Şekil 9. 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modeli.....	40
Şekil 10. 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sonlu elemanlar modeli	41
Şekil 11. 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü sonlu elemanlar modeli	43
Şekil 12. Farklı sensör sayılarında (a) mak-MAC değerinin değişimi, (b) ort-MAC değerinin değişimi ve (c) rms-MAC değerinin değişimi.....	45
Şekil 13. mak-MAC yöntemi ile yerleştirilen sensör konumları.....	48
Şekil 14. ort-MAC yöntemi ile yerleştirilen sensör konumları	49
Şekil 15. rms-MAC yöntemi ile yerleştirilen sensör konumları.....	50
Şekil 16. 77 elemanlı çelik köprünün sensör sayısının belirlenmesi.....	53
Şekil 17. 77 elemanlı çelik köprünün (a) mak-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları.....	54
Şekil 18. 77 elemanlı çelik köprünün optimum mak-MAC değeri	55
Şekil 19. 77 elemanlı çelik köprüsünde, mak-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları.....	55
Şekil 20. 77 elemanlı çelik köprünün (a) ort-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları.....	56
Şekil 21. 77 elemanlı çelik köprünün optimum ort-MAC değeri.....	57
Şekil 22. 77 elemanlı çelik köprüde, ort-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları.....	58
Şekil 23. 77 elemanlı çelik köprünün (a) rms-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları.....	59
Şekil 24. 77 elemanlı çelik köprünün optimum rms-MAC değeri	60

Şekil 25. 77 elemanlı çelik köprüsünde, rms-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları.....	60
Şekil 26. Seçilen 16 moda ait mod şekilleri	64
Şekil 27. 396 elemanlı çelik köprünün sensör sayısının belirlenmesi.....	66
Şekil 28. 396 elemanlı çelik köprünün (a) mak-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları.....	67
Şekil 29. 396 elemanlı çelik köprünün optimum mak-MAC değeri	67
Şekil 30. 396 elemanlı çelik köprüde, mak-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları.....	68
Şekil 31. 396 elemanlı çelik köprünün (a) ort-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) Tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları.....	69
Şekil 32. 396 elemanlı çelik köprünün optimum ort-MAC değeri.....	70
Şekil 33. 396 elemanlı çelik köprüde, ort-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları.....	71
Şekil 34. 396 elemanlı çelik köprünün (a) rms-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları.....	72
Şekil 35. 396 elemanlı çelik köprünün optimum rms-MAC değeri	73
Şekil 36. 396 elemanlı çelik köprüde, rms-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları.....	74

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminde kullanılan profiller.....	39
Tablo 2. 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü sisteminde kullanılan profiller	41
Tablo 3. 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminin sensör konumları.....	51
Tablo 4. 77 elemanlı çelik köprüde analiz sonucunda elde edilen mak-MAC değerleri.....	56
Tablo 5. 77 elemanlı çelik köprüde analiz sonucunda elde edilen ort-MAC değerleri	58
Tablo 6. 77 elemanlı çelik köprüsünde analiz sonucunda elde edilen rms-MAC değerleri.....	61
Tablo 7. 77 elemanlı çelik köprü sistemi için elde edilen optimum sensör konumları	61
Tablo 8. Seçilen ana modlar ve modal kütle katılım oranları.....	63
Tablo 9. 396 elemanlı çelik köprünün analiz sonucunda elde edilen mak-MAC değerleri.....	69
Tablo 10. 396 elemanlı çelik köprünün analiz sonucunda elde edilen ort-MAC değerleri.....	71
Tablo 11. 396 elemanlı çelik köprünün analiz sonucunda elde edilen rms-MAC değerleri.....	74
Tablo 12. 396 elemanlı çelik köprü sistemi için elde edilen optimum sensör konumları.....	75

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E_D	: Etkin bağımsızlık katsayısı
Φ_i, Φ_j	: Karşılaştırılan mod şekil vektörleri
Φ^T	: Modal şekil vektörünün transpozunu
$\otimes$	: Eleman bazında matris çarpımı
Λ^{-1}	: Eksenel özdeğer matrisin tersi
MKE	: Modal kinetik enerji katsayısı
DPR	: Sürüş noktası kalıntı yöntemi katsayısı
MAC	: Modal güvence kriteri değeri
$F(t)$	: Zamanla değişen dış kuvvet
F_a	: Atalet kuvveti
F_s	: Yay kuvveti
F_D	: Sönüm kuvveti
k	: Yay sabiti
m	: Yapının kütlesi
c	: Sönüm katsayısı
$x(t)$	: Sistemin yer değiştirmesi
$\dot{x}(t)$	: Sistemin hızı
$\ddot{x}(t)$	: Sistemin ivmesi
w_n	: Sönümsüz doğal açısal frekans
$F(t)$	: Dış kuvvet vektörü
M	: Kütle matrisi
C	: Sönüm matrisi
K	: Rijitlik matrisi
x	: Zamandan bağımsız genlik
λ	: Özdeğer
ϕ_n	: Özvektör
Φ	: Normalleştirilmiş özvektörler
A	: Kafes çubuk elemanın kesit alan
E	: Elastisite modülü

L	: Eleman uzunluğu
$\{P\}$	: Yerel koordinata atıfta bulunan düğüm parametresi
$\{\delta\}$	: Küresel koordinata atıfta bulunan düğüm parametresi
$\bar{m}$	: Elemanın birim uzunluğunun kütlesi
$[T]$	: Dönüşüm matrisi
$[K]^*$	: Global rijitlik matrisi
$[M]^*$	: Global kütle matrisi
θ	: Eleman eksenini ile global koordinat sistemi arasındaki açı
s	: $\sin(\theta)$
c	: $\cos(\theta)$
$f(x)$	: Amaç fonksiyonu
$X'_{j,k,i}$	: $X_{j,k,i}$ değerinin değiştirilmiş hali
$X_{j,k,i}$	: i. iterasyonda k. aday için j. değişken değeri
$r_{1,j,i}$	: i. iterasyonda j. değişkeni için [0, 1] arasında değişen rasgele değer
$X_{j,en\ iyi,i-}$	: i. iterasyonda j değişkeninin en iyi aday değeri
$X_{j,en\ kötü,i-}$	: i. iterasyonda j değişkeninin en kötü aday değeri
<i>mak-MAC</i>	: MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının en büyük değeri
<i>ort-MAC</i>	: MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının ortalaması
<i>rms-MAC</i>	: MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının karekök ortalaması
$f_a(x)$	: mak-MAC yönteminin amaç fonksiyonu
$f_b(x)$	: ort-MAC yönteminin amaç fonksiyonu
$f_c(x)$	: rms-MAC yönteminin amaç fonksiyonu
m	: İlgili mod sayısı
C_s	: Tüm kombinasyonların sayısı
n	: Olası sensör konumu
s	: Sensör sayısı
YSİ	: Yapı sağlığı izleme
OSY	: Optimum sensör yerleşimi
TSD	: Tek serbestlik dereceli
ÇSD	: Çok serbestlik dereceli
FEBY	: Frekans etkili bağımsızlık yöntemi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnşaat sektörü hayatımızda önemli bir yer kaplamaktadır. Sürekli olarak birçok farklı yapı inşa edilmektedir. Ama sadece inşa etmek yeterli değildir. Bu yapıların korunması ve kontrol altında tutulması da gerekmektedir. İnşaat alanında gelişen teknoloji ile birlikte inşa edilmiş veya yeni inşa edilecek yapıların yapısal durumunu izleyebilmek, Yapı Sağlığı İzleme yöntemi kullanılması ile daha kolay bir hale gelmiştir. Sıcaklık, deprem, patlama, rüzgâr, kar veya yağmur gibi birçok kuvvetin etkisinde oluşan iç ve dış kuvvetlerin yapıya zarar verdiği bilinmektedir. Bu kuvvetlerin verdiği hasarı tanımlayabilmek, yapının şu anki durumunu gözlemleyebilmek, yapının dinamik özelliklerini tespit etmek ve herhangi bir sorun oluşmadan gerekli müdahalelerin yapılabilmesi gibi konuları kapsayan sistem Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) adı ile tanımlanmaktadır (Erdoğan vd., 2014; Şafak 2007).

YSİ yöntemi ilk olarak uzay ve havacılık alanında kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra söz konusu teknolojinin gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla diğer alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat mühendisliği alanı ise bu teknoloji ile 20. yüzyılın sonlarına doğru tanışmıştır (Aktan vd., 2000). Ekonomik elverişsizlikler nedeniyle YSİ sistemleri ilk olarak sadece barajlar, hastaneler, köprüler, tüneller, yüksek binalar, santraller ve tarihi yapılar gibi önemli yapılarda kullanılabilmıştır. YSİ, bu önemli yapılardan biri olan köprülerin güvenilirliğini arttırması ve uygun maliyetli bakım yapılabilme olanağı sağladığı için son zamanlarda köprülerdeki kullanımında artış görülmektedir. Köprü türü yapılara kurulan YSİ sistemi sayesinde trafik yükü, deprem, sel ve rüzgâr gibi olası durumlarda köprünün davranışının izlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca mevcut köprülerdeki yapısal hasarı erken tespit ederek problemin çözülmesinde geç kalınmamasını sağlamaktadır.

Köprü türü yapılarda YSİ, kısa süreli izleme ve uzun süreli izleme olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Kısa süreli izleme (periyodik izleme), şüphe edilen bazı yapılarda sistemi tanımlayarak herhangi bir hasarın oluşup oluşmamasının kontrol edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Uzun süreli izleme (gerçek zamanlı) ise özel yapıların yedi gün yirmi dört saat sensörle izlenmesi olup yapının ekonomik ömrü boyunca mühendislere gerekli verileri sağlayarak yapıda meydana gelen hasarların tespiti anında hızlı bir şekilde yapılabilir (Pınar, 2020).

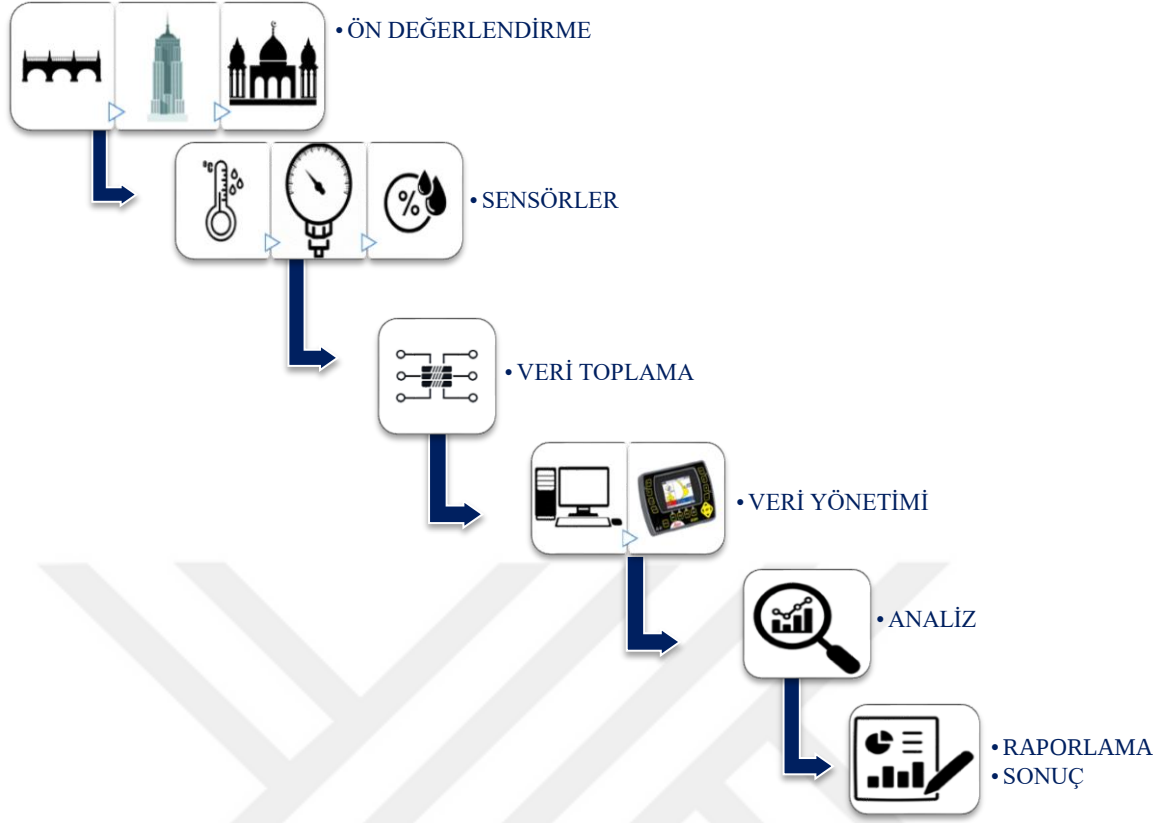
Köprülere kurulan YSİ sistemi, kablo gerilmelerinin takibi, köprü ayaklarındaki yük kapasitesinin izlenmesi, döşeme deformasyonlarının izlenmesi, doğal frekanslar ile dinamik analizlerin hesaplanması ve yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi gibi birçok fayda sağlamaktadır (Soyöz ve Fırat, 2011). Bahsedilen işlemlerin yapılması esnasında köprü hizmet vermeye devam etmekte olup trafiğinin kapatılmasına gerek duyulmamaktadır. YSİ ile köprünün günlük işleyişi devam ederken sensörler ile yedi gün yirmi dört saat veriye direk erişim sağlanmaktadır. Herhangi bir sorun oluşması halinde uyarı bildirimleri ile ilgili merciler bilgilendirilmektedir.

Ülkemizin büyük bir kısmı aktif deprem bölgesinde olduğu için diğer yapılar gibi köprüler de deprem riski altındadır. Türkiye’de bulunan köprülerin sürekli takibini sağlayabilmek için YSİ sisteminin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Sensörlerle sürekli izlenen köprülere örnek olarak Haliç Metro Köprüsü, İstanbul-İzmir Otoyolu’nda yer alan Osmangazi Köprüsü ve Yavuz Sultan Selim (3. Boğaz Köprüsü) Köprüsü verilmektedir. (URL-1, 2023; URL-2, 2016).

Başta köprü türü yapılar olmak üzere her bir yapının, YSİ’inde optimum sensör sayısı ve konumunun belirlenmesi oldukça önemlidir. YSİ’de sensörlerin yanlış noktalara yerleştirilmesi, gerekli olan verilerin hatalı veya eksik olmasına neden olacaktır. Ayrıca yapılara yerleştirilecek sensörlerin sayısının en uygun sayıda olması gerekmektedir. Eğer sensör sayısı az olursa eksik bilgi elde edilmekte ve gerçek değerlere ulaşılmamaktadır. Diğer yandan sensör sayısının gerekenden fazla olması, çok fazla veri yaratmaktadır. Bu yüzden veri işlemede zaman kaybı oluşmaktadır. Ayrıca sensör maliyetleri, sensörleri birleştiren ağ maliyetleri, verileri depolayan merkezlerin maliyetleri ve verileri işleyen cihazların maliyetleri oldukça fazla olacaktır.

1.2. Yapı Sağlığı İzleme Sistemi

YSİ’nin çalışma sisteminde sensörlerin görevi çok önemlidir. Sensörlerden gelen veriler ile yapıda hasarın oluşup oluşmadığı anlaşılmaktadır. Ardından hasarın yapı üzerinde konumu bulunmakta, hasarın türü ve derecesi belirlenmektedir. Gerekli veriler toplandıktan sonra hasarın giderilmesi için gerekli işlemler yapılmakta ve yapının ekonomik ömrünün uzatılması sağlanmaktadır. YSİ sisteminin çalışma aşamaları Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. YSİ sisteminin akış şeması

Yapılara yerleştirilen bu sistem sayesinde birçok parametre izlenebilmektedir. Mod şekilleri, frekanslar, sönüm oranları, nem, sıcaklık, ivme, titreşim, yorulma, deplasman, deformasyon, korozyon, gerilme ve çatlak gibi parametreler YSİ ile yedi gün yirmi dört saat izlenebilmektedir. Bu sayede de yapı hakkında çoğu bilginin elde edilmesi sağlanmaktadır.

YSİ sisteminin çalışma mekanizması ön değerlendirme, verileri toplama, verileri bir cihaza iletme, verileri cihazda depolama, veri analizi ve son olarak sonuçların analizi ve değerlendirilmesi şeklindedir (Gündoğan, 2012).

1.2.1.Ön Değerlendirme

Yapının mevcut durumu hakkında değerlendirme yapılması YSİ sisteminin ilk aşaması olmaktadır. Önceden inşa edilmiş yapılara YSİ sistemi yerleştirilecek ise ilk önce yapının eski verileri ve modelleri hakkında bilgi edinilmelidir. Yeni inşa edilecek yapıda ise tasarlanan model incelenmeli ve sensör yerleşimi yapılmadan önce yapıya ait tüm verilerin toplanması gerekmektedir. Yapıya ait gerekli araştırmalar yapıldıktan sonra optimum sensör

sayısına ve konumuna karar verilmelidir. Bu aşamada sensör yerleşimi çok önemli olmaktadır. Amaç en az maliyetle en iyi gözlemi yapmaktır. Ön hazırlıklar tamamlandıktan sonra YSİ sistem kurulumu yapılmaktadır.

1.2.2. Veri Toplama ve İletme

YSİ’de veri toplama, sensörler aracılığıyla sürekli ve düzenli ölçüm yapılması ile sağlanmaktadır. Sensörler, yapılardaki değişiklikleri tespit ederek bu verileri bilgisayara veya başka bir dijital alete aktaran titreşim tabanlı bir cihazdır. Uygun sensör seçimi yapıda izlenmek istenilen veriye daha erken ulaşmamızı sağlamaktadır. Sensörlerin sıcaklık, nem, rüzgâr hızı, eğim, basınç veya titreşim gibi birçok farklı kullanım alanı vardır. Her kullanım alanına göre farklı sensör türleri bulunmaktadır. Sensör çeşitlerine; basınç ölçer, ivme ölçer, ısı ölçer, ışık ölçer, nem ölçer ve hız ölçer gibi birçok örnek verilebilmektedir (Topkaraoğlu, 2017).

Yapıya yerleştirilen ne kadar sensör varsa hepsinden gelen sinyaller eş zamanlı olarak dijital veriye çevrilmektedir. Daha sonra bu veriler kaydedilerek bilgisayara veya dijital başka bir hatta transfer edilmektedir. Sensörlerden kaydedilen verilerin hepsi kullanılmamaktadır. Çevre gürültüsünden kaynaklı gereksiz bilgiler temizlenmektedir.

1.2.3. Veri Depolama ve Sonuç Analizi

Sensörlerden gelen veriler dijital cihazlarda depolanmakta olup depolanan verilerden eski ve yeni değerlerin karşılaştırması yapılmaktadır. Bu verilerden en önemlileri modal parametrelerdir (doğal frekanslar, mod şekilleri, sönüm oranları). Bu parametreler incelendiğinde, yeni yapılan yapılar için modelleme süreçlerinde tasarlanan yapının gerçek dünya koşullarında planlanan şekilde davrandığı gözlemlenebilmektedir. Eski yapılarda ise bu parametreler, yapıların hasar durumu ve performansı hakkında bilgi sağlayarak bakım ve onarım kararlarının verilmesine yardımcı olmaktadır. Bu sayede, yapının mevcut durumu hakkında bilgi sahibi olunarak, yapının güvenliği ve dayanıklılığı değerlendirilebilmektedir.

Depolanan veriler analiz edilerek sonuçlar raporlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar neticesinde yapının hasarlı ve hasarsız durumu için veriler elde edilmiş olmaktadır. Bundan sonrası hasarın büyüklüğü, türü ve konumu belirlenerek gerekli müdahalelerin yapılmasıdır. Bu sayede yapılardaki küçük iç hasarlar daha büyük hasarlara dönüşmeden

önlenebilmektedir. Düzeltilemeyecek kadar hasar oluşumu var ise de can kaybı oluşmadan kontrollü yıkım gerçekleştirilmektedir (Topkaraoğlu, 2017).

1.3. Optimum Sensör Yerleşiminin Önemi

İnşaat sektöründe optimum sensör yerleşimi, projelerin güvenliği ve verimliliği açısından hayati bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, sensörlerin doğru konumlandırılması hem yapım süreci boyunca hem de yapıların kullanım ömrü boyunca önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu süreç, mühendislik hesaplamaları, simülasyonlar ve saha analizleri ile desteklenerek yapılmalıdır. Uygun yerleşim hem inşaat sırasında hem de yapının hizmet ömrü boyunca maksimum fayda sağlamaktadır.

Bir sistemde az sayıda veya çok sayıda sensör kullanmanın, her iki durum için de kendine özgü yararları ve zararları bulunmaktadır. Sensör yerleşiminin ve sayısının doğru belirlenmemesi, sistemin verimliliği ve güvenilirliği üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Az sayıda sensör kullanmanın zararları (URL-3 2023; URL-4, 2019);

- Yetersiz Veri ve Kapsama Alanı: Az sayıda sensör kullanılması, sistemin bazı kritik bölgelerinden veri toplanamamasına yol açmaktadır. Bu durum, sistemdeki sorunların fark edilmemesine veya geç tespit edilmesine neden olabilmektedir.
- Düşük Ölçüm Doğruluğu: Az sensörle yapılan ölçümler, sistemin genel durumunu tam olarak yansıtmamaktadır. Bu da yanlış analizlere ve hatalı kararlar alınmasına yol açabilmektedir.
- Güvenlik Riskleri: Az sayıda sensör, erken uyarı sistemlerinde yetersizlik yaratabilmektedir. Örneğin, bir gaz kaçağı algılama sistemi az sayıda sensöre sahipse, kaçak fark edilmeden büyüyelebilmekte ve tehlike oluşturabilmektedir.
- Yedekleme Eksikliği: Az sayıda sensör kullanıldığında, bir sensör arızalanırsa sistemin genel işlevi ciddi şekilde zarar görebilmektedir.

Çok sayıda sensör kullanımının zararları ise (URL-3 2023; URL-4, 2019);

- Maliyet Artışı: Sensörlerin donanım, kurulum, bakım ve veri işleme maliyetleri yüksek olabilmektedir. Gereğinden fazla sensör kullanılması, bütçenin verimsiz harcanmasına yol açmaktadır.
- Gereksiz Veri Yığını: Çok sayıda sensörün aşırı miktarda veri üretmesi, veri işleme ve analiz süreçlerini karmaşıktırarak bilgiye erişimi zorlaştırırken, büyük veri

setlerinin işlenmesi için güçlü bir altyapıya ihtiyaç duyulması ek maliyet ve zaman kaybına neden olabilmektedir.

- Enerji Tüketimi: Özellikle kablosuz sensör ağlarında çok sayıda sensörün kullanılması, enerji tüketimini artırmakta ve sistemin genel çalışma süresini kısaltabilmektedir.
- Karmaşıklık ve Güvenilirlik: Çok fazla sensör, sistemin karmaşıklığını artırabilmekte ve sensörler arasında veri çakışmaları veya uyumsuzluklar yaşanabilmektedir. Bu da güvenilirliği azaltmaktadır.

Yukarıda verilenler gibi az ya da çok sayıda sensör kullanmanın olumsuz etkilerini önlemek için optimum sensör sayısı ve yerleşimi belirlenmelidir. Bu durum için geliştirilen yöntemler mevcut olup, OSY'nin yaygınlaşmasıyla birlikte sürekli olarak yeni yöntemler ortaya çıkmaktadır.

1.4. Sensör Konumu Belirleme Yöntemleri

Sensör konumu belirleme yöntemleri, sensörlerin optimum bir şekilde yerleştirilmesini sağlamak için kullanılan çeşitli yaklaşımları kapsamaktadır. Bu yöntemler, sistemin gereksinimlerine, sensörlerin amacına ve uygulama alanına göre farklılık göstermektedir. OSY ile ilgili birçok yöntem bulunmaktadır. Aşağıda bazı yöntemler açıklanmıştır. Bu çalışmada ise OSY için verilen yöntemlerden Modal Güvence Kriteri (MAC) yöntemi kullanılmıştır.

1.4.1. Etkin Bağımsızlık Yöntemi

Kammer (1990) tarafından önerilen bu yöntem, sensör yerleşimini optimize etmek için modal şekillerin lineer bağımsızlığını maksimize eden popüler bir yaklaşımdır. Bu yöntem, Fisher bilgi matrisini (Bir modeldeki parametreler hakkında verinin ne kadar bilgi taşıdığını ölçen bir matristir) kullanarak modal koordinat tahminindeki hata kovaryansını minimize etmekte ve modal şekil matrisindeki bağımsızlığı artırarak ölçümlerin doğruluğunu sağlamaktadır (Ober, 2002). Etkin bağımsızlık yönteminin indeksleri, sensör konumlarının modal bağımsızlığa olan katkısını değerlendirilmekte ve küçük katkıya sahip noktalar iteratif olarak elenerek en uygun sensör yerleşim noktaları belirlenmektedir. Aday sensörlerin etkin bağımsızlıkları, katsayısı Bağıntı (1) ile tanımlanan E_D katsayısı kullanılarak belirlenmektedir.

$$E_D = \text{diag}(\Phi[\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T) \quad (1)$$

Burada, Φ modal şekil matrisidir. Her satır, her bir serbestlik derecesine (yani fiziksel bir ölçüm noktasına, sensör konumuna veya sistemin titreşebileceği bir noktaya) karşılık gelen mod şekillerinin bulunduğu satır olup Φ^T modal şekil matrisinin transpozunu temsil etmektedir. E_D değeri, 0 ile 1 arasında değişen bir katsayı olup, yüksek E_D değerleri hedef modunun doğrusal bağımsızlığına daha fazla katkı sağlayan ve sensör yerleşimi için uygun olan konumları ifade etmektedir. Tüm konumlar için E_D değerleri hesaplanarak bu katkıya göre sıralama yapılmakta ve katkı sağlamayan konumlar iteratif bir süreçle aday sensör kümesinden çıkarılmaktadır. Bu yöntemle, optimum sensör yerleşimi belirlenmektedir. (Segeja, 2021; Li, 2011).

1.4.2. Modal Kinetik Enerji Yöntemi

Modal Kinetik Enerji (MKE) yöntemi, Heo ve diğerleri (1997) tarafından önerilen, etkin bağımsızlık yöntemine benzer bir teknik olup doğrudan sistemin kütlelerini içermektedir. Bir yapının dinamik davranışını anlamak ve sensör yerleşiminde optimal noktaları seçmek için kullanılan bir stratejidir. Bu yöntemin temel mantığı, bir yapının hedef mod şekilleri üzerindeki kinetik enerjiyi incelemektir. Kısaca, hangi serbestlik derecelerinin en fazla enerjiye katkıda bulunduğunu belirleyerek, bu bölgelerdeki tepkileri ölçmenin daha anlamlı olacağını söylemektedir. MKE matrisi Bağıntı (2) ile elde edilmektedir.

$$MKE_{pq} = \Phi_{pq} \sum_k M_{pk} \Phi_{kq} \quad (2)$$

Burada, MKE_{pq} , q . hedef mod (yapının titreşim modları arasında özellikle incelenmek veya dikkate alınmak istenen belirli mod) için p . serbestlik derecesine ait modal kinetik enerjisini, Φ_{pq} , q . hedef modda p . serbestlik derecesine karşılık gelen mod şekli katsayısını, M_{pk} , sonlu elemanlar modelindeki kütle matrisinin p satırı ve k sütunundaki elemanını, Φ_{kq} , q . hedef modda k . serbestlik derecesine karşılık gelen mod şekli katsayısını ifade etmektedir. MKE'nin sonucu, bir serbestlik derecesinin hedef modlara olan katkısını temsil etmektedir (Segeja, 2021; Li, 2011).

1.4.3. Sürüş Noktası Kalıntı Yöntemi

Bir yapının dinamik analizinde belirli bir serbestlik derecesindeki bir modun ne kadar uyarıldığını ölçen bir yöntemdir. Bu yöntem, sensör yerleşimi için uygun noktaları belirlemeye yardımcı olmakta ve her bir modun yapıya olan katkısını değerlendirmektedir. DPR katsayısı,

$$DPR = \Phi \otimes \Phi \Lambda^{-1} \quad (3)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada, Φ mod şekil matrisini, $\otimes$ eleman bazında matris çarpımını ve Λ^{-1} aksenal özdeğer matrisinin tersini (diyagonal matris) göstermektedir. Yüksek DPR değerine sahip noktalar, yapıda büyük titreşimlerin ve tepkilerin meydana geleceği bölgeleri işaret etmektedir. Bu noktalara sensör yerleştirilmesi, yapının dinamik davranışını daha doğru ve güvenilir bir şekilde gözlemlemeye olanak tanımaktadır (Li, 2011).

1.4.4. QR Ayırıştırma Yöntemi

Bir yapının modal şekil matrisindeki serbestlik derecelerinden ölçüm noktalarını belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, modal şekillerin doğrusal bağımsızlığını en üst düzeye çıkarmak amacıyla modal matrisin doğrusal bağımsız satırlarını seçmektedir. Bu seçim, transpoze edilmiş modal matrisin QR (Quick Response) ayrıştırması kullanılarak yapılmakta ve seçilen satırlar, modal şekilleri en iyi temsil eden serbestlik derecelerini belirlemektedir. QR ayrıştırma yöntemi, ölçüm noktalarının sayısını minimumda tutarken, MAC matrisindeki çapraz terimleri azaltarak benzer modlar arasındaki ayrımı güçlendirmektedir. Etkin bağımsızlık yöntemine benzer şekilde QR ayrıştırma yöntemi, bağımsızlık prensibini esas almakta, ancak doğrudan satır bağımsızlığına odaklanmaktadır (Li, 2011).

1.4.5. Frekans Etkili Bağımsızlık Yöntemi

Frekans etkili bağımsızlık yöntemi (FEBY), frekans yanıt verileriyle dinamik olarak önemli bilgileri koruyarak sensör yerleşimini optimize etmektedir. Sensörler, yapının aktif ana yönlerini en iyi şekilde ölçerek yerleştirilmektedir. Fisher bilgi matrisini kullanarak bu

matrisin belirleyicisini maksimize etmekte ve hata kovaryansını minimize etmektedir. Sensörlerin etkisi iteratif olarak değerlendirilmekte; düşük etkiye sahip sensörler çıkarılmakta ve bağımsızlık sağlanan konumlar seçilmektedir. FEBY değerleri 0 ile 1 arasında değişmekte; 0, sensörün çıkarılmasının etkisiz olduğunu, 1 ise kritik olduğunu göstermektedir. Bu işlem, hedeflenen sensör sayısına ulaşana kadar devam etmektedir (Rao, 2014).

1.4.6. Modal Güvence Kriteri

Modal güvence kriteri (MAC), yapısal analiz ve sistem kimliği çalışmaları için önemli bir değerlendirme aracıdır. MAC, iki farklı modal şeklin birbirine benzerliğini ölçen bir yöntem olarak, özellikle sensör yerleşimi, modal analizi ve model güncelleme süreçlerinde kullanılmaktadır. Bu kriter, modal şekillerin bağımsızlık derecesini ve örtüşmesini belirlemeye yardımcı olmaktadır. Modal analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için sıklıkla başvurulanan bir yöntemdir. MAC formülü, iki modal şeklin karşılaştırılması için Bağntı (4) ile hesaplanmaktadır (Li, 2012).

$$MAC_{ij} = \frac{(\Phi_i^T \Phi_j)^2}{(\Phi_i^T \Phi_i)(\Phi_j^T \Phi_j)} \quad (4)$$

Burada, Φ karşılaştırılan modal şekil vektörleri, i ve j sütun vektörleridir. MAC matrisinin eleman değerleri de 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bir eleman değeri 0 ise iki modal şekil arasında çok az veya hiç korelasyon olmadığını, yani bu modal vektörlerin birbirinden kolayca ayırt edilebildiğini göstermektedir. Öte yandan 1 değeri ise modal vektörlerin birbirine tamamen benzediğini ve ayırt edilemez olduğunu ifade etmektedir. Bu özellik, modal şekillerin arasında yüksek dereceli bir benzerliği göstermektedir (Yormaz, 2017 ve Qin, vd. 2021). MAC bunların yanında deneysel model ile analitik modelden elde edilen mod şekil vektörlerinin benzerliğini ölçmek için de kullanılmaktadır. Modelin doğruluğunu kontrol etmek için model güncelleme çalışmalarında önemli bir kriter olmaktadır. Yüksek MAC değerleri, sistemin doğru bir şekilde modellenmiş olduğunu, düşük değerler ise modelin gözden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir.

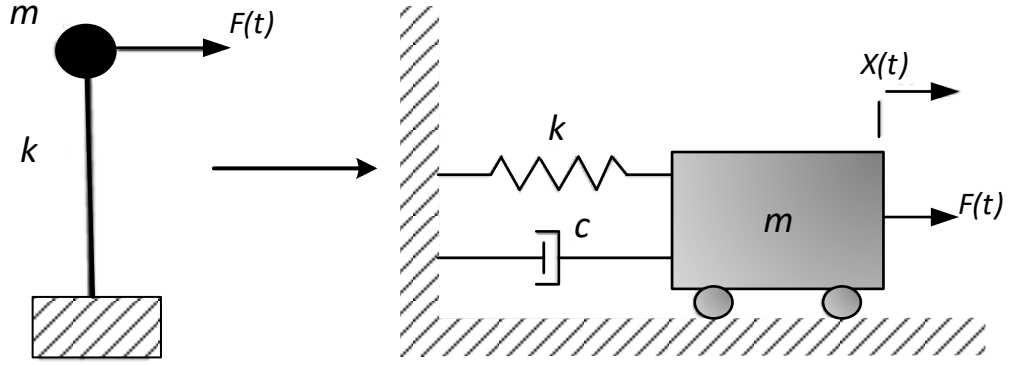
1.5. Teorik Modal Analiz

Modal analiz, mühendislikte ve yapısal analizde, bir sistemin dinamik davranışlarını incelemek için kullanılan temel bir tekniktir. Bu analiz, özellikle yapıların ve mekanik bileşenlerin titreşim davranışlarını anlamak amacıyla yapılmaktadır. Modal analiz, bir yapının doğal titreşim frekanslarını (modlarını) ve bu frekanslara karşılık gelen deformasyon şekillerini belirlemeyi hedeflemektedir. Ayrıca bu analiz, tasarım sürecinde yapının davranışını optimize etmek ve mühendislikteki başarısızlık risklerini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ewins, 2000; Rao, 2011). Bu yöntem, teorik ve deneysel modal analiz olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Teorik modal analiz, matematiksel modeller ve sayısal yöntemler kullanılarak yapılırken, deneysel modal analiz, doğrudan ölçümler ve testler ile yapının titreşim davranışlarını belirlemektedir.

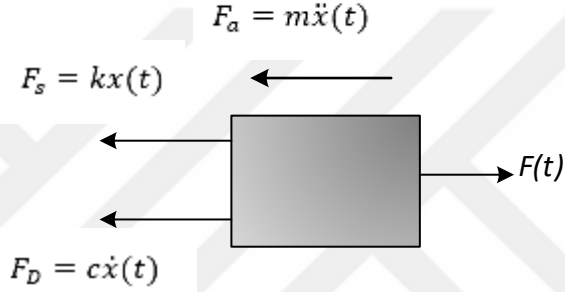
Kafes sistemler, çubuk elemanlardan oluşmakta ve bu elemanlar yalnızca eksenel kuvvetleri (çekme veya basınç) taşımaktadır. Bu tür sistemlerin dinamik davranışını analiz etmek için çalışmada teorik modal analiz yöntemi tercih edilmiştir. Analiz kapsamında sönümsüz serbest titreşim durumu ele alınmış ve hem tek serbestlik dereceli hem de çok serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşim davranışları açıklanmıştır. Bu yaklaşım, kafes sistemlerin doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirleyerek yapının güvenliğini ve performansını değerlendirmek için temel bir çerçeve sunmaktadır.

1.5.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Tek Serbestlik Dereceli (TSD) sistemler, mekanik sistemler teorisinde hareketin yalnızca bir bağımsız parametre tarafından tanımlandığı sistemlerdir. Bu, sistemin hareketini tarif etmek için sadece bir koordinatın yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Bu tür sistemler genellikle mühendislik, fizik ve mekanik alanındaki analizlerde basit modeller olarak kullanılmaktadır. Bir salıncak, yay-kütle sistemi veya sarkaç, TSD sistemlere örnek olarak gösterilebilmektedir. Şekil 2’de TSD sisteminin analitik modeli ve serbest cisim diyagramı verilmiştir (Yılmaz, 2021).



(a)



(b)

Şekil 2. (a) TSD sistemin analitik modeli, (b) serbest cisim diyagramı

Yay-kütle sisteminin serbest cisim diyagramına göre genel hareket denklemi,

$$F_a + F_S + F_D = F(t) \quad (5)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Burada, $F(t)$ zamanla değişen dış kuvvetini, F_a atalet kuvvetini, F_S yay kuvvetini, F_D sönüm kuvvetini, m sistemin toplam kütesini, c sönüm katsayısını, k yay sabitini, $x(t)$ sistemin yer değiştirmesini, $\dot{x}(t)$ sistemin hızını ve $\ddot{x}(t)$ sistemin ivmesini göstermektedir. Bir sistem, herhangi bir dış kuvvet etkisi olmadan ($F(t)=0$) dengeden çıkarsa, bu hareket serbest titreşim olarak adlandırılmaktadır. Sistem, hareket ederken iç kuvvetlerin etkisiyle bir titreşim hareketi sergilemektedir. Bu durumda sistemin hareket denklemi Bağıntı (6) ile ifade edilmektedir.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (6)$$

Bu bağıntı, sönüm etkisinin var olduğu sistemler için geçerli olup, sönümlü serbest titreşim denklemi olarak adlandırılmaktadır.

Yapıda sönüm olmaması durumunda $c = 0$ olmaktadır. Bu ifade Bağıntı (6)'da yerine konulursa TSD sistemin sönümsüz serbest titreşimi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (7)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Bağıntı (7), sönümsüz serbest titreşim denklemi olup sistem yalnızca kütle (m) ve yay (k) özelliklerine bağlıdır. Bu tür sistemlerde doğal frekans hareketi ortaya çıkmaktadır. Bağıntı (7) yeniden düzenlendiğinde,

$$\ddot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0 \quad (8)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bağıntı (8)'de yer alan $\frac{k}{m}$ teriminden elde edilen sönümsüz bir sistemin doğal açısal frekansı (ω_n),

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Burada, ω_n sönümsüz doğal açısal frekans olup birimi radyan/saniye cinsindendir. Sistemin doğal frekansı, serbest titreşim sırasında hareketin temel özelliklerini belirlemekte ve sistemi oluşturan elemanların fiziksel özelliklerine bağlı olmaktadır.

1.5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Çok Serbestlik Dereceli Sistemler (ÇSD), bir yapıdaki düğüm noktalarının birden fazla bağımsız hareket bileşeni ile tanımlandığı, dolayısıyla hareketin birden fazla serbestlik derecesine sahip olduğu sistemlerdir. ÇSD sistemlerin n serbestlik dereceli genel hareket denklemi,

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (10)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada, $F(t)$ dış kuvvet vektörü, M kütle matrisi, C sönüm matrisi, K rijitlik matrisi, $\ddot{x}(t)$ ivme vektörü, $\dot{x}(t)$ hız vektörü ve $x(t)$ yer değiştirme vektörünü temsil etmektedir.

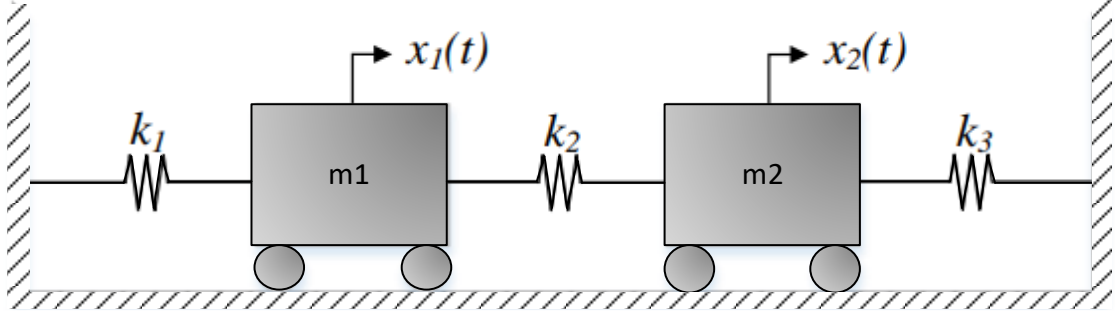
Yapıda sönüm olmaması durumunda ($C=0$), hareket denklemi Bağıntı (11)'deki gibi sadeleşmektedir.

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (11)$$

Yapının doğal frekanslarını veya modal özelliklerini bulmak için yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse, bu durumda hareket denklemi,

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (12)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Bu denklem, çok serbestlik dereceli sistemlerde doğal frekansların ve titreşim modlarının bulunması için kullanılmaktadır. ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşim analitik modeli Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşim analitik modeli

Bağıntı (12)'nin çözümü için,

$$x(t) = xe^{i\omega t} \quad (13)$$

ifadesi dikkate alınmaktadır. Burada, ω doğal açısal frekans ve x zamandan bağımsız genliği ($N \times I$ boyutunda) ifade etmektedir. Düzenleme yapılarak Bağıntı (12) çözülürse,

$$(K - \omega^2 M)x e^{i\omega t} = 0 \quad (14)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det|(K - \omega^2 M)| = 0 \quad (15)$$

determinant bağıntısı elde edilmektedir. Bu denklemden, sistemin doğal frekanslarının kareleri (ω^2), yani özdeğerler ($\lambda = \omega^2$) elde edilmektedir. Her özdeğere ($\lambda_n = \omega_n^2$) karşılık gelen özvektörler (ϕ_n), Bağıntı (11)'den elde edilirse,

$$(K - \lambda_n M)\phi_n = 0 \quad (16)$$

bağıntısı bulunmaktadır. Mod şekilleri, her serbestlik derecesi için genlik oranlarını gösterir ve ϕ_j şeklinde ifade edilirse mod şekil vektörü,

$$\{\phi_j\} = \begin{bmatrix} \phi_{1j} \\ \phi_{2j} \\ \vdots \\ \vdots \\ \phi_{nj} \end{bmatrix} \quad (17)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir. Mod şekillerinin büyüklüğü keyfi olduğu için, bu belirsizliği kaldırmak amacıyla kütle matrisine göre normalleştirme yapılmaktadır. Kütle matrisi ile normalleştirme işlemi yapıldığında,

$$\{\phi\}_j^T (M) \{\phi\}_j = 0 \quad (18)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Normalleştirilmiş modlar Bağıntı (19)'da gösterilmektedir.

$$\Phi_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\sqrt{\{\phi\}_j^T (M) \{\phi\}_j}} \quad (19)$$

Böylece, her mod şekli normalize edilerek birim hale getirilirse,

$$\{\Phi_j\} = \begin{bmatrix} \Phi_{1j} \\ \Phi_{2j} \\ \vdots \\ \Phi_{nj} \end{bmatrix} \quad (20)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Tüm mod şekilleri birleştirilerek (21) ve (22) bağıntılarındaki matrisler,

$$\{\phi\} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdot & \cdot & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdot & \cdot & \phi_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \cdot & \cdot & \phi_{nn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\{\Phi\} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdot & \cdot & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdot & \cdot & \Phi_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \cdot & \cdot & \Phi_{nn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

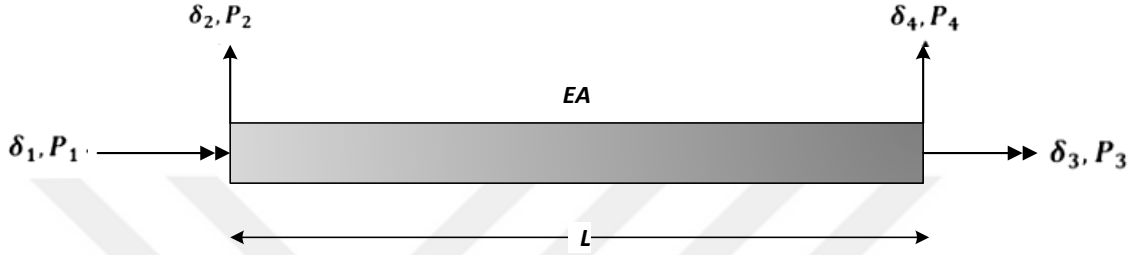
şeklinde gösterilmektedir. Burada, normalleştirilmiş modal matris ϕ ve modal matris Φ şeklinde verilmektedir.

1.6. Kafes Sistemlerin Modal Analizi

Kafes kirişlerin statik analizi, mafsallara uygulanan yükler sonucu çubuklardaki aksenal kuvvetlerin hesaplanması üzerine kuruludur. Ancak, dinamik kuvvetlerin etkisi altında, elemanlarda yalnızca aksenal gerilme durumu geçerli olmamaktadır. Atalet kuvvetleri, aksenal kuvvetlere ek olarak eğilme momentlerine yol açmakta ancak dış momentler olmadığında eleman uçlarındaki eğilme momentleri sıfır kalmaktadır. Dinamik rijitlik yöntemi, kafes kirişlerin analizi için dış kuvvetler, elastik kuvvetler, sönümlenme ve atalet kuvvetleri ile düğüm yer değiştirmeleri, hız ve ivme arasındaki ilişkileri tanımlamaktadır. Bu yöntemle, eleman bazında rijitlik, sönümlenme ve kütle matrisleri

hesaplanmaktadır. Sistem genelindeki bu matrisler kullanılarak düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin çözümünde standart yöntemler kullanılmaktadır (Paz M. 2018).

1.6.1. Düzlem Kafes Eleman İçin Rijitlik ve Kütle Matrisleri



Şekil 4. Düğüm noktaları yer değiştirmelerini ve kuvvetlerini gösteren bir düzlem kafes sistemin elemanı

Aşağıda düzlem kafes kiriş elemanlarının rijitlik ve kütle matrislerinin nasıl türetildiğini ve bu matrislerin global koordinat sistemine nasıl dönüştürüldüğünü detaylandırılmaktadır. Düzlem kafes kiriş elemanında eksenel (1 ve 3) ve enine (2 ve 4) serbestlikleri bulunmaktadır. Eksenel koordinatlar için rijitlik katsayıları Bağntı (23)'deki gibi türetilmiştir.

$$k_{11} = k_{33} = \frac{AE}{L}, \quad k_{13} = k_{31} = -\frac{AE}{L} \quad (23)$$

Bağntı (23)'te, A kesit alanını, E elastisite modülünü ve L eleman uzunluğunu göstermektedir. Enine koordinatlar (2 ve 4) için rijitlik katsayıları sıfırdır, çünkü bu doğrultulardaki yer değiştirmeler kuvvet üretmemektedir. Rijitlik matrisi,

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{Bmatrix} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{Bmatrix} \quad (24)$$

bağntısı ile yeniden düzenlenmektedir. Burada, $\{P\}$ ve $\{\delta\}$ sırasıyla yerel ve küresel koordinatlara atıfta bulunan yük ve yer değiştirme vektörlerini ifade etmektedir. Düzlem

kafes elemanının kütle katsayıları, elemanın birim uzunluğunun kütlesine ($\bar{m}$) göre türetilmiştir.

$$m_{11} = m_{33} = \frac{\bar{m}L}{3}, \quad m_{13} = m_{31} = \frac{\bar{m}L}{6} \quad (25)$$

Düzlem kafesin bir elemanın toplu kütlesine ($\bar{m}$) göre düğüm koordinatlarındaki kuvvetleri ivmelere bağlayan bağıntı,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \frac{\bar{m}L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \\ \ddot{\delta}_3 \\ \ddot{\delta}_4 \end{bmatrix} \quad (26)$$

şeklinde olmaktadır. Buna karşın kütlenin düğüm noktalarında toplandığı kabul edilirse düğüm koordinatlarındaki kuvvetleri ivmelere bağlayan bağıntı,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \frac{\bar{m}L}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \\ \ddot{\delta}_3 \\ \ddot{\delta}_4 \end{bmatrix} \quad (27)$$

şeklinde olmaktadır.

1.6.2. Koordinatların Dönüşümü

Rijitlik ve kütle matrisleri, öncelikle elemanın yerel koordinat sistemine göre türetilmektedir. Ancak, yapı sisteminin genel analizinde bu matrislerin global koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm, bir dönüşüm matrisi ([T]) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Dönüşüm matrisinin genel formu,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (28)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Burada, θ elemanın ekseni ile global koordinat sistemi arasındaki açıyı temsil etmektedir. Global rijitlik ve kütle matrisleri, (29) ve (30) bağıntıları ile elde edilmektedir.

$$[K^*] = [T]^T [K] [T] \quad [K^*] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[M^*] = [T]^T [M] [T] \quad [M^*] = \frac{\bar{m}L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Burada, $\sin \theta = s$, $\cos \theta = c$ şeklinde ifade edilmektedir. Eleman eksen takımı ile global eksen takımı çakışan bir eleman için global ve yerel kütle matrislerinin eşdeğer olduğu Bağıntı (31)'de gösterilmiştir.

$$[M^*] = [M] \quad (31)$$

Bağıntı (31), rijitlik ve kütle matrislerinin dönüşüm işlemini sadeleştirmekte ve analizi kolaylaştırmaktadır. Aynı yöntem, elemanın sönümleme matrisi ($[C]$) için de geçerli olmaktadır.

1.7. Jaya Algoritması

Jaya algoritması, Rao tarafından (2016) önerilen ve klasik metasezgisel yöntemlerden ayrılan yenilikçi bir optimizasyon algoritmasıdır. Sürü tabanlı sezgisel bir yapı üzerine kurulu olan Jaya, özellikle değişkenlerin kesintisiz (sürekli) değerler alabildiği optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiş olup, parametre bağımsızlığı özelliği ile öne çıkmaktadır. Diğer popülasyon tabanlı algoritmalarda performansı artırmak için özel parametrelerin dikkatlice ayarlanması gerekmektedir. Ancak Jaya algoritması, kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken parametreler olmaksızın yüksek verim sunmaktadır. Bu özellik, Jaya'yı farklı türdeki optimizasyon problemlerine kolayca uyarlanabilir hale getirmekte ve onu birçok uygulama alanında geniş çapta kullanılabilir bir yöntem yapmaktadır.

Jaya algoritmasının temel çalışma prensibi, mevcut çözümleri iyileştirerek en iyi çözüme ulaşmak ve en kötü çözümlerden uzaklaşmaktır. Her iterasyonda, popülasyondaki her birey, o anki en iyi çözüme doğru yönlendirilirken en kötü çözümden uzaklaştırılmaktadır. Bu basit ama etkili mekanizma, algoritmanın aday çözümleri adım adım daha iyi çözümler doğrultusunda güncellemesine olanak tanımaktadır. Jaya algoritması, kolay uygulanabilir yapısı ve optimize edilmiş performansı ile optimizasyon problemlerinde yüksek verimlilik sağlamak ve çeşitli uygulamalarda etkin bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

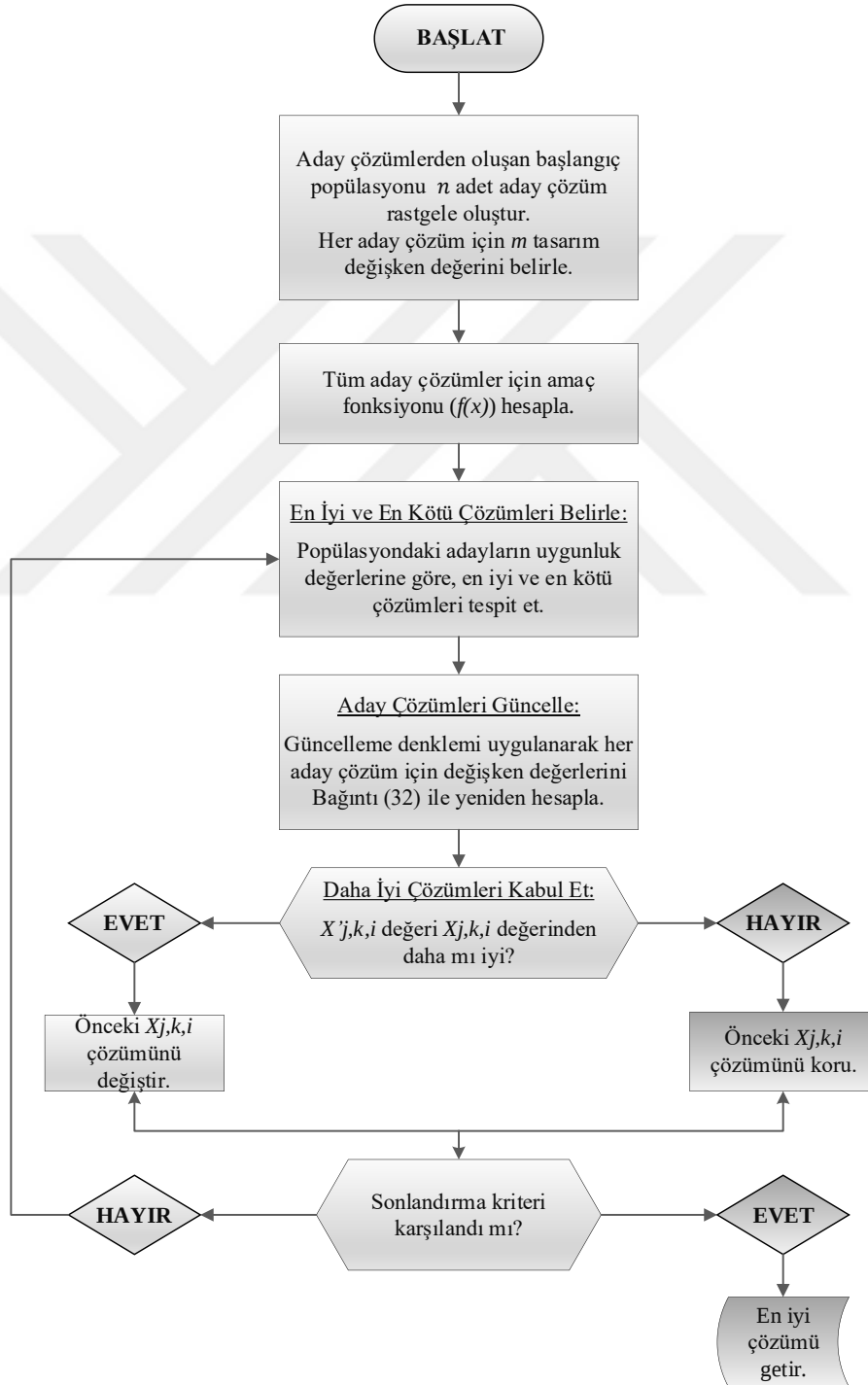
Amaç fonksiyonunu ($f(x)$) minimize etmeye veya maksimize etmeye çalışmaktadır. Algoritma, her bir iterasyonda, popülasyondaki aday çözümleri değerlendirerek en iyi çözüme doğru yaklaşmayı ve en kötü çözümden uzaklaşmayı hedeflemektedir. Bu süreçte, problemin çözümü için m adet tasarım değişkeni ($j = 1, 2, \dots, m$) ve n adet aday çözüm ($k = 1, 2, \dots, n$) kullanılmaktadır. Popülasyondaki her adayın değişken değerleri belirli bir iterasyon sürecinde güncellenmekte ve yeni değerler bir güncelleme denklemi yardımıyla hesaplanmaktadır (Rao, 2016).

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i-} - |X_{j,k,i}|) - (X_{j,en\ kötü,i-} |X_{j,k,i}|) \quad (32)$$

Burada güncelleme denklemi, her adayın j . değişkenine ait yeni değerini belirlerken en iyi çözüme doğru bir yakınsama eğilimi göstermekte ve aynı zamanda en kötü çözümden uzaklaşmaya çalışmaktadır. İlgili denklem, i . iterasyondaki k . adayın j . değişken değeri $X_{j,k,i}$ 'yi güncelleyerek yeni bir değer $X'_{j,k,i}$ oluşturmaktadır. Bu süreçte, $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$ gibi $[0,1]$ aralığında rastgele seçilen sayılar kullanılmaktadır. Bu rastgelelik, algoritmanın arama uzayında daha iyi çözümleri keşfetmesini sağlamaktadır. Güncellenen değer, mevcut değerden daha iyi bir $f(x)$ sağladığı durumlarda yeni değer kabul edilmekte, aksi takdirde mevcut değer korunmaktadır.

Her iterasyonda, popülasyondaki çözümler arasından en iyi ($X_{j,en\ iyi,i-}$) ve en kötü ($X_{j,en\ kötü,i-}$) çözümler belirlenmektedir. En iyi çözüm, tüm adaylar arasında minimizasyon problemlerinde en düşük (veya maksimizasyon problemlerinde en yüksek) $f(x)$ değerine sahip olan çözümdür. Güncelleme denklemi, en iyi çözüme yakınsama ve en kötü çözümden uzaklaşma ilkelerine dayanmaktadır. Bu şekilde, popülasyon her iterasyonda daha iyi bir çözüm elde etmek için güncellenmektedir. Algoritmanın en büyük avantajı, parametre gerektirmemesidir. Bu durum hem uygulama kolaylığı sağlamak hem de hiperparametre

ayarlarının zorluklarını ortadan kaldırmaktadır. Jaya algoritması, basit yapısı ve etkili performansı ile optimizasyon problemlerinin çözümünde sıkça tercih edilmektedir. Algoritma, belirli bir yakınsama kriteri sağlanana kadar iterasyonları sürdürmekte ve nihai çözüm olarak en iyi aday seçilmektedir. Jaya algoritmasının akış diyagramı Şekil 5'te gösterilmiştir (Rao, 2016).



Şekil 5. Jaya algoritması akış diyagramı

1.8. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

YSİ sistemlerinin temelleri, yapısal hasarları erken tespit etme ve yapıların performansını izleme ihtiyacından doğmuştur. YSİ, ilk kez 1980'lerin sonunda Amerika Birleşik Devletleri'nde büyük altyapı projelerinin güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. İlk uygulamalarda, yapısal davranışları izlemek için sensörler kullanılmış ve özellikle köprüler ile yüksek binalar gibi kritik yapıların dinamik davranışları, titreşimleri ve diğer fiziksel parametreleri izlemek için sistemler geliştirilmiştir (Farr, 1999). Bu kapsamda, San Francisco Körfezi Köprüsü'nde gerçekleştirilen izleme projeleri, YSİ sistemlerinin ilk örneklerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Bu projelerde, köprünün dinamik davranışları ve gerilme gibi fiziksel parametreleri izlemek için sensörler kullanılmıştır.

1990'lı yılların başlarından itibaren, Japonya, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi bölgelerde büyük altyapı projelerinde YSİ teknolojilerinin kullanımı hızla yaygınlaşmış; ivmeölçer, yer değiştirme sensörleri, sıcaklık sensörleri gibi çeşitli sensör türleri, yapısal sağlık izleme sistemlerine entegre edilmiştir. Günümüzde YSİ uygulamaları; köprüler, tüneller, yüksek binalar, barajlar ve diğer büyük mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, yapıların güvenliğini ve performansını etkin bir şekilde izlemeye olanak tanımaktadır.

YSİ, iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde farklı yapı türlerine uygulanabilmektedir. İki boyutlu YSİ, genellikle daha basit yapılarda; köprüler, yollar, demiryolu yapıları ve barajlar gibi projelerde kullanılmaktadır. Bu tür projelerde, yapının yatay hareketleri, gerilmeleri ve deformasyonları izlenmektedir. Üç boyutlu YSİ ise daha karmaşık yapılar için, özellikle yüksek binalar, tüneller ve büyük köprüler gibi projelerde tercih edilmektedir. Üç boyutlu modelleme, yapının tüm geometrisini ve dinamik davranışlarını daha hassas bir şekilde izleme imkânı sağlamak ve büyük yapıların güvenliğini artırmaktadır.

YSİ uygulamaları, inşaat mühendisliğinde geniş bir kullanım alanı bulmakta ve özellikle köprüler, viyadükler ve tarihi yapılar gibi kritik öneme sahip yapıların güvenliğini izlemek için etkin bir şekilde kullanılmaktadır. YSİ sistemlerinin başarısı, sensörlerin optimum sayısı ve yerleşimiyle doğrudan ilişkili olması nedeniyle, Optimum Sensör Yerleşimi (OSY) bu alanda önemli bir konu haline gelmiştir. Bu kapsamda, çeşitli yöntemler ve algoritmalar geliştirilmiştir. Literatürde özellikle ulaşım ağlarında kritik öneme sahip köprülerin dinamik davranışlarını izlemek amacıyla yapılan OSY çalışmalarına yer

verilmiştir. Bu çalışmalar, iki boyutlu analizlerden başlayarak üç boyutlu modellere doğru özetlenmiştir.

Sun ve Büyüköztürk (2015), ayrık optimizasyon kullanarak OSY ile ilgili araştırma yapmışlardır. Bu problemi çözmek için ayrık yapay arı kolonisi (DABC) algoritması adı verilen bir yöntemi ve amaç fonksiyonu olarak MAC algoritmasını kullanmışlardır. Bu yöntemler 27 elemanlık bir köprüye, 21 katlı bir binaya ve 610 m yüksekliğindeki Kanton Kulesi'ne uygulanmıştır. Ayrıca sensör yerleştirilmiş üç katlı iki açıklıklı çelik çerçeve sistemi dikkate almışlardır. Böylelikle yöntem deneysel olarak da doğrulanmıştır.

Topkaraoğlu (2017), farklı yapıların (iki boyutlu kafes köprü, iki boyutlu bina, giriş ve üç boyutlu çerçeve sistem) bazıları deneysel bazıları ise nümerik modellenmesi ile mod şekillerini elde etmiştir. Mod şekillerine karşılık gelen enerji değerlerine bakarak sıralama yapmıştır. Kullanmış olduğu algoritmadan yola çıkarak mod seviyelerini yakalayan uygun sensör konumlarının yerleşimi yapmıştır. Yapıların modellemeleri ile sayısal değerleri arasında yakın sonuçlara ulaşmıştır.

Özoğul (2019), en uygun sensör yerleşiminin yapılması hakkında çalışmalar yapmıştır. Doğru değerler alınması için en etkili sensör konumlarını bulabilmek için modal tanımlama perspektifli, öz vektörler birleşen çarpım, mod şekli toplama grafik, etkin nokta kalıntı, modal kinetik enerji ve etkili bağımsızlık yöntemleri kıyaslamıştır. Bu yöntemler toplu kütle yay sistemi, kafes sistem ve çerçeve sisteme uygulamıştır. Yöntemler sonucunda bu sistemlere en uygun sensörleri yerleştirmiştir. Bu konumların sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Simülasyonlar sonucunda amaçlanan doğal frekansları ve mod şekillerini yakalamıştır.

Lee ve Eun (2022), sensörlerin sınırlı sayıda olması nedeniyle optimum sensör yerleştirilmesi için bir araştırma yapmışlardır. Bunun için modal kısıtlama koşullarını kullanan azaltılmış dereceli modeller algoritmasını kullanmışlardır. Mevcut YSİ yöntemleri değiştirilerek kısıtlı dinamik denklem kullanan bir YSİ yaklaşımını uygulamışlardır. Karşılaştırılma yapılabilmesi için Sun ve Büyüköztürk (2015)'de sunulan modeli kullanmışlardır.

Bundan sonraki literatür çalışmaları, OSY için üç boyutlu modelleme kullanarak yapılan köprülerle ilgili araştırmalara yer verilmiştir.

Wang vd. (1998), uzun açıklıklı üç boyutlu köprü sistemi sonlu elemanlar ile modellemişlerdir ve deneysel olarak da test etmişlerdir. Analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki mod şekillerinin MAC yöntemi ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapıdan,

hasardan önce ve sonra deneysel modal veriler elde etmişlerdir. Hasar tespiti için mod şekli eğriliği yöntemi, esneklikteki değişim yöntemi, sertlik değişimi yöntemi, hasar indeksi yöntemi (DIM) adı verilen yöntemler ile veriler dört farklı teknik kullanarak karşılaştırılmıştır. Hasarların daha ekonomik bulunabilmesi için OSY yapmışlardır.

Meo ve Zumpano (2004), sonlu elemanlar modeli yapılan Nottingham Wilford asma köprüsünün sağlık durumunu izleyebilmek amacıyla YSİ sistemini adı geçen köprüye yerleştirmişlerdir. Sensör yerleşimi yaparken en uygun konumları bulabilmek adına araştırma yapmışlardır. Bu amaç ile Etkin Bağımsızlık (EFI), Sürüş Noktası Kalıntısı (EFI-DPR), Özdeğer Vektör Çarpımı (EVP) ve Optimal Olmayan Sürüş Noktası (NODP) gibi 4 farklı optimal sensör yerleştirme yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemler arasından en iyi olanı anlamak adına Ortalama Kare Hatasını (MSE) ve Fisher Bilgi matrisi determinantı kriterleri ile yöntemler arasında karşılaştırma yapmışlardır. Sonuçlar doğrultusunda en iyi sensör yerleşimi yönteminin EFI-DPR tekniği olduğunu belirlemişlerdir.

Meo ve Zumpano (2005), köprü türü yapılarda YSİ sistemleri için en uygun sensör yerleşim yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Araştırma, Nottingham Wilford asma köprüsü üzerinde yapılmış ve farklı yöntemlerin köprünün dinamik özelliklerini doğru bir şekilde belirlemedeki başarısını incelemişlerdir. Altı farklı sensör yerleşim yöntemi, Fisher bilgi matrisi (FIM), kovaryans matrisi ve enerji temelli yaklaşımlar gibi kriterlere göre değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, EFI-DPR yöntemi, köprünün düşük frekanslı titreşim modlarını belirlemede en etkili yöntem olarak öne çıktığını belirlemişlerdir.

Li vd. (2007), New Mexico, Albuquerque'deki Rio Grand'e üzerinde bulunan I-40 Köprüsü'ne sensör yerleşimi yapılması için iki algoritma kullanmışlardır. Modal kinetik enerji (MKE) ve etkin bağımsızlık (EI) yöntemleri arasında karşılaştırma yapmışlardır. Sonuç olarak iki yöntem arasındaki bağlantıyı elde etmişlerdir.

Li vd. (2012), asma köprülerde YSİ için sensör yerleştirme problemini ele almışlardır. Sensörlerin sınırlı sayıda kullanılabilmesi nedeniyle, en uygun sensör yerleşiminin belirlenmesinin YSİ sistemlerinin tasarımında kritik bir öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, dört farklı sensör yerleştirme yöntemi (EI, EFI-DPR, minMAC ve PSS-EI) incelenmiş ve bu yöntemlerin etkinliği, Fisher bilgi matrisi, MAC ve koşul sayısı gibi kriterlerle değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, PSS-EI yönteminin bilgi hacmini artırma, sensör konumlarını simetrik ve düzgün bir şekilde dağıtma açısından üstün

performans sergilediğini göstermişlerdir. Bu yöntem, çalışılan köprüde sensör yerleşimi için en uygun çözüm olarak belirtilmiştir.

Gündoğan (2012), açıklığı 6.30 m, yüksekliği 2.05 m ve ağırlığı 247.32 kgf olan bir çelik model köprü kullanmıştır. Çelik model köprüde yapılan çalışmada sensörler uygun yerlere yerleştirilerek YSI sağlamıştır. İstenilen frekanslara ulaşabilmek için köprünün yüzeyine 30 cm x 12 cm x 150 cm ebatlarında betonarme ağırlıklar yerleştirmiştir. Deney yapılırken köprüye ani darbe ve ortamsal titreşim ile uyarı vermiştir. Böylelikle her iki uyarı için ivme kayıtlarını almıştır. NExT-ERA, çapraz güç spektrum ve ERA yöntemleri ile SAP2000 programındaki modal analiz sonuçlarını karşılaştırmıştır. Yapılan deneyler ile köprünün dinamik verilerinin kullanılmasıyla modal parametreleri (doğal frekanslar, mod şekilleri, sönüm oranları) elde etmiştir. Köprünün hasarlı ve hasarsız durumundaki modal parametreleri kullanarak hasarın seviyesi ve yerini belirlemiştir.

Quaranta vd. (2014), İtalya'nın Taranto şehrindeki tarihi Saint Francesco da Paola köprüsünün dinamik davranışını izlemek için sensör yerleştirme problemine odaklanmışlardır. Köprünün üç boyutlu modal analizi, sonlu elemanlar yöntemi ve SAP2000 programıyla yapılmış, uygun sensör yerleşimi ve minimum sensör sayısı araştırmışlardır. EFI, DPR, EFI-DPR, Özdeğer Vektör Çarpımı (EVP), Optimal Olmayan Sürüş Noktası (NODP) ve Genetik Algoritmalar (GA) gibi yöntemler kullanmışlar; doğrulama için ise MAC yöntemini tercih etmişlerdir. Özellikle EFI, GA1 ve GA3 yöntemlerinin en iyi sonuçları verdiğini belirlemişler, GA tabanlı yöntemlerin sinyal gücü, düzenli dağılım ve dinamik tepki yakalama açısından üstün olduğu göstermişlerdir.

Chang ve Pakzad (2014), köprü sistemleri için modal özelliklerin doğru tanımlanmasını sağlamak amacıyla OSY tekniklerini ele almakta ve optimum sensör sayısı ile konumlarını belirlemek için bir çerçeve önermişlerdir. Çalışma, EI, EI-DPR, KE ve PCA tabanlı MV (Mod Güvence Kriterine Dayalı Varyans) yöntemlerini değerlendirerek modal parametrelerin doğru tahminine olan katkılarını incelemişlerdir. Çerçeve, hedef mod şekillerini yeterince karakterize edecek minimum sensör sayısını belirlemek için MAC yöntemi kullanmışlardır. Önerilen yöntemler, basit bir kiriş, Northampton Street Köprüsü ve Golden Gate Köprüsü üzerinde uygulamışlar ve bu yöntemlerin modal bilgi doğruluğunu artırırken sensör sayılarını optimize ettiği göstermişlerdir. Özellikle, MV yöntemi, düşük hesaplama maliyetleri ve yüksek doğruluk ile diğer yöntemlere kıyasla üstün performans sergilediğini göstermişlerdir.

Çolak (2016), betonarme karayolu köprüsünün YSİ, durum değerlendirmesi ve sismik güvenilirlik tahmini için titreşim tabanlı modal analiz ve sonlu eleman modelleme yöntemleri ele almıştır. Geleneksel görsel inceleme yöntemlerinin sınırlılıklarını aşmak amacıyla, İstanbul'daki bir karayolu köprüsü üzerinde titreşim ölçümleri gerçekleştirmiş ve bu verilere dayalı olarak köprünün sonlu eleman modelini oluşturmuş, ardından kalibre etmiştir. Çalışmada, yapısal elemanların doğrusal olmayan davranışlarının modelleme doğruluğuna etkilerini de değerlendirmiştir. Deprem yüklemeleri altındaki testlerle doğrulanan yöntemler, köprülerin hızlı, uzaktan ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamış ve YSİ alanına önemli katkılar sunmuştur.

Harik (2018), altı adet köprünün durumunu izlemek için yerleştirilen yapısal sağlık izleme sistemlerinin kullanımını açıklamıştır. Bunlar aşırı yüksek kamyon çarpma tespiti ve izleme, mavna (güvertesiz büyük tekne) çarpma tespiti ve izleme, öngerilmeli beton i-kiriş çatlak hareketinin karbon fiber takviyeli polimer güçlendirmeye bağlı olarak değerlendirilmesi, köprü alt yapısına etkiyen termal yüklerin incelenmesi, genleşme derzlerinin ısı hareketi değerlendirmesi, çelik zemin kirişinde çatlak büyümesinin izlenmesi şeklindedir. YSİ sistemleri, karayolu köprülerinin bütünlüğünü ve performansını incelemek için çeşitli şekillerde kullanılmıştır. Böylelikle köprüler daha uzun ömürlü ve anında karar verilip müdahale edilmektedir.

Pachón vd. (2018), İspanya'nın Posadas şehrindeki tarihi E. Torroja Köprüsü için maliyet etkin bir YSİ sistemi tasarımını ele almışlardır. Bu köprü, farklı çelik-beton kompozit yapısı ve kültürel önemi nedeniyle sürekli izleme gerektirmektedir. Çalışmada, geniş kapsamlı titreşim testlerinden elde edilen veriler kullanılarak bir sonlu eleman modeli oluşturmuşlar ve genetik algoritmalarla güncellemişlerdir. Optimal sensör yerleşimi için EFI yöntemi kullanılarak dört sensörle köprünün ana dinamik özelliklerini doğru şekilde izleyebilecek bir düzenek tasarlamışlardır.

Tan ve Zhang (2019), YSİ sistemlerinde sensör yerleştirme problemi için kullanılan hesaplama yöntemlerini incelemişlerdir. YSİ, büyük ve karmaşık yapıların (üç boyutlu büyük bina, üç boyutlu düzensiz şekilli kule ve üç boyutlu uzun açıklıklı kablolu köprü) hasarlarını tespit ederek hizmet sürekliliğini ve güvenliğini sağlamak için hayati bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Sensör yerleşimi, veri kalitesini ve teşhis doğruluğunu etkileyen kritik bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, sensör yerleştirme probleminin tanımlanması, yaygın kullanılan değerlendirme kriterleri (örneğin, MAC, Bilgi Entropisi) ve optimizasyon yöntemlerini (özellikle evrimsel algoritmalar gibi) detaylı bir şekilde ele

almışlardır. Ayrıca, çeşitli yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini tartışarak farklı YSİ uygulamaları için uygunluklarını değerlendirmişlerdir.

Pınar (2020), Haliç Metro Köprüsünün yapısal özelliklerini tanımlamak ve performans düzeyini değerlendirmek amacıyla YSİ yöntemini kullanmıştır. Köprünün mevcut durumda güncel bir sistem tanımlaması olmadığından bu çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duymuştur. Köprüye inşaat sırasında yerleştirilen 61 sensörden alınan verileri kullanmıştır. Köprünün tüm yapısal özellikleri dikkate alınarak MATLAB ve SAP2000 programları yardımıyla sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Sensörlerden elde edilen modal parametreler ile model üzerinden hesaplanan modal parametrelerin uyumlu olduğunu görmüştür. Bu sayede köprünün YSİ sistemi için gerekli koşulları sağlamıştır.

Kaveh vd. (2022), optimum sensör sayısı ve yerleşim konumlarını belirlemek için Q-öğrenme tabanlı su yolu algoritmasını (QWSA) kullanmışlardır. Bu yöntem, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Harris Şahinleri Optimizasyonu (HHO) gibi diğer meta-sezgisel yöntemlerle 600 ve 1180 elemana sahip kubbe kafes yapılar üzerinden karşılaştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda QWSA ile sensör yerleşimlerinin maliyet açısından daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Sensör sayısını belirlemek için bu yönteme ek olarak Üç Eksenli Sürüş Noktası Kalıntısı (DPR3) katsayısını kullanmışlardır. QWSA yöntemiyle elde ettikleri DPR3 değerini diğer yöntemlere göre daha yüksek bulmuşlar ve daha iyi performans sağladığını tespit etmişlerdir.

Xiaohan (2022), YSİ'sinde sensör yerleşiminin optimizasyonunu ele almıştır. Sensör arızalarının etkisini azaltmayı hedefleyen sağlam bir bilgi entropisi tabanlı yöntem önermiştir. Ayrıca, kablosuz sensör ağlarının enerji verimliliğini artırmak için küme tabanlı optimizasyon ve GA gibi yöntemler kullanmıştır. Çalışmada, yirmi katlı çerçeve bina ve bir uzay kafes modeli üzerinde uygulamalar gerçekleştirmiş ve bu modeller üzerinden sensör yerleşimini optimize etmiştir.

Meng vd. (2023), YSİ sensörlerin optimum yerleşimini belirlemek için Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL) tabanlı bir algoritmayı önermişlerdir. MAC yöntemi ile sensör düzenlerinin kalitesini değerlendirerek, yüksek boyutlu ve karmaşık optimizasyon problemlerini çözmüşlerdir. 10 katlı çerçeveli yapı ve Haicang köprüsü modeli üzerinde test edilen algoritma, GA ve parçacık sürü optimizasyonuna (PSO) kıyasla üstün sonuçlar sağladığını göstermişlerdir.

Gönen vd. (2023), köprülerin yapısal parametrelerinin tanımlanması için sensör yerleşimlerinin optimize edilmesine yönelik bir yöntem sunmuşlardır. Çalışmada, bir demiryolu köprüsü üzerinde uygulama yapmışlar ve sonlu eleman modeli ile köprünün dinamik yanıtını etkileyen parametreleri belirlemişlerdir. Monte Carlo simülasyonları ile sensör yerleşimlerinin sağladığı bilgi miktarı incelendikten sonra, hiyerarşik kümelenme algoritması kullanılarak en uygun sensör yerleri ve sayısını belirlemişlerdir.

Chioccarelli vd. (2024) mevcut bir köprünün çevresel titreşim testlerinde sensör yerleşiminin optimizasyonunu ele almışlardır. Çalışmada, köprünün dinamik özelliklerini doğru bir şekilde belirlemek amacıyla sensörlerin en etkili noktalara yerleştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu kapsamda, EFI tabanlı sensör yerleşimi optimizasyonu ve modal analiz yöntemleri kullanmışlardır. Amaçları, minimum sayıda sensörle köprünün titreşim davranışlarını doğru bir şekilde ortaya koymaktır. Ayrıca, ivmeölçerler ile elde ettikleri verileri kullanarak köprünün doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemişlerdir. Köprülerin YSİ ve bakım planlaması süreçlerine önemli bir katkı sağlamışlardır.

Jaya algoritması, Rao R. Venkata tarafından 2016 yılında geliştirilen ve optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Sadeliği ve parametresiz yapısı, algoritmanın mühendislik, enerji, endüstri, veri analizi, sağlık ve telekomünikasyon gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Rao, 2016). Bu algoritma, özellikle yapısal tasarım, termal sistemler, yenilenebilir enerji, güç dağıtımı, üretim planlama ve tedarik zinciri yönetimi gibi mühendislik ve endüstriyel alanlarda başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca, makine öğrenmesi, veri kümeleme, biyoinformatik, tıbbi görüntü işleme, ağ tasarımı ve spektrum yönetimi gibi alanlarda da etkili sonuçlar elde edilmiştir. Jaya algoritması, inşaat mühendisliği alanında da çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Yapısal tasarımda, köprüler, çerçeveler ve kirişler gibi elemanların maliyet, ağırlık ve dayanım optimizasyonu gibi konularda başarılı çözümler sunmaktadır (Dede vd., 2019; Grzywiński vd., 2019; Atmaca vd., 2020). Aynı zamanda beton karışımı tasarımı ve çelik profillerin seçimi gibi malzeme optimizasyonu problemlerinde de etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Geoteknik problemlerde ise zemin iyileştirme, kazık boyutlandırma ve dayanıklılık analizleri gibi konularda etkin bir yöntem olarak öne çıkmıştır (Sahu ve Reddy, 2017; Kaveh ve Karami, 2022; Yormaz, 2017). Bu çalışmada, literatürde Jaya algoritmasının hangi alanlarda ve hangi amaçlarla kullanıldığı incelenmiş ve özellikle OSY problemleri için kullanılıp kullanılmadığı araştırılmıştır.

Literatürde, bu algoritmanın YSİ sistemlerinde kullanıldığı herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Yukarıda farklı alanlarda söz konusu algoritmanın etkin bir şekilde çalıştığını gösteren araştırmalar özetlenmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada Jaya algoritmasının OSY probleminin çözümünde kullanılması düşünülmüştür. Jaya algoritmasının parametresiz yapısı ve basitliği, bu alanda başarılı bir şekilde uygulanabileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle, YSİ sistemlerinde Jaya algoritmasının kullanımını araştıran daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği bu çalışmada vurgulanmaktadır.

1.9. Tezin Amacı

Ülkemizde geçmişten günümüze kadar inşa edilmiş birçok köprü bulunmaktadır. Köprüler, şehirler ve bölgeler arasındaki ulaşımı sağlayan kritik altyapı unsurlarıdır. Köprülerin çoğu, uzun zamanlar kullanılmış ve yıpranmıştır. Ani olarak yıkılmaları ulaşımın durmasına, can ve mal kaybının oluşmasına neden olabilmektedir. Bu tür olumsuzlukların önüne geçilmesi, köprülerin düzenli olarak kontrol edilmesi ile sağlanmaktadır. Kontrollerin çoğu gözlemsel olarak yapılmakta ve gerekli görülmesi halinde laboratuvar testleri uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler, yapının genel durumu hakkında yeterli bilgi sağlamada yetersiz kalabilmektedir. Özellikle depremlerden sonra gözlemsel bir hasar tespiti edilse bile, gizli hasarlar yapı sağlığı açısından ciddi riskler oluşturabilmektedir. Bu tür risklerin minimize edilmesi adına daha hassas ve güvenilir bir kontrol yöntemi olan YSİ yöntemi geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. YSİ yöntemi, köprü türü yapıların dinamik parametrelerindeki değişimi sürekli olarak izleyerek olası hasarların erken tespit edilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, yöntemin tahribatsız olması sayesinde köprülerde ulaşımın kesintiye uğramadan kontrol yapılmasına olanak tanımaktadır.

YSİ sisteminin en önemli bileşenlerinden biri titreşim tabanlı sensörlerdir. Bu sistemlerde sensörlerin doğru sayıda ve doğru konumlarda yerleştirilmesi, izleme sonuçlarının doğruluğu açısından hayati önem taşımaktadır. Sensör sayısının az olması durumunda yapının bazı kritik noktaları izlenememekte ve elde edilen veriler eksik kalmaktadır. Öte yandan, gereğinden fazla sensör kullanılması maliyetleri artırmanın yanı sıra gereksiz veri yoğunluğuna yol açarak analiz süreçlerini zorlaştırabilmektedir. Sensör konumlarının yanlış belirlenmesi ise yapının dinamik davranışının doğru bir şekilde modellenmesini engelleyerek istenilen sonuçlara ulaşamamasına neden olabilmektedir.

Bu noktada, AFAD Yapı Sağlığı İzleme Yönergesi, optimum sensör sayısının belirlenmesini ve bu sensörlerin köprünün dinamik davranışını en iyi temsil edecek kritik noktalara yerleştirilmesini önermektedir. Bu yaklaşım, hem elde edilen verilerin doğruluğunu artırmakta hem de gereksiz sensör kullanımını engelleyerek maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (AFAD, 2020). Ancak AFAD Yönergesinde OSY konusunda detaylı bilgilere yer verilmemiş olup bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu göstermektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, köprülerin yapı sağlığının izlenebilmesi için optimum sensör sayısının ve bu sensörlerin en uygun konumlarının belirlenmesidir. Bu bağlamda, çalışmada önerilen yöntemler kullanılarak, seçilen köprü modeline yerleştirilecek sensörlerin optimum sayısı ve en uygun yerleşim noktaları belirlenmiştir. Literatürde yer alan bilgiler ışığında, sensör yerleşim noktalarının köprünün titreşim modlarını en iyi şekilde temsil etmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu yaklaşım, köprünün farklı bölgelerinde oluşabilecek yapısal bozuklukların erken aşamada tespit edilmesine olanak tanımaktadır.

Literatür incelemeleri sonucunda, köprü türü yapılarda OSY probleminin çözümüne yönelik sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Ayrıca, mevcut çalışmaların çoğunda sensör sayısının sabit tutulduğu ve doğru sensör yerleşimine odaklanıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, sensör yerleşimi üzerine yapılan araştırmaların bazıları 3 boyutlu mevcut köprüler üzerinde bazıları ise deneysel olarak modeli oluşturulan sistemler üzerinde gerçek zamanlı sensör ölçümü yapılan çalışmalardır. Literatürdeki çalışmalarda, sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan numerik çalışmaların hem 2 boyutlu köprülerde hem de 3 boyutlu köprülerde sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra OSY için köprülerde Jaya algoritmasının da kullanımına dair herhangi bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla bu tez çalışması kapsamında MATLAB programı ile SAP2000-OAPI özelliklerinin ve Jaya algoritmasının etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturulacaktır. Oluşturulacak bu program ile hem OSY hem de optimum sayıda sensör sayısının çok kısa sürede belirlenebilmesi hedeflenmektedir. Sensör konumlarının belirlenmesinde mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC gibi modal güvence kriterlerinden yararlanılmıştır. Programın etkinliğini göstermek için literatürde bulunan 17 ve 77 elemanlı iki boyutlu çelik kafes köprü modeli ile 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü örnek olarak seçilecektir.

Bu çalışmanın sonuçları, köprüler için optimum sensör sayısının ve yerleşim noktalarının belirlenmesinde yol gösterici bir rehber niteliğinde olacaktır. Özellikle dinamik

parametrelerin doğru bir şekilde izlenebilmesi, YSİ süreçlerinin verimliliğini artırmaktadır. Gelecekte, farklı köprü türleri ve malzeme özelliklerine göre daha fazla araştırma yapılması ve YSİ sistemlerinin bu tür yenilikçi algoritmalarla entegre edilmesi önerilmektedir. Bu yöntemler hem köprülerin güvenliğini artırmakta hem de olası felaketlerin önüne geçilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu doğrultuda, sensör yerleşimi ve veri analizi süreçlerinin optimize edilmesi, altyapı yönetiminde yeni bir dönemin başlangıcını işaret etmektedir.

1.10. Tezin Kapsamı

Sunulan çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerin içeriği hakkında kısa açıklamalar aşağıda verilmektedir.

Birinci bölümde, YSİ ve OSY konularının önemi vurgulanarak, bu kavramların köprü türü yapılarıdaki yeri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. YSİ'nin çalışma prensipleri özetlenmiş ve bu alana dair çeşitli örnekler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sensör yerleşimi belirleme yöntemleri kısaca tanıtılmış; ayrıca modal analiz ve Jaya algoritmasının temel ilkeleri açıklanmıştır. Çalışma kapsamında literatürdeki benzer araştırmalara değinilmiş ve bu tez çalışmasının amacı açık bir şekilde ortaya konmuştur.

İkinci bölümde, tez kapsamında geliştirilen bilgisayar programının detayları, MATLAB programlama dili, Jaya algoritması ve SAP2000-OAPI özellikleri temel alınarak açıklanmıştır. Programın çalışma süreci, bir akış şeması ile özetlenmiş ve optimizasyon sırasında kullanılan amaç fonksiyonlarına yer verilmiştir. OSY problemlerinin çözümü için seçilen 17 ve 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü bunların yanında 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü olmak üzere üç farklı model incelenmiştir. Bu modellerin yapısal özellikleri ve sonlu elemanlar modelleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, açıklanan yöntemler doğrultusunda hazırlanan program kullanılarak seçilen köprü örneklerine yerleştirilecek optimum sensör sayısı ve konumları belirlenmiştir. Seçilen örneklerin OSY süreçleri sonucunda elde edilen veriler titizlikle incelenmiş ve detaylı analizlerle değerlendirilmiştir. Bu veriler, grafik, tablo ve görseller aracılığıyla sunulmuş ve kapsamlı açıklamalarla yorumlanmıştır.

Dördüncü bölümde ise, elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve genel değerlendirmelere yer verilmiştir. Çalışmanın gelecekte nasıl geliştirilebileceği ve mevcut eksikliklerin nasıl

tamamlanabileceği ile ilgili öneriler ortaya konmuştur. Bu bölüm, kaynakça ve yazarın özgeçmişı ile tamamlanmaktadır.

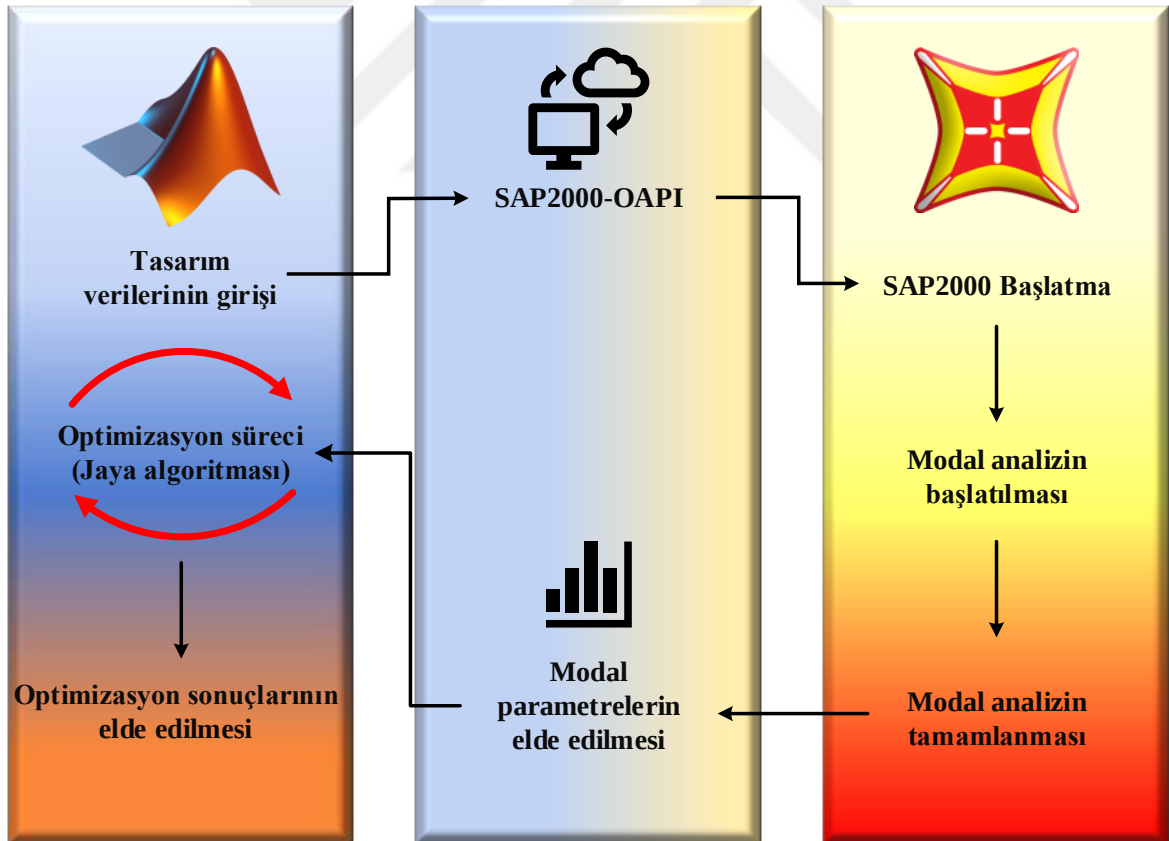


2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında MATLAB programı ile SAP2000-OAPI özelliklerinin ve Jaya algoritmasının etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Bu program ile hem OSY hem de optimum sayıda sensör sayısının çok kısa sürede belirlenebilmektedir. Sensör konumlarının belirlenmesinde mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC gibi modal güvence kriterlerinden yararlanılmıştır. Programın etkinliğini göstermek için literatürde bulunan 17 ve 77 elemanlı iki boyutlu çelik kafes köprü modeli ile 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü örnek olarak seçilmiştir. Bu çalışmada öncelikle iki boyutlu 17 elemanlı kafes çelik köprü sistemi ele alarak basit bir noktadan başlanmıştır. Sistemin hesaplamaları yapıldıktan sonra birden başlayarak kaç adet serbestlik derecesi var ise o sayıya kadar sırayla farklı sayıda sensör yerleşimi yapılmıştır. Her farklı sensör sayısının kombinasyonu için MATLAB kodundan yardım alınmıştır. Oluşan olası kombinasyonlardan en iyi sensör konumları bulunmuştur.

Gerçek hayatta daha karmaşık yapılar, çok sayıda serbestlik derecesine sahip olup MATLAB ile analiz edilmeleri ve sensör yerleşiminin belirlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle, SAP2000 gibi yazılımlar kullanılmaktadır. Sensör yerleşimi için olası kombinasyonların fazlalığı, en iyi çözümün bulunmasını güçleştirdiğinden, bu tür OSY problemlerinde optimizasyon yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda oluşturulan program, öncelikle çok serbestlik dereceli, iki boyutlu 77 elemanlı çelik kafes köprü sistemine, ardından daha karmaşık bir yapı olan üç boyutlu 396 elemanlı çelik kafes köprüye uygulanmıştır. Bu örneklerden izlenen adımlarda öncelikle yapının modeli SAP2000 programında oluşturulmaktadır. Ardından, SAP2000 programında oluşturulan modelin modal analiz gerçekleştirilmekte ve yapının modal kütle katılım oranı %90'a ulaşana kadar olan önemli modlar seçilmektedir. Seçilen önemli mod sayısı doğrultusunda, optimum sensör sayısının belirlenmesi amacıyla, 1'den başlayarak artan sensör sayıları için mac-MAC değerleri hesaplanmaktadır. Elde edilen MAC değerlerine karşılık gelen sensör sayılarıyla bir değerlendirme grafiği oluşturulmakta ve bu grafikteki kabul edilen bölge baz alınarak optimum sensör sayısı tespit edilmektedir. Belirlenen bu optimum sensör sayısına göre, oluşturulan program aracılığıyla en uygun sensör konumları belirlenip yerleştirilmektedir.

Tez kapsamında oluşturulan program (Şekil 6) çalıştırıldığında kullanıcıdan; dikkate alınacak mod sayısı, sensör sayısı ve yapının boyutu (iki veya üç boyutlu) gibi tasarım parametreleri istenmektedir. Ayrıca, sensörlerin yerleştirileceği serbestlik dereceleri (x, y ve z doğrultuları) tanımlanarak uygun bileşenler seçilmektedir. Ardından, optimizasyon işlemi için gerekli olan parametreler (koşum sayısı, popülasyon ve iterasyon sayısı) ile birlikte kullanılacak amaç fonksiyonu tanımlanmaktadır. Tüm veriler tamamlandıktan sonra, SAP2000 OAPI aracılığıyla SAP2000 yazılımı ile bağlantı kurularak modal analiz gerçekleştirilmekte ve modal parametreler elde edilmektedir. Optimizasyon algoritması olarak bu tez kapsamında Jaya algoritması seçilmiştir. SAP2000'den modal parametrelerin elde edilmesinin ardından optimizasyon süreci başlatılmakta ve işlemler bu noktadan itibaren döngüsel olarak devam etmektedir. Tüm işlemlerin tamamlanmasının ardından elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Oluşturulan bilgisayar programı aracılığıyla, bu analiz sonuçlarına göre en uygun sensör konumları belirlenmektedir.



Şekil 6. Oluşturulan programın çalışma akışı

Bir optimizasyon problemi, tasarım değişkenleri, sınırlayıcılar (kısıtlayıcılar) ve amaç fonksiyonu olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Tasarım değişkenleri, tasarımcı tarafından kontrol edilebilen ve değiştirilebilen; boyutlar, malzeme türleri ve geometrik şekiller gibi parametreleri ifade etmektedir. Bu çalışmada, tasarım değişkenleri sensör konumlarını temsil eden serbestlik dereceleri olarak tanımlanmıştır. Sınırlayıcılar (kısıtlayıcılar), tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gereken ve malzeme dayanımı, maliyet, ağırlık, boyut gibi teknik veya ekonomik kısıtlamaları ifade etmektedir. Ancak, bu çalışmada herhangi bir kısıtlayıcı unsur tanımlanmamıştır. Amaç fonksiyonu, optimizasyon probleminin hedefini belirleyen ve tasarımın performansını değerlendiren matematiksel bir ifadedir. Bu fonksiyon aracılığıyla, örneğin maliyetin en aza indirilmesi ya da dayanımın en üst düzeye çıkarılması gibi tasarım kriterleri nicel olarak ifade edilebilmektedir. Bu kapsamda, çalışmada üç farklı amaç fonksiyonu tanımlanmış ve her biri ayrı ayrı minimize edilmek üzere kullanılmıştır. (Korucu, 2022).

2.1. Amaç Fonksiyonları

Yapılarda en iyi sensör konumlarını belirleyebilmek için amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu, optimizasyon problemlerinde en iyi çözümü elde etmek için belirlenen hedefi matematiksel olarak ifade eden bir fonksiyondur. Sensör yerleştirme gibi kombinatorial optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu, belirli aday konumlardaki sensörlerin yerleştirilmesi sonucunda ölçülen sistem performansını en üst düzeye çıkarmak (maksimizasyon) veya en aza indirmek (minimizasyon) üzere tasarlanmaktadır. Sensör yerleşimi için modal güvence kriteri ile ilişkili aşağıda belirtilen üç amaç fonksiyon kullanılmıştır.

Birinci amaç fonksiyonu MAC matrisindeki tüm diyagonal olmayan öğelerdeki en büyük değeri minimize eden mak-MAC yöntemidir. Optimizasyon sürecinde, mod şekil vektörlerinin bağımsızlığını artırmayı hedefleyen mak-MAC yöntemi, bu doğrultuda bir amaç fonksiyonu tanımlamaktadır. Bu amaç fonksiyonu, MAC matrisinin köşegen dışındaki elemanlarının en yüksek değerini minimize etmeye çalışmaktadır. Bu sayede, mod şekilleri arasındaki bağımsızlık artırılarak, birbirine benzeyen veya bağımlı modlar azaltılmış olmaktadır. Kısacası, köşegen dışı MAC elemanlarının en büyüğünü küçülterek mod şekilleri arasında maksimum ayrımı sağlamayı hedefleyen mak-MAC yöntemi,

$$f_a(x) = \max\{MAC_{ij}(x)\} \quad i \neq j \quad (33)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada $f_a(x)$ mak-MAC yönteminin amaç fonksiyonudur ve bu değerin minimize edilmesi hedeflenmektedir. $\max\{MAC_{ij}(x)\}$ tüm köşegen dışı MAC elemanları arasında (yani $i \neq j$ olan elemanlar) en yüksek değeri seçmektedir. $MAC_{ij}(x)$ MAC matrisinin i -inci mod ile j -inci mod arasındaki benzerliğini gösteren bir elemandır. MAC değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup 1, modların tamamen doğrusal bağımlı olduğunu, 0 ise tamamen bağımsız olduklarını ifade etmektedir. Satır i , sütun j değerlerini ifade etmektedir. $i \neq j$ sadece köşegen dışı elemanların dikkate alındığını belirtmektedir. Çünkü köşegendeki elemanlar kendi modlarına ait olup, her zaman 1 değerini almaktadır (Sun ve Büyüköztürk, 2015).

İkinci amaç fonksiyonu tüm köşegen dışı MAC elemanlarının ortalamasını minimize ederek mod şekilleri arasındaki genel bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir. Bu, modların birbirine daha bağımsız olmasını sağlamak ve sistemin modal analiz performansını iyileştirmektedir. ort-MAC yöntemi ile amaç fonksiyonu,

$$f_b(x) = \text{ort}\{MAC_{ij}\} = \frac{1}{\text{mod}x(\text{mod} - 1)} \sum_{i=1}^{\text{mod}} \sum_{j=1}^{\text{mod}} (MAC_{ij}) \quad i \neq j, j \neq i \quad (34)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada $f_b(x)$, tüm köşegen dışı MAC elemanlarının ortalamasını temsil eden amaç fonksiyonudur. Amaç, bu değeri minimize ederek modlar arası bağımsızlığı artırmaktır. $1/\text{mod}x(\text{mod} - 1)$ ortalama almak için kullanılan katsayı olup mod ilgili mod sayısını vermektedir. Böylece toplam köşegen dışı eleman sayısı $\text{mod}x(\text{mod} - 1)$ olmaktadır (Yi, vd., 2012).

Üçüncü amaç fonksiyonu MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının karekök ortalama karesini (root mean square, rms) hesaplayan bir amaç fonksiyonudur. Bu formül, modlar arası bağımlılığın genel seviyesini ölçmek için kullanılmaktadır. Küçük bir rms değeri, modların birbirine daha bağımsız olduğunu göstermektedir. rms-MAC yöntemi ile amaç fonksiyonu,

$$f_c(x) = rms\{MAC_{ij}\} = \sqrt{\frac{1}{mod(mod-1)} \sum_{i=1}^{mod} \sum_{j=1}^{mod} (MAC_{ij})^2} \quad i \neq j, j \neq i \quad (35)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada $f_c(x)$ amaç fonksiyonu, MAC değerlerinin köşegen dışı elemanlarının karekök ortalama karesini hesaplamaktadır. Bu değer düşük olması, mod şekilleri arasındaki bağımsızlığın yüksek olduğu anlamına gelmektedir. $rms\{MAC_{ij}\}$ MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının RMS değerini temsil etmektedir (Sun ve Büyüköztürk, 2015).

2.2. Optimum Sensör Yerleşimi Çözüm Formülasyonu

OSY amacıyla, bir yapıdaki tüm potansiyel serbestlik derecelerine sensörler yerleştirmek için, eldeki n aday konumdan m adet sensör seçimi yapılabilmektedir. Bu kombinatoryal problemde, n konum arasından m sensör yerleştirme kombinasyonlarının sayısını hesaplamak için kombinasyon formülünden yararlanılmaktadır. Bu formül, n öge içinden sırasız olarak m tanesini seçme olasılığını vermekte ve Bağıntı (36) ile ifade edilmektedir (Topkaraoğlu, 2017).

$$C_s = \frac{n!}{s!(n-s)!} \quad (36)$$

Burada, C_s tüm kombinasyon sayısı, n toplam sensör konumu sayısı (sistemin serbestlik derecesi), s seçilen sensör sayısı ($s < n$) vermektedir. Bu formülle, sensör yerleştirme optimizasyon probleminde farklı konfigürasyonlar elde edilmektedir.

Basit geometriye sahip ya da az sayıda serbestlik derecesi olan bir yapı söz konusu olduğunda, sorunun çözümü için deneyimden faydalanmak veya deneme-yanılma yöntemi genellikle yeterli olmaktadır. Ancak, yüzlerce, binlerce veya hatta yüz binlerce serbestlik derecesine sahip karmaşık ve büyük ölçekli bir yapının sonlu elemanlar modeli için kapsamlı bir araştırma oldukça zaman gerektirebilmekte ve pratikte uygulanması zor hale gelebilmektedir. Bu nedenle, bu tür yoğun hesaplama gerektiren bir problemi çözmek için daha sistematik ve verimli bir yaklaşım gerekmektedir. Bu tezde de problemin çözümü için çalışmalar yapılmıştır. 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminde OSY için olası kombinasyonlar hesaplanıp en iyi çözüme varılmıştır. Diğer bir çalışması yapılan 77

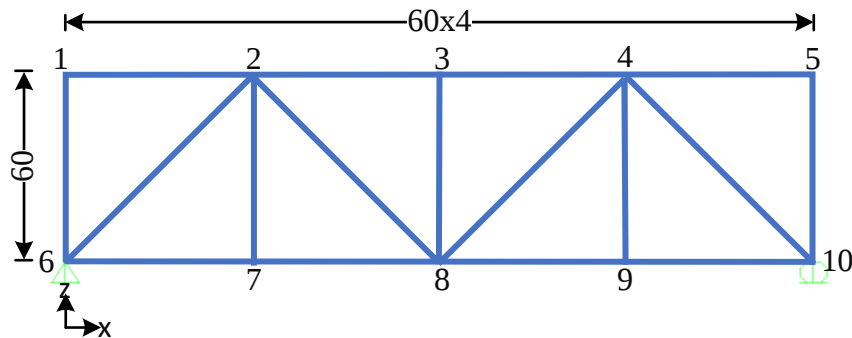
elemanlı düzlem çelik kafes köprü ve 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprüye yerleştirilecek optimum sensör sayısı ve sensör konumu yerleşimini geliştirilen bilgisayar programı ile sağlanmıştır.

2.3. Tercih Edilen Modellerin Yapısal Nitelikleri

2.3.1.17 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü Modeli

17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü, aynı düzlemde yer alan 17 çubuk ve 10 düğüm noktasından oluşan çelik kafes köprü modelidir (Paz M. 2018). İlk olarak, OSY bu basit sistem üzerinden gösterilmiştir. Aynı düzlemde bulunan ve uç noktalarından birbirine bağlanarak rijit bir yapı oluşturan çubuklar grubuna "düzlem kafes sistemi" adı verilmektedir. Bu sistemde x ve y yönlerindeki ötelenme serbestlik dereceleri dikkate alınmış olup, Şekil 7'de gösterilen modelde 6 numaralı düğüm noktası sabit mesnetle tutulduğu için herhangi bir serbestlik derecesine sahip değildir. 10 numaralı düğüm noktasına ise kayıcı mesnet yerleştirildiğinden, yalnızca y yönündeki serbestlik derecesi kısıtlanmıştır. Sistem genelinde 9'u x yönünde ve 8'i y yönünde olmak üzere toplamda 17 serbestlik derecesi bulunmaktadır. OSY problemi kapsamında, bu basit sistem için mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC fonksiyonları kullanılarak minimum sensör sayısının belirlenmesi ve en uygun sensör konumlarının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Olası tüm kombinasyonlar arasından en iyi sonucu elde edebilmek için MATLAB 'de geliştirilen programdan yararlanılmıştır.

Sistemdeki tüm elemanlar için kesit alanı $A=10 \text{ in}^2$, elastisite modülü $E=30 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$, birim uzunluk başına düşen kütle $\bar{m}=0.1 \text{ lb.sec}^2/\text{in}^2$ ve eleman uzunluğu $L=60 \text{ in}$ 'dir.

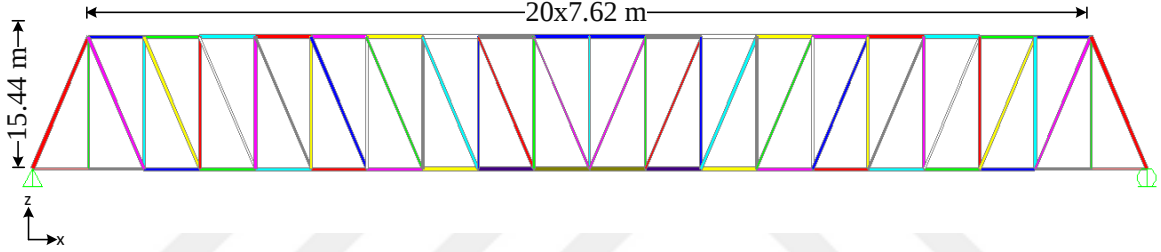


Şekil 7. 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü modeli

2.3.2.77 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü Modeli

Dizaynı daha önce optimum ağırlık problemlerinde kullanılan çelik kafes köprü sistemi (diğer adıyla Pratt köprü), OSY amacıyla bilgisayar programları kullanılarak analiz edilmiştir (Artar ve Carbas, 2021). Model, 500 ft (152.4 m) açıklığa sahip tek açıklıklı bir köprü sistemini temsil etmekte olup, 77 çubuk elemanı ve 40 düğüm noktasından oluşmaktadır. Köprü, Şekil 8’de görüldüğü üzere, y eksenini doğrultusunda 50.65 ft (15.44 m) yüksekliğe sahip olup x eksenini boyunca ise alt ve üst kirişler, her biri 25 ft (7.62 m) aralıklarla eşit şekilde bölünmüştür.

Sistem, simetrik yapısı temel alınarak 39 gruba ayrılmıştır. Bu grupların her biri farklı bir renkle belirtilmiş olup, her gruba atanan W-şekil profilleri Tablo 1’de gösterilmiştir.



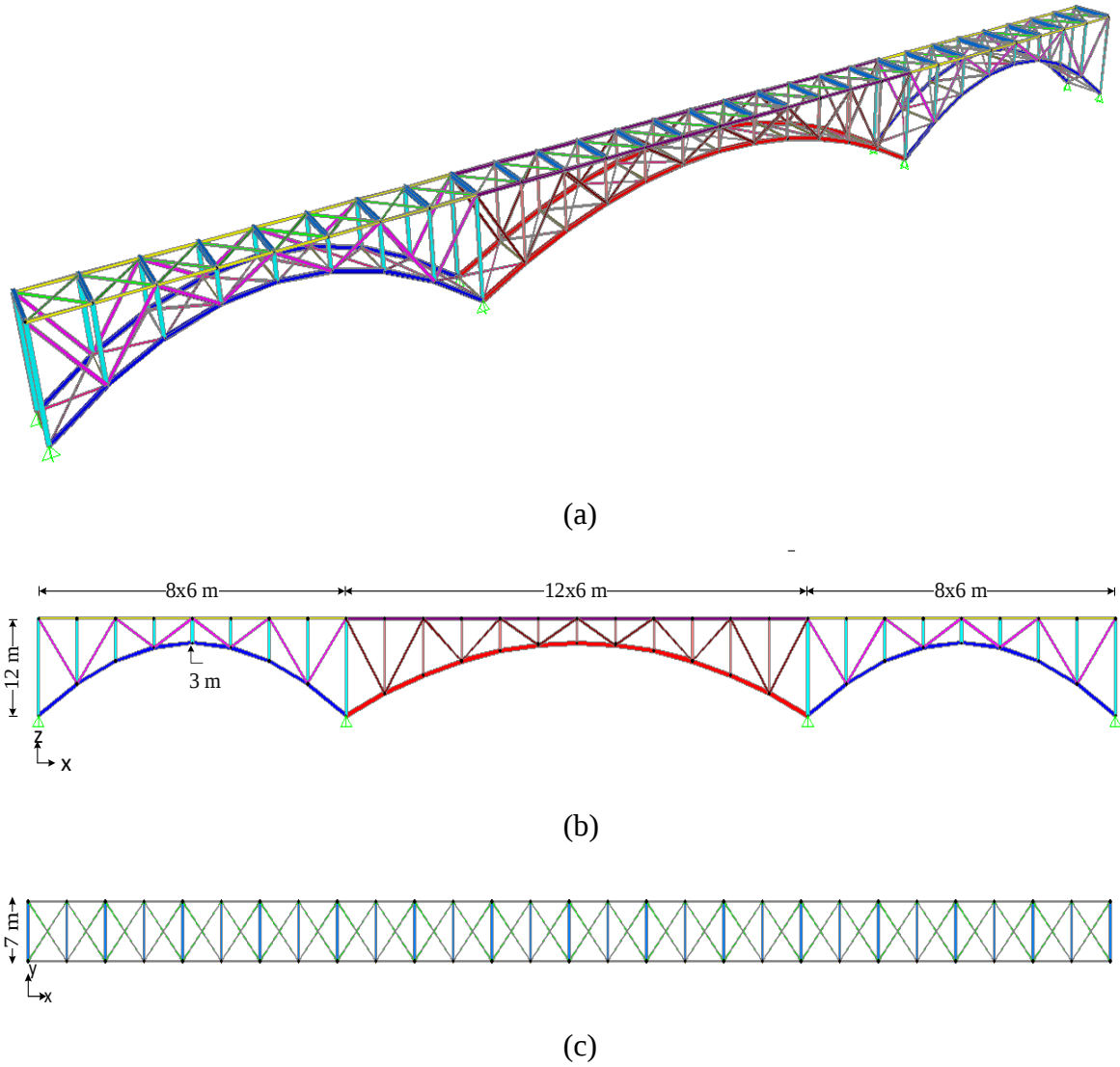
Şekil 8. 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü modeli

Tablo 1. 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminde kullanılan profiller

Grup No	Grup Rengi	Profil Adı	Kesit Alanı (in ²)
A ₁		W10x60	17.6
A ₂		W10x60	17.6
A ₃		W12x120	35.3
A ₄		W12x170	50
A ₅		W12x210	61.8
A ₆		W14x257	75.6
A ₇		W12x305	89.6
A ₈		W14x311	91.4
A ₉		W12x336	98.8
A ₁₀		W14x370	109
A ₁₁		W14x120	35.3
A ₁₂		W12x210	61.8
A ₁₃		W14x257	75.6
A ₁₄		W12x305	89.6
A ₁₅		W14x342	101
A ₁₆		W14x398	117
A ₁₇		W14x426	125
A ₁₈		W14x398	117
A ₁₉		W14x500	147
A ₂₀		W10x49	14.4
A ₂₁		W14x233	68.5
A ₂₂		W14x211	62
A ₂₃		W14x176	51.8
A ₂₄		W14x145	42.7
A ₂₅		W14x132	38.8
A ₂₆		W14x99	29.1
A ₂₇		W12x87	25.6
A ₂₈		W12x72	21.1
A ₂₉		W10x49	14.4
A ₃₀		W14x370	109
A ₃₁		W14x132	38.8
A ₃₂		W14x120	35.3
A ₃₃		W10x112	32.9
A ₃₄		W10x112	32.9
A ₃₅		W14x90	26.5
A ₃₆		W10x88	25.9
A ₃₇		W14x74	21.8
A ₃₈		W12x58	17
A ₃₉		W10x49	14.4

2.3.3.396 Elemanlı Üç Boyutlu Çelik Kafes Köprü Modeli

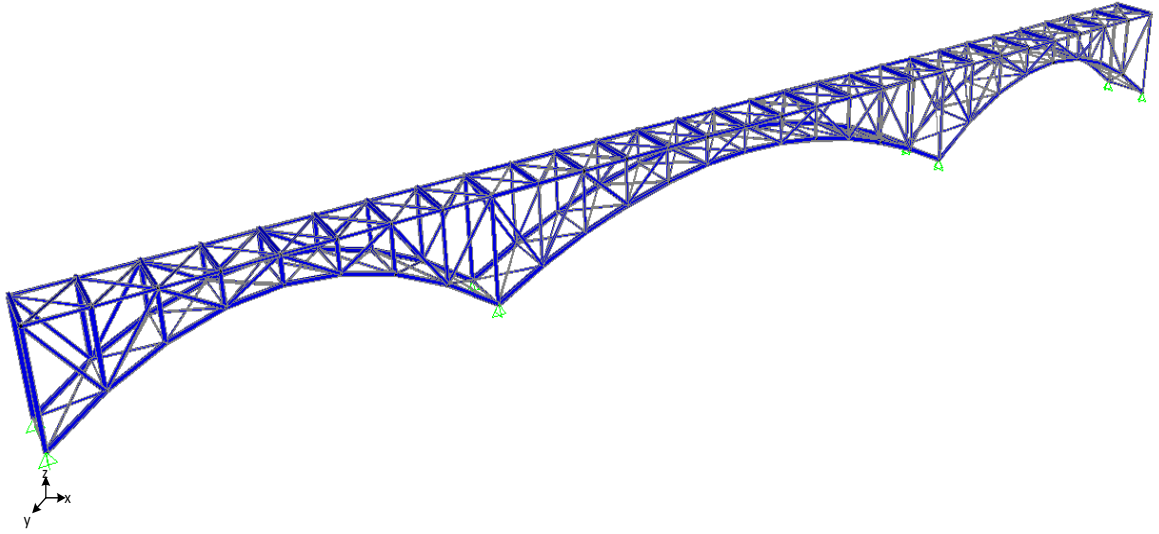
Literatürde optimum ağırlık problemi çözümünde incelenen çelik kafes köprü sistemi, 396 elemandan ve 118 düğüm noktasından oluşmaktadır (Hasançebi, 2007). Sistemin elemanları 12 gruba ayrılmıştır ve Şekil 9’da grup renklendirilmeleri gösterilmiştir. Her grup için atanan W-şekil profilleri Tablo 2’de verilmiştir. Köprünün üç boyutlu görünümü Şekil 9(a)’da, önden görünümü Şekil 9(b)’de ve üstten görünümü Şekil 9(c)’de verilmiştir.



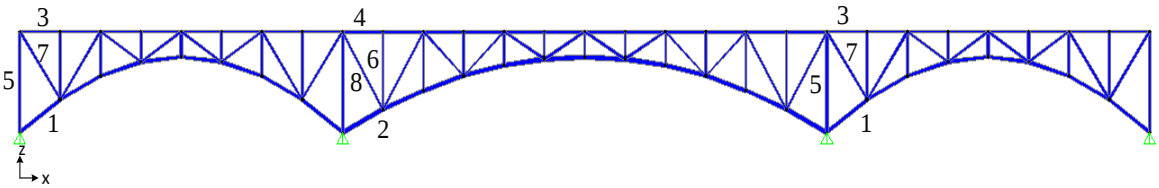
Şekil 9. 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modeli

2.4.2.396 Elemanlı Üç Boyutlu Çelik Kafes Köprünün Sonlu Elemanlar Modeli

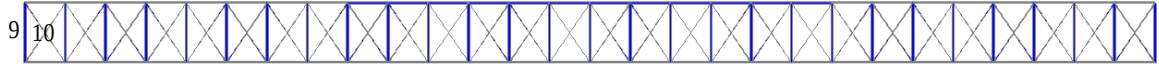
Üç boyutlu çelik kafes köprü sisteminin OSY problemi çözümünde kullanılabilmesi amacıyla SAP2000 programında modellenmiştir. Sistemin sonlu elemanlar modeli ve düğüm noktaların numaralandırılmış hali Şekil 11’de gösterilmiştir. Kafes köprü 396 elemandan ve 118 düğüm noktasından oluşmaktadır. Her düğüm noktası x, y ve z yönünde olmak üzere üç serbestlik derecesine sahiptir. Mesnet noktalarında tutulan serbestlik derecelerini çıkarınca toplamda 330 serbestlik derecesi mevcuttur. Sistemde kullanılan çeliğin elastisite modülü $E = 20 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, akma gerilmesi $F_y = 250 \text{ N/m}^2$ ve yoğunluğu ise $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, literatürde belirtildiği gibi kabul edilmiştir. SAP2000 programı ile modellenen çelik kafes köprünün üç boyutlu görünümü Şekil 11(a)’da, önden görünümü Şekil 11(b)’de, üstten görünümü Şekil 11(c)’ de ve alttan görünümü Şekil 11(d)’ de verilmiştir.



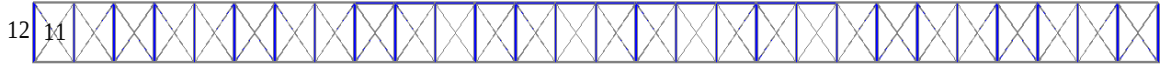
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 11. 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü sonlu elemanlar modeli



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. 17 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü

Bu çalışmada, MATLAB programı yardımıyla 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen tüm mod şekil vektörleri dikkate alınarak, sensör yerleşim optimizasyonu yapılmıştır. Sensör yerleşiminde, modal şekil vektörlerinin bağımsızlığını ve ölçüm verilerinin etkinliğini artırmak için farklı modal güvence kriteri (MAC) yaklaşımları kullanılmıştır. Bu kapsamda, sensör yerleşim optimizasyonunda mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Bağntı (33-35)'te tanımlanan amaç fonksiyonları temel alınarak, sabit mod sayısı ve değişen sensör sayılarına göre tüm olası kombinasyonlar değerlendirilmiştir. Bu yöntemle, amaç fonksiyonlarının en iyi değerlerine ulaşılması hedeflenmiş ve bu doğrultuda en uygun sensör yerleşim planı elde edilmiştir.

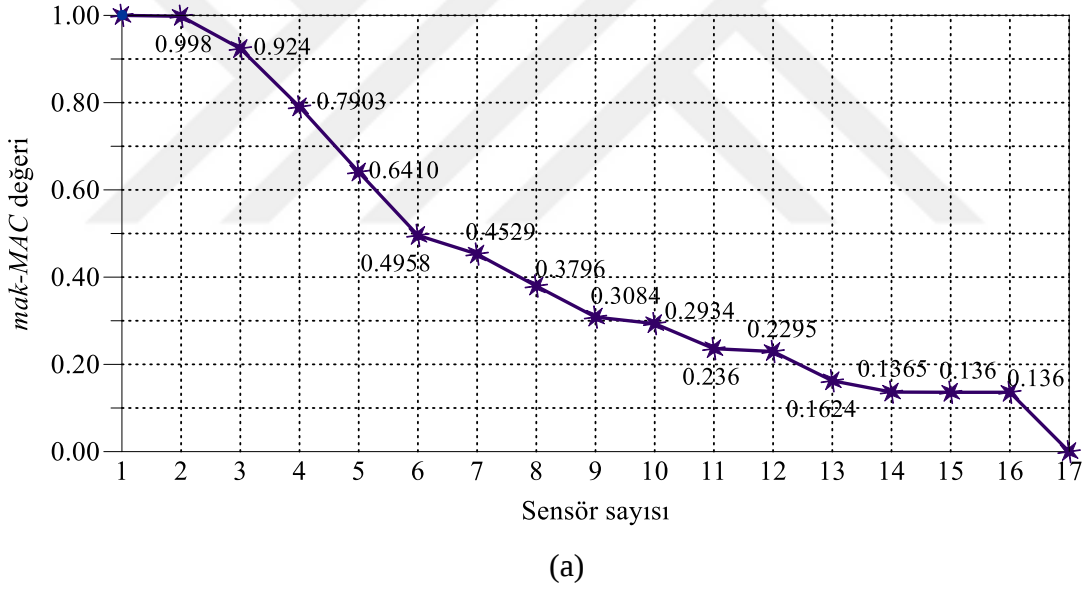
Sonuç olarak, geliştirilen yaklaşımla düzlem çelik kafes köprü sistemlerinin modal analizine dayalı sensör yerleşim çalışması, yapının dinamik davranışını etkili bir şekilde izlemek için önemli bir yöntem sunmuştur. Bu çalışma, özellikle farklı MAC yöntemlerinin kullanımıyla sensör yerleşim optimizasyonunun hassasiyetini ve verimliliğini arttıracak yeni yaklaşımlar önermektedir.

Çalışma kapsamında, 17 mod dikkate alınarak, sensör yerleşim optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Bu kapsamda, Bağntı (33)'te tanımlanan mak-MAC yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_a(x)$ ile MAC matrisinin köşegen dışı en büyük değeri minimize edilmeye çalışılmıştır. Farklı sensör sayılarında yapılan analizlerde, sensör sayısı arttıkça MAC matrisinin köşegen dışı en büyük değerinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, sensörlerin daha yoğun bir şekilde dağıtılmasının, modal bağımsızlığı arttırdığını ve izleme kapasitesini iyileştirdiğini göstermektedir. Farklı sensör sayılarına göre mak-MAC değerindeki değişim Şekil 12(a)'da sunulmaktadır.

Ayrıca, Bağntı (34)'te verilen ort-MAC yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_b(x)$ kullanılarak, farklı sensör sayılarında MAC matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasını minimize eden sensör kombinasyonları belirlenmiştir. Analizler sonucunda, sensör sayısı arttıkça MAC matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasının azaldığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, sensör yoğunluğunun artmasıyla modal ölçüm hassasiyetinin

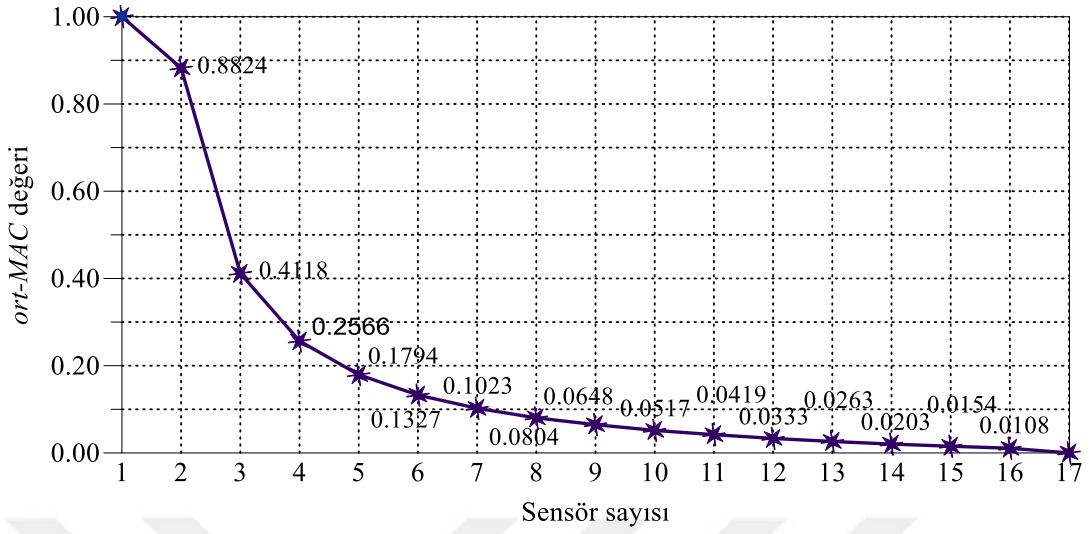
geliştirildiğini ortaya koymaktadır. Farklı sensör sayılarında ort-MAC değerindeki değişim Şekil 12(b)'de görülmektedir.

Son olarak, Bağıntı (35)'te tanımlanan rms-MAC yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_c(x)$ ile MAC matrisinin köşegen dışı değerlerinin karekök ortalamasını minimize eden sensör kombinasyonları incelenmiştir. Analizler, sensör sayısı arttıkça rms-MAC değerinin azaldığını ve modal bağımsızlığın belirgin bir şekilde iyileştirildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, sensör yerleşim optimizasyonunda rms-MAC yönteminin önemli bir performans kriteri olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Farklı sensör sayılarında rms-MAC değerindeki değişim Şekil 12(c)'de sunulmaktadır. Bu çalışmalar, sensör sayısının modal analiz üzerindeki etkilerini ve farklı MAC yaklaşımlarının sensör yerleşimindeki katkısını açık bir şekilde ortaya koyarak yapısal durum izleme çalışmalarına değerli bir rehber sunmaktadır.

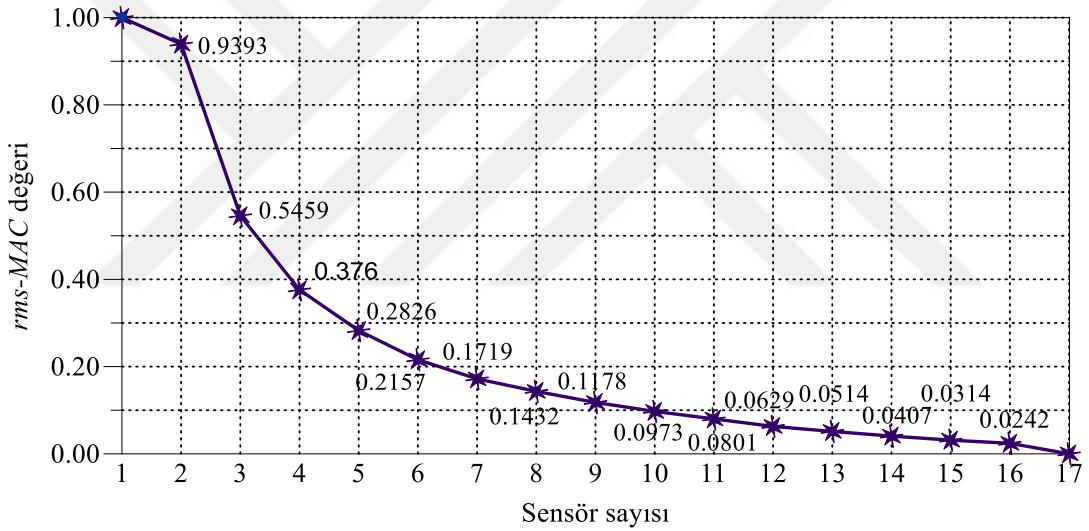


Şekil 12. Farklı sensör sayılarında (a) mak-MAC değerinin değişimi, (b) ort-MAC değerinin değişimi ve (c) rms-MAC değerinin değişimi

Şekil 12'in devamı



(b)



(c)

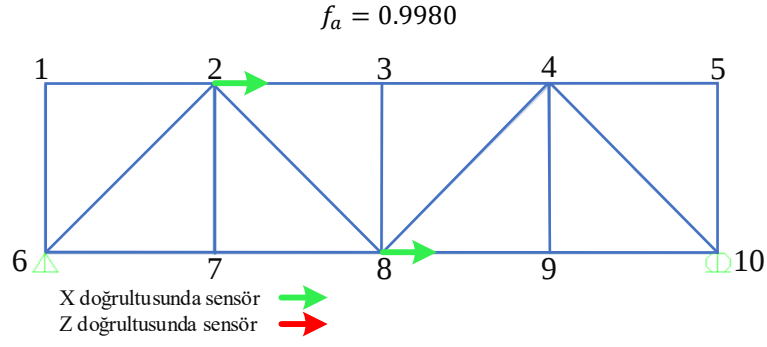
17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminde, serbestlik dereceleri 1'den 17'ye kadar numaralandırılmıştır. Sisteme yalnızca 1 adet sensör yerleştirildiğinde, 17 farklı kombinasyon oluşmakta ve bu durum, MAC matrisinin köşegen dışı en büyük değerinin her zaman 1 olmasına neden olmaktadır. Bu sonuç, tek bir sensörün mod şekil vektörlerinin bağımsızlığını sağlamada yetersiz olduğunu göstermektedir. Sensör sayısının artırılmasıyla daha anlamlı ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilceği görülmüştür. Ancak, sisteme 2 veya daha fazla sensör yerleştirildiğinde çok sayıda kombinasyon oluştuğu için, en iyi sensör yerleşimlerini belirlemek karmaşık bir problem haline gelmektedir.

Burada, farklı sensör yerleşim kombinasyonları arasında seçim yapmak için mak-MAC yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_a(x)$ kullanılmıştır. Bu optimizasyon yöntemi, MAC matrisinin köşegen dışı en büyük değerini en aza indiren sensör kombinasyonlarını belirlemede etkili bir yaklaşım sunmuştur. Bu yöntem ile sonuçlardan biri olan Şekil 13(a)'da serbestlik derecelerine sensörlerin yerleştirilmesi, optimal bir çözüm sağlayarak modal bağımsızlık açısından en etkili sonucu vermiştir. Bu sonuç, köprü sistemlerinde modal izleme süreçlerinin başarısında sensör yerleşiminin kritik bir rol oynadığını bir kez daha ortaya koymaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular, YSİ sistemlerinde sensör yerleşimi optimizasyonunun önemine dikkat çekmekte ve bu alanda daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerektiğini göstermektedir.

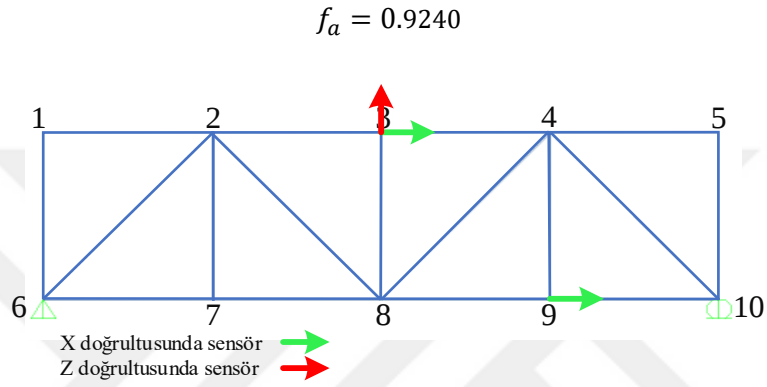
Diğer analizlerde, mak-MAC yöntemiyle optimize edilen sensör yerleşimleri Şekil 13'te detaylandırılmıştır. Aynı şekilde, ort-MAC yönteminde kullanılan $f_b(x)$ fonksiyonunun optimize edilmesiyle elde edilen en iyi sensör kombinasyonları da Şekil 14'te sunulmuştur. rms-MAC yöntemine göre optimize edilen $f_c(x)$ fonksiyonunun sonuçları ise Şekil 15'te gösterilmiştir. 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminin tüm kombinasyonlarına ait en uygun sensör yerleşimi, üç yöntemin her biri için Tablo 3'te sunulmuştur. Farklı yöntemlerin sunduğu bu optimizasyon sonuçları, her yöntemin modal bağımsızlık üzerinde farklı etkiler yaratabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.

Analizlerin genel sonuçları, sensör sayısının artmasıyla her bir yöntemin amaç fonksiyonu değerlerinin düzenli olarak azaldığını ve modal bağımsızlığın iyileştiğini göstermektedir. Özellikle sensör sayısı arttıkça, mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC yöntemlerinin önerdiği sensör konumlarının daha fazla ortak noktada kesiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sensör yerleşiminde yöntemle bağlı farklılıkların başlangıçta belirgin olmasına rağmen, sensör yoğunluğunun artmasıyla bu farkların azaldığını işaret etmektedir.

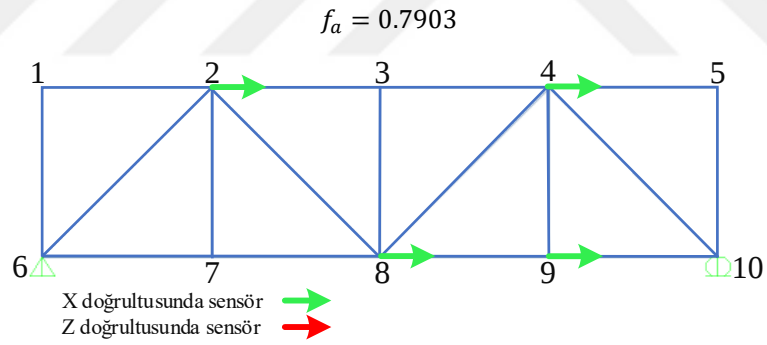
Her yöntemin temel amacı, mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı artırmak olsa da kullanılan stratejilerinin farklılıkları nedeniyle önerilen sensör yerleşimlerinin çeşitlilik gösterdiği görülmüştür. Bu bulgu, sensör yerleşim yöntemi seçiminin, yapının dinamik özelliklerine ve izleme amacına uygun olarak yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, YSİ sistemlerinde sensör yerleşim stratejilerinin dikkatle belirlenmesi, güvenilir ve etkili sonuçlar elde etmek açısından kritik bir öneme sahip olmaktadır.



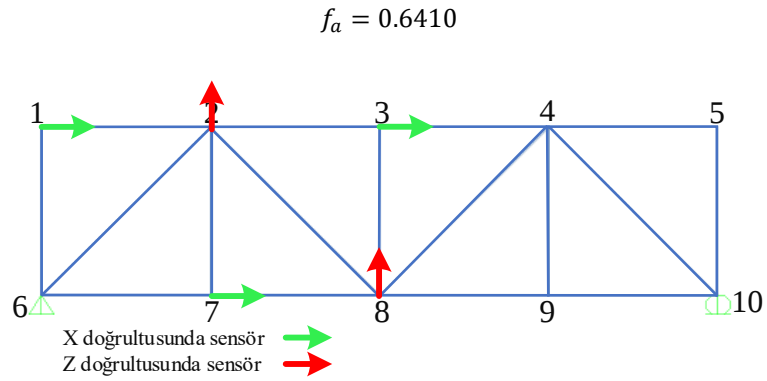
(a) İki sensör için en uygun yerleşim



(b) Üç sensör için en uygun yerleşim



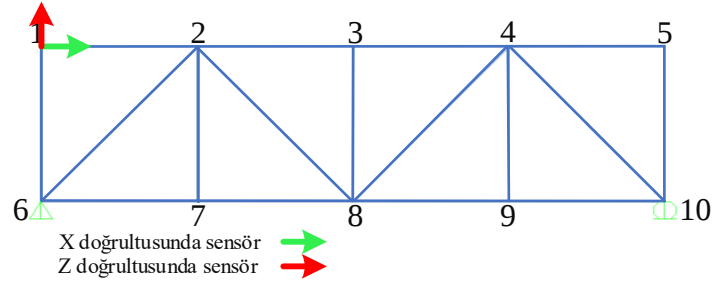
(c) Dört sensör için en uygun yerleşim



(d) Beş sensör için en uygun yerleşim

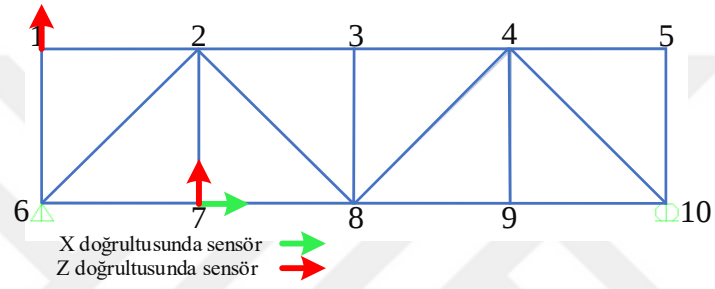
Şekil 13. mak-MAC yöntemi ile yerleştirilen sensör konumları

$$f_b = 0.8824$$



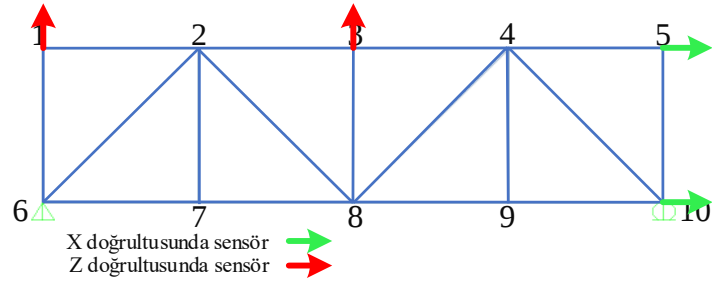
(a) İki sensör için en uygun yerleşim

$$f_b = 0.4118$$



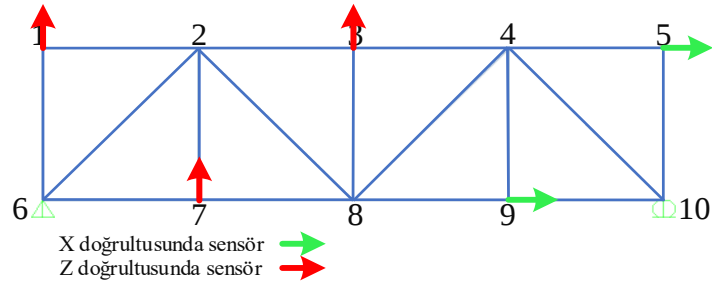
(b) Üç sensör için en uygun yerleşim

$$f_b = 0.2566$$



(c) Dört sensör için en uygun yerleşim

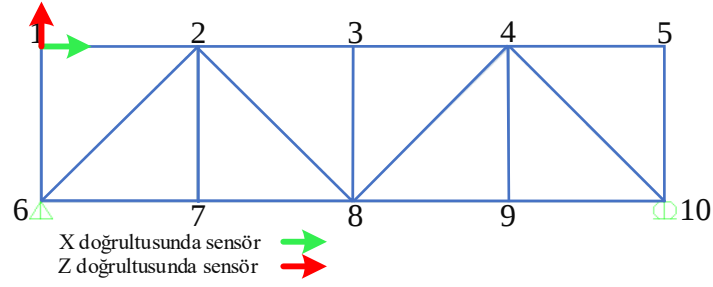
$$f_b = 0.1794$$



(d) Beş sensör için en uygun yerleşim

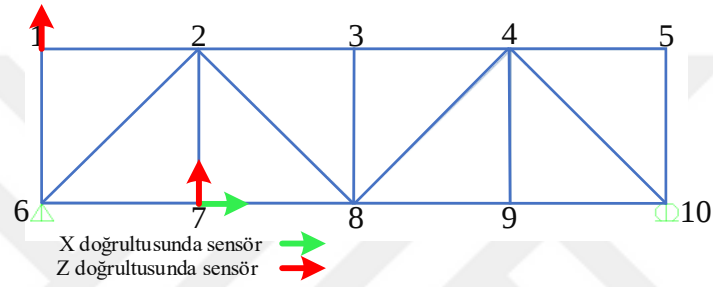
Şekil 14. ort-MAC yöntemi ile yerleştirilen sensör konumları

$$f_c = 0.9393$$



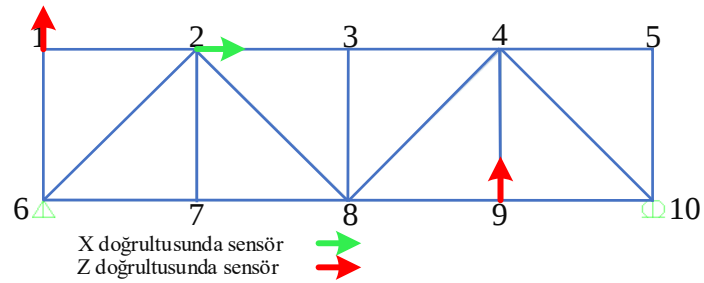
(a) İki sensör için en uygun yerleşim

$$f_c = 0.5459$$



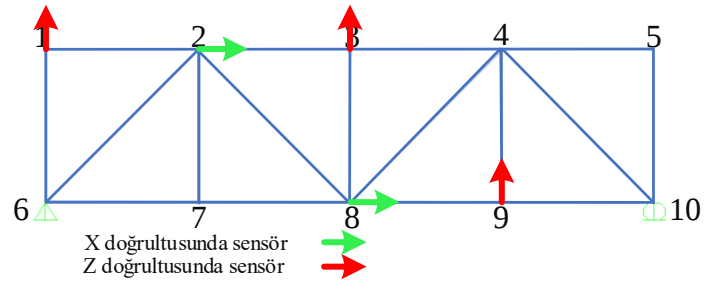
(b) Üç sensör için en uygun yerleşim

$$f_c = 0.3760$$



(c) Dört sensör için en uygun yerleşim

$$f_c = 0.2826$$



(d) Beş sensör için en uygun yerleşim

Şekil 15. rms-MAC yöntemi ile yerleştirilen sensör konumları

Tablo 3. 17 elemanlı düzlem çelik kafes köprü sisteminin sensör konumları

Sensör kombinasyonları	f_a	f_b	f_c	Kombinasyon f_a	Kombinasyon f_b	Kombinasyon f_c
17-2	0.9980	0.8824	0.9393	2x-8x	1x-1y	1x-1y
17-3	0.9240	0.4118	0.5459	3x-3y-9x	1y-7x-7y	1y-2x-9y
17-4	0.7903	0.2566	0.3760	2x-4x-8x-9x	1y-3y-5x-10x	1y-3y-5x-10x
17-5	0.6410	0.1794	0.2826	1x-2y-3x-7x-8y	1y-3y-5x-7y-9x	1y-2x-3y-8x-9y
17-6	0.4958	0.1327	0.2157	3x-3y-4y-5x-7x-9y	1y-4x-4y-8y-9x-10x	1y-2y-3x-5x-7x-10x
17-7	0.4529	0.1023	0.1719	3x-3y-4y-5x-7x-16-10x	1y-3x-3y-4x-7y-9y-10x	1x-1y-2y-5x-8y-9x-10x
17-8	0.3796	0.0804	0.1432	1x-4x-4y-5x-5y-8y-9x-10x	1y-3x-3y-4x-12-9x-9y-10x	1y-2y-3x-3y-5x-7x-7y-10x
17-9	0.3084	0.0648	0.1178	1x-4x-4y-5x-5y-7x-8y-9x-10x	1y-3x-3y-4x-5y-7y-9x-9y-10x	1y-2y-3x-3y-4x-5x-7x-7y-10x
17-10	0.2934	0.0517	0.0973	1x-2x-2y-4x-5x-5y-8x-8y-9x-10x	1x-1y-3y-5x-5y-7x-7y-9x-9y-10x	1x-1y-2y-7-5x-5y-7x-8y-9x-10x
17-11	0.2360	0.0419	0.0801	2x-2y-3x-3y-4x-4y-5y-7y-8x-9x-10x	1x-1y-3x-3y-5x-5y-7x-7y-9x-9y-10x	1y-2y-3x-3y-4x-4y-5y-7x-7y-9x-10x
17-12	0.2295	0.0333	0.0629	2x-2y-3x-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8x-8y-10x	1x-1y-3x-3y-4y-5x-5y-7x-7y-9x-9y-10x	1y-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-9x-10x
17-13	0.1624	0.0263	0.0514	1x-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-9x-10x	1x-1y-3x-3y-4y-5x-5y-7x-7y-8y-9x-9y-10x	1y-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-9x-10x
17-14	0.1365	0.0203	0.0407	1x-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-8y-9x-9y-10x	1x-1y-2y-3x-3y-4x-5x-5y-7x-7y-8y-9x-9y-10x	1x-1y-2x-2y-3x-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8y-9x-10x
17-15	0.1360	0.0154	0.0314	1x-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8y-9x-9y-10x	1x-1y-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8y-9x-9y-10x	1x-1y-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8y-9x-10x
17-16	0.1360	0.0108	0.0242	1x-1y-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8y-9x-9y-10x	1x-1y-2y-3x-3y-4x-4y-9-5x-5y-7y-8x-8y-9x-9y-10x	1x-1y-2x-2y-3x-3y-4x-4y-5x-5y-7x-7y-8x-8y-9x-10x

3.2. 77 Elemanlı Düzlem Çelik Kafes Köprü

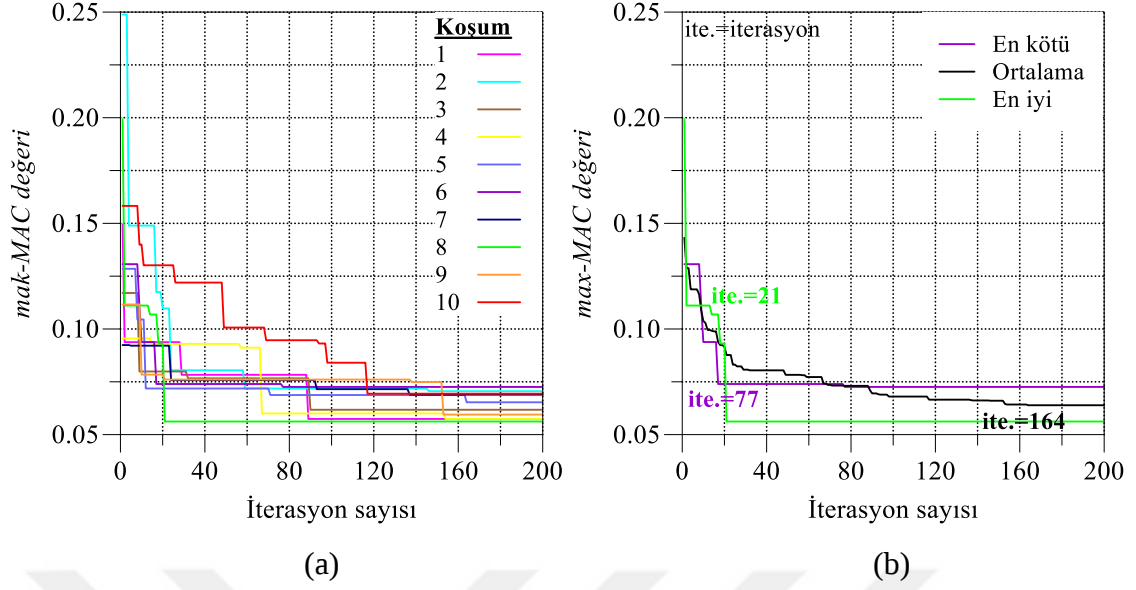
Bu bölümde, 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü modelinin optimum sensör sayısının belirlenmesi ve en uygun sensör konumlarının yerleşimi üzerine odaklanılmıştır. Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için Bölüm 2’de detayları verilen ve tez çalışması kapsamında oluşturulan program kullanılmıştır.

Analizlere başlanmadan önce bazı kritik parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler örnek olarak seçilen köprünün mod sayısı, modal kütle katılım oranı, periyot ve modal yer değiştirmeleridir. Bu parametreler örnek olarak seçilen köprünün SAP2000 programında gerçekleştirilen modal analizi sonucunda elde edilmekte olup yapının dinamik davranışına ilişkin temel bilgileri sunmaktadır. Burada özellikle modal kütle katılım oranları üzerine odaklanılmış ve modal kütle katılım oranının %90’ını kapsayan modların yeterli olduğu kabul edilmiştir (Karlsson ve Nilsson 2007). Modal kütle katılım oranı, bir yapının her bir titreşim modunun toplam kütlenin hareketine ne kadar katkıda bulunduğunu göstermekte ve hangi modların kritik olduğunu belirlemede önemli bir kriter olmaktadır. Bu çalışmada, çelik kafes köprü modelinde x ve z yönlerinde modal kütle katılım oranı 4. modda %90’a ulaştığı için ilk 4 mod önemli mod olarak seçilmiştir.

Oluşturulan programda sensör sayısının belirlenmesinde bu örnek için optimizasyon parametreleri; popülasyon büyüklüğü 100, iterasyon sayısı 200 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenmesinde, farklı popülasyon büyüklükleri üzerinde çeşitli deneyler gerçekleştirilmiş ve uygun optimizasyon parametrelerinin sağlandığı sonuç ele alınmıştır. Toplam koşum sayısı da 10 olarak dikkate alınmıştır.

Bağıntı (33)’te ifade edilen ve MAC matrisindeki köşegen dışındaki en büyük değeri azaltmayı hedefleyen amaç fonksiyonu, farklı sensör sayıları için optimize edilmiştir. Bu süreçte, MAC matrisindeki diyagonal olmayan elemanların maksimum değeri 0.20-0.25 aralığında olan sensör sayısı yeterli kabul edilmiştir (Carne ve Dohrmann 1995). MAC matrisinin diyagonal olmayan elemanlarının sıfıra yaklaşması, mod şekli vektörlerinin bağımsızlığının artışına işaret etmektedir.

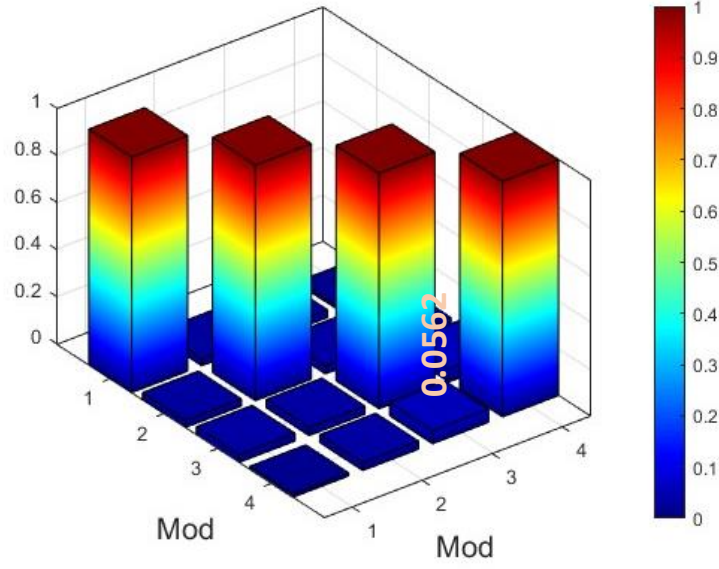
Farklı sensör sayılarında mak-MAC değerlerinin değişimi Şekil 16’da gösterilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, 0.20-0.25 aralığındaki kabul edilebilir mak-MAC değerine ulaşan ilk sensör sayısı 3 olarak tespit edilmiş ve bu sayının önemli modları izlemek için yeterli olduğu görülmüştür. Ancak literatürde bulunan bazı çalışmalarda, seçilen mod sayısının izlenebilmesi için sensör sayısının en az mod sayısı kadar olması



Şekil 17. 77 elemanlı çelik köprünün (a) mak-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları

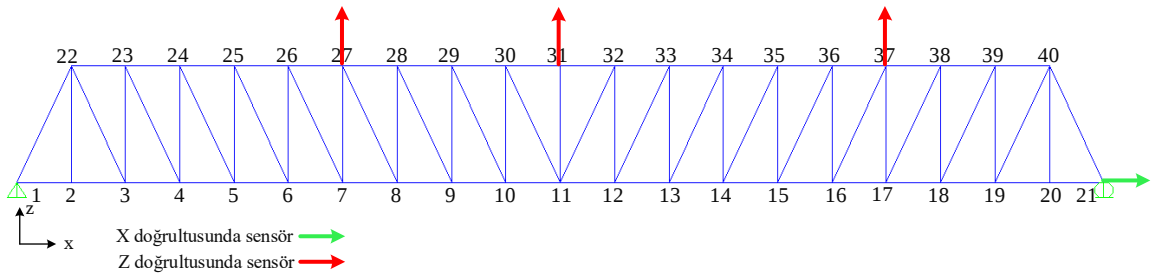
77 elemanlı çelik kafes köprü sistemine yerleştirilecek 4 sensörün konumlarına ilişkin, mak-MAC yönteminin amaç fonksiyonu ile Koşum-8’de elde edilen en iyi MAC matrisi Bağıntı (37)’de sunulmuştur. Bu matriste, köşegen dışındaki en büyük değer 0.0562 olarak tespit edilmiştir. Şekil 18’de mak-MAC matrisinin üç boyutlu grafiği gösterilmiştir.

$$MAC = \begin{bmatrix} 1 & 0.0301 & 0.0330 & 0.0134 \\ 0.0301 & 1 & 0.0351 & 0.0340 \\ 0.0330 & 0.0351 & 1 & 0.0562 \\ 0.0134 & 0.0340 & 0.0562 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$



Şekil 18. 77 elemanlı çelik köprünün optimum mak-MAC değeri

Koşum-8'den elde edilen optimum sensör konumları çelik köprünün 21x, 27z, 31z ve 37z serbestlik dereceleri olarak belirlenmiş ve Şekil 19'da gösterilmiştir. Her koşumda elde edilen mak-MAC değerleri, bu değerlerin iterasyon sayısı ve analiz sayısı Tablo 4'te verilmiştir. Analiz sayısı, en iyi sonucun elde edilmesi için gerçekleştirilen analizlerin toplam sayısını ifade etmektedir. Bu değer, popülasyon büyüklüğü ile en iyi çözümün bulunduğu iterasyon sayısının çarpımına, popülasyon büyüklüğünün eklenmesiyle hesaplanmaktadır. Tablo 4'te, Koşum-8 için analiz sayısı $100 + 100 \times 21 = 2200$ olarak hesaplanmıştır.



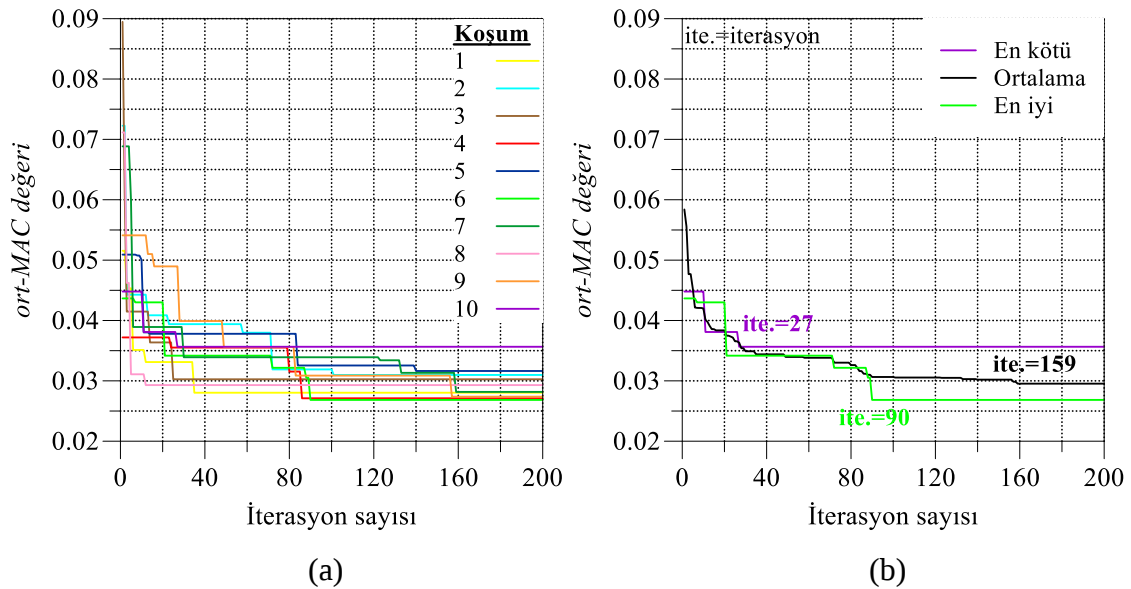
Şekil 19. 77 elemanlı çelik köprüsünde, mak-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları

Tablo 4. 77 elemanlı çelik köprüde analiz sonucunda elde edilen mak-MAC değerleri

Koşum No	mak-MAC değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0574	89	9000
2	0.0706	146	14700
3	0.0618	90	9100
4	0.0574	154	15500
5	0.0653	164	16500
6	0.0726	77	7800
7	0.0689	137	13800
8*	0.0562	21	2200
9	0.0595	153	15400
10	0.0694	117	11800

* En iyi sonuca ulaşan koşum

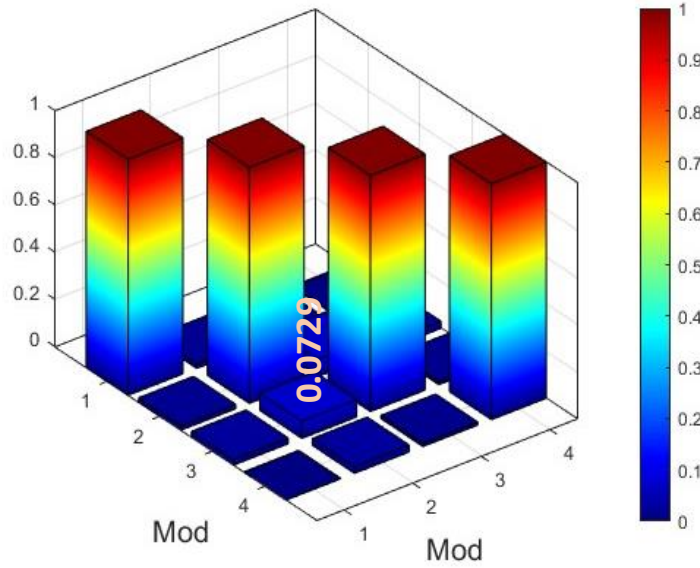
Sisteme yerleştirilecek 4 sensörün en uygun konumlarının belirlenmesi için yürütülen optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonu olarak kullanılan ort-MAC yöntemiyle elde edilen yakınsama grafiği Şekil 20(a)'da sunulmuştur. Bu yöntemin optimizasyonunda, popülasyon büyüklüğü 100, iterasyon sayısı ise 200 olarak belirlenmiş olup toplamda 10 koşum gerçekleştirilmiştir. Grafikler incelendiğinde, en iyi koşuma en hızlı yakınsayan Koşum-6'da (90. İterasyon) elde edilirken, en kötü ise Koşum-10'da (27. İterasyon) gözlemlenmiştir. Tüm koşumların ortalamasını gösteren grafik ise Şekil 20(b)'de verilmiştir.



Şekil 20. 77 elemanlı çelik köprünün (a) ort-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları

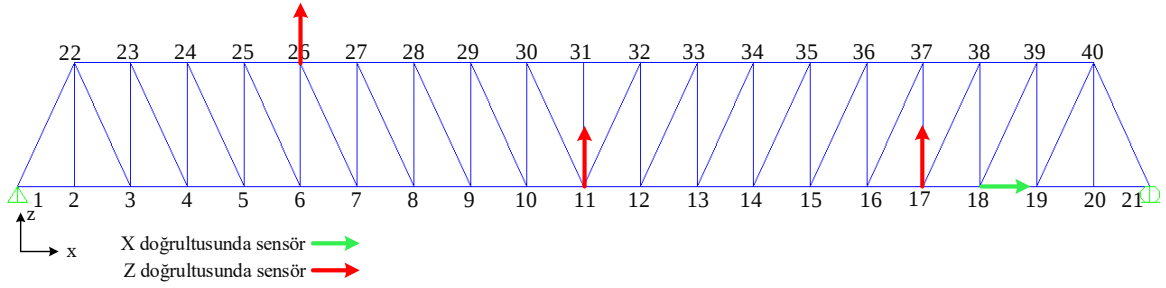
77 elemanlı çelik köprü sistemine yerleştirilecek 4 sensörün konumlarına ilişkin, ort-MAC yönteminin amaç fonksiyonu ile Koşum-6'da elde edilen en iyi MAC matrisi Bağıntı (38)'de sunulmuştur. Bu matriste, köşegen dışındaki en büyük değer 0.0729 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, mak-MAC yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ort-MAC yöntemiyle belirlenen sensör konumlarının, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını sağlamada mak-MAC yöntemine kıyasla daha düşük bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, ort-MAC yönteminin doğrusal bağımsızlık kriterlerini tam anlamıyla karşılayamadığını ve sensör yerleşiminde mak-MAC yöntemine göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 21'de ort-MAC matrisinin üç boyutlu grafiği gösterilmiştir.

$$MAC = \begin{bmatrix} 1 & 0.0192 & 0.0247 & 0.0018 \\ 0.0192 & 1 & \mathbf{0.0729} & 0.0292 \\ 0.0247 & 0.0729 & 1 & 0.0584 \\ 0.0018 & 0.0292 & 0.0132 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$



Şekil 21. 77 elemanlı çelik köprünün optimum ort-MAC değeri

Koşum-6'dan elde edilen optimum sensör konumları çelik köprünün 11z, 17z, 18x ve 26z serbestlik dereceleri olarak belirlenmiş ve Şekil 22'de gösterilmiştir. Her bir koşumda elde edilen ort-MAC değerleri ile bu değerlerin iterasyon ve analiz sayılarına ilişkin bilgiler Tablo 5'te sunulmuştur.



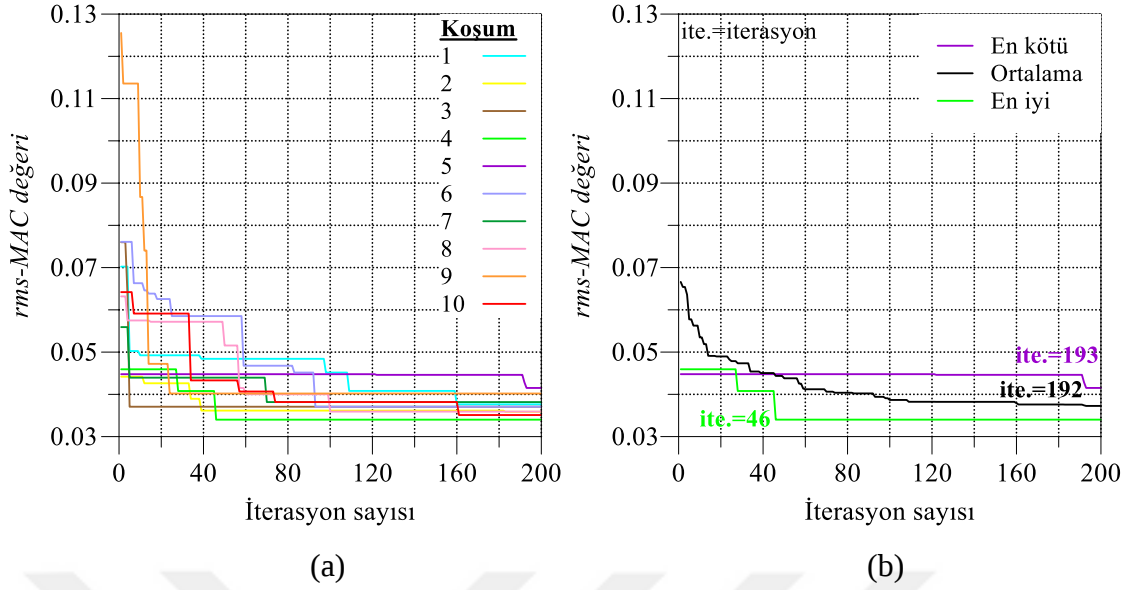
Şekil 22. 77 elemanlı çelik köprüde, ort-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları

Tablo 5. 77 elemanlı çelik köprüde analiz sonucunda elde edilen ort-MAC değerleri

Koşum No	ort-MAC değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0280	35	3600
2	0.0310	101	10200
3	0.0303	25	2600
4	0.0271	86	8700
5	0.0316	140	14100
6*	0.0268	90	9100
7	0.0282	159	16000
8	0.0293	12	1300
9	0.0274	157	15800
10	0.0356	27	2800

* En iyi sonuca ulaşan koşum

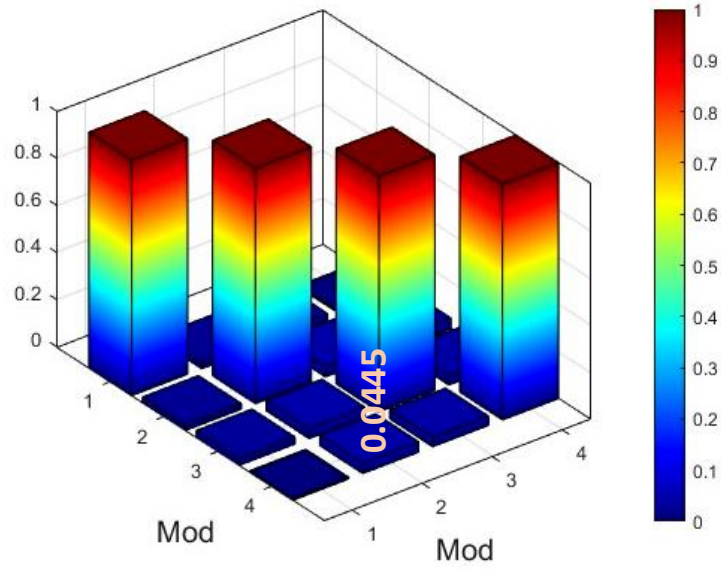
Son aşamada, sisteme yerleştirilecek 4 sensörün en uygun konumlarının belirlenmesi için yürütülen optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonu olarak kullanılan rms-MAC yöntemiyle elde edilen yakınsama grafiği Şekil 23(a)'da sunulmuştur. Bu yöntemin optimizasyonunda, popülasyon büyüklüğü 100, iterasyon sayısı ise 200 olarak belirlenmiş olup toplamda 10 koşum gerçekleştirilmiştir. Grafikler incelendiğinde, en iyi koşuma en hızlı yakınsayan Koşum-4'te (46. İterasyon) elde edilirken, en kötü ise Koşum-5'te (193. İterasyon) gözlemlenmiştir. Tüm koşumların ortalama performansını gösteren grafik ise Şekil 23(b)'de verilmiştir.



Şekil 23. 77 elemanlı çelik köprünün (a) rms-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları

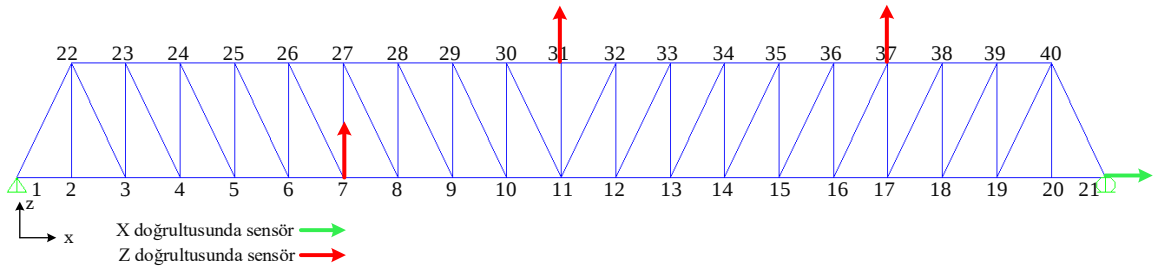
77 elemanlı çelik köprü sistemine yerleştirilecek 4 sensörün konumlarını belirlemek amacıyla rms-MAC yönteminin amaç fonksiyonu kullanılarak, Koşum-4'te elde edilen en iyi MAC matrisi Bağıntı (39)'da sunulmuştur. Bu matriste, köşegen dışındaki en büyük değer 0.0445 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, mak-MAC yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, rms-MAC yöntemiyle belirlenen sensör konumlarının, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını sağlamada mak-MAC yöntemine kıyasla daha iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, mak-MAC yönteminin doğrusal bağımsızlık kriterlerini tam anlamıyla karşılayamadığını ve sensör yerleşiminde rms-MAC yöntemine göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, rms-MAC yöntemiyle elde edilen köşegen dışı en büyük değer, ort-MAC yöntemiyle elde edilen değerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, rms-MAC yönteminin sensör konumlarını belirlemede mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını sağlamada ort-MAC yöntemine kıyasla daha yüksek bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 24'te ort-MAC matrisinin üç boyutlu grafiği gösterilmiştir.

$$MAC = \begin{bmatrix} 1 & 0.0240 & 0.0299 & 0.0075 \\ 0.0240 & 1 & 0.0432 & 0.0445 \\ 0.0299 & 0.0432 & 1 & 0.0395 \\ 0.0075 & 0.0445 & 0.0395 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$



Şekil 24. 77 elemanlı çelik köprünün optimum rms-MAC değeri

Koşum-4'ten elde edilen optimum sensör konumları çelik köprünün 7z, 21x, 31z ve 37z serbestlik dereceleri olarak belirlenmiş ve Şekil 25'te gösterilmiştir. Her bir koşumda elde edilen ort-MAC değerleri ile bu değerlerin iterasyon ve analiz sayılarına ilişkin bilgiler Tablo 6'da sunulmuştur.



Şekil 25. 77 elemanlı çelik köprüsünde, rms-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları

Tablo 6. 77 elemanlı çelik köprüsünde analiz sonucunda elde edilen rms-MAC değerleri

Koşum No	rms-MAC değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0376	160	16100
2	0.0359	183	18400
3	0.0371	161	16200
4*	0.0340	46	4700
5	0.0415	193	19400
6	0.0371	93	9400
7	0.0382	70	7100
8	0.0359	100	10100
9	0.0402	24	2500
10	0.0351	161	16200

* En iyi sonuca ulaşan koşum

77 elemanlı çelik köprü sistemde mak-MAC ort-MAC ve rms-MAC için kullanılan yöntem, önemli mod sayısı, optimum sensör sayısı, en iyi koşum ve optimum sensör konumları Tablo 7’de verilmiştir. Sistemde elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, bu örnek sistem için 10 koşumda en iyi performansı sergileyen amaç fonksiyonunun rms-MAC olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7. 77 elemanlı çelik köprü sistemi için elde edilen optimum sensör konumları

Yöntem	Önemli mod sayısı	Sensör sayısı	En iyi koşum	MAC değeri	Optimum sensör konumları
mak-MAC	4	4	Koşum-8	0.0562	21x-27z-31z-37z
ort-MAC	4	4	Koşum-6	0.0729	11z-17z-18x-26z
rms-MAC*	4	4	Koşum-4	0.0445	7z-21x-31z-37z

* Mac değerine göre en iyi sonucu veren yöntem

3.3. 396 Elemanlı Üç Boyutlu Çelik Kafes Köprü

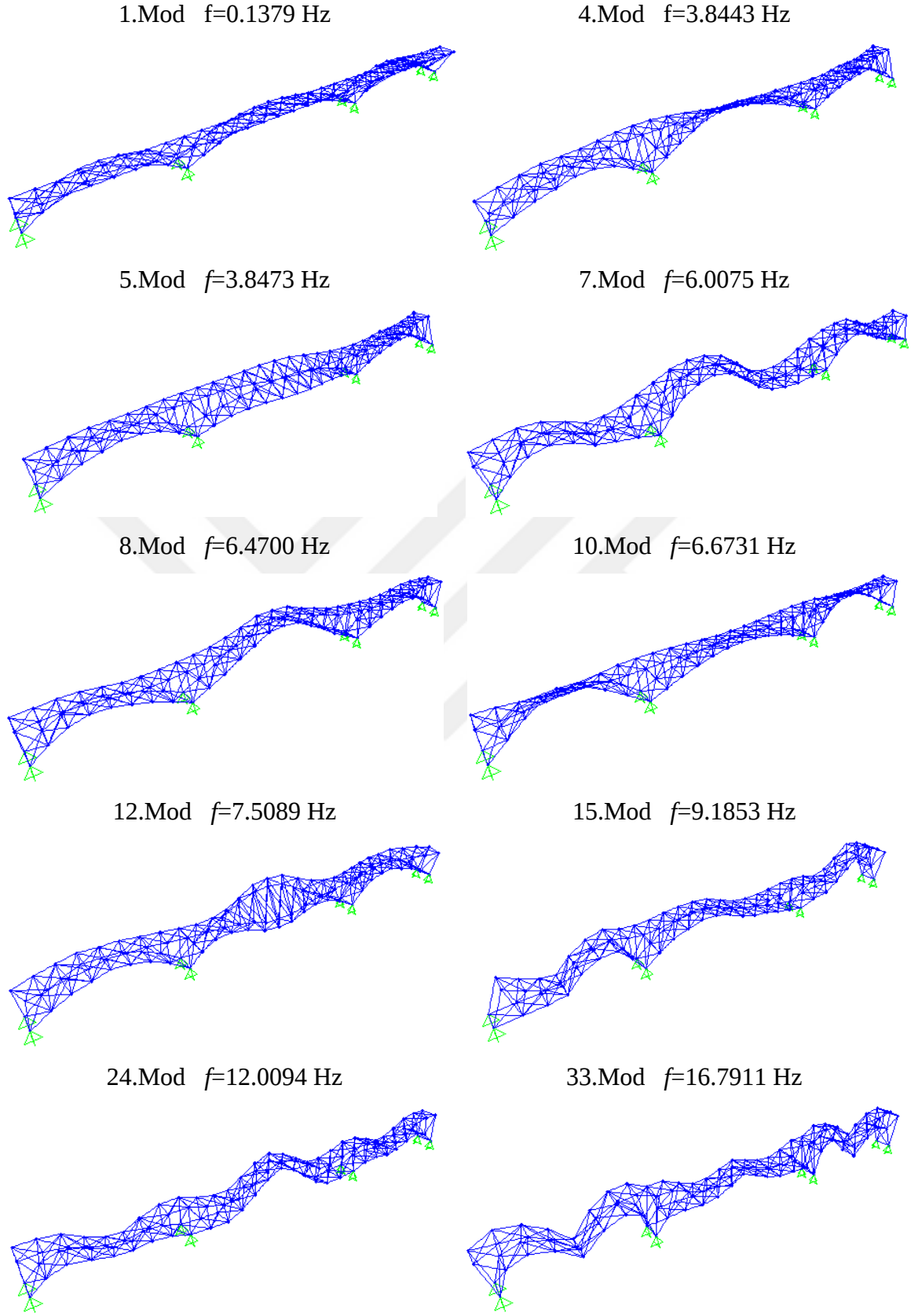
Bu bölümde, 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modelinin optimum sensör sayısının belirlenmesi ve en uygun sensör konumlarının yerleşimi üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için Bölüm 2’de detayları verilen ve tez çalışması kapsamında oluşturulan program kullanılmıştır.

Analizlere başlanmadan önce bazı kritik parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler örnek olarak seçilen köprünün mod sayısı, modal kütle katılım oranı, periyot ve modal yer değiştirmeleridir. Bu parametreler örnek olarak seçilen köprünün SAP2000 programında gerçekleştirilen modal analizi sonucunda elde edilmekte olup yapının dinamik davranışına ilişkin temel bilgileri sunmaktadır. Burada özellikle modal kütle katılım oranları üzerine odaklanılmıştır. Bu köprü modeli için ilk etapta, 3 yönde (x, y ve z) modal kütle katılım oranının %90’ını kapsayan modların yeterli olduğu kabul edilmiştir (Karlsson ve Nilsson 2007). Modelde yapılan incelemeler sonucunda, 3 yönde de modal kütle katılım oranının %90’ını kapsayan 71. modun olduğu görülmüştür. Bu kadar fazla modun dikkate alınabilmesi için çok sayıda sensöre ihtiyaç duyulabilmekte, bu da aşırı sensör kullanımını gerektirmektedir. Ancak sensör sayısının artması, maliyetler artmasına, önemli farkların ayırt edilememesi problemlerine ve değerlendirme sonuçlarında önemli hata paylarına yol açabilmektedir (Liu vd., 2018). Bu durum, yapılan işlemleri karmaşık hale getirebilmekte ve analizin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Sadece modal katılım oranının bir yönde %90’a ulaştığı yön dikkate alındığı zaman ise (y yönünde ilk 9 mod) diğer yönlerdeki önemli modlar dikkate alınmamış olunacaktır. Bu sorunları aşabilmek için farklı bir yaklaşım ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, modal analizde dikkate alınacak modların belirlenmesinde, "etkili modal kütle katılım oranı" yöntemi temel alınmıştır. Bu yöntem, bir yapının titreşim hareketini en iyi şekilde temsil eden modları seçmek için geliştirilmiştir. Her modun, yapının dinamik tepkisine olan katkısını ölçmek amacıyla etkili modal kütle hesaplanmaktadır. Bu değer, her bir modun yapının toplam kütlelerine göre ne kadar etki yarattığını ifade etmektedir. Ancak tüm modların dinamik tepkiler üzerindeki etkisi eşit değildir; genellikle düşük sıralı modlar yapının titreşim hareketinde en büyük katkıyı sağlamaktadır. Bu nedenle, yalnızca önemli modların seçilmesi hem hesaplamaları sadeleştirmekte hem de analizin doğruluğunu artırmaktadır. Seçim sürecinde, modların katkılarının toplamı (kümülatif etkisi), yapının toplam dinamik tepkisinin %90’ına ulaşana kadar modlar tek tek eklenmektedir. Modlar eklenirken %10 artışlık oranın olduğu sıçramalardaki modlar dikkate alınmaktadır. Bu eşik,

yapı titreşim hareketinin büyük bir kısmını açıklamak için yeterli bir temsil gücünü garanti etmektedir. Böylece, yalnızca yapı dinamiği üzerinde önemli etkisi olan ana modlar belirlenirken, daha az etkili olan yüksek sıralı modlar analiz dışında bırakılmaktadır. Bu yaklaşım, modal analizin verimli bir şekilde yürütülmesini sağlamakta ve sensör yerleştirme optimizasyonu için sağlam bir temel sunmaktadır. Sonuç olarak, yalnızca gerekli ve anlamlı verilerin işlenmesiyle analiz süresi kısaltılmakta, maliyetler azaltılmakta ve dinamik yanıtın hassas bir şekilde anlaşılması sağlanmaktadır (Zhang vd., 2014). Bu çalışmada, çelik kafes köprü modelinde modal kütle katılım oranının x, y ve z yönlerinde %90'ına ulaştığı 1., 4., 5., 7., 8., 10., 12., 15., 24., 33., 35., 42., 48., 57., 58. ve 71. modlar dikkate alınmıştır. Seçilen 16 moda ait bilgiler Tablo 8'de verilmekte olup Şekil 26'da seçilen modların mod şekilleri gösterilmektedir.

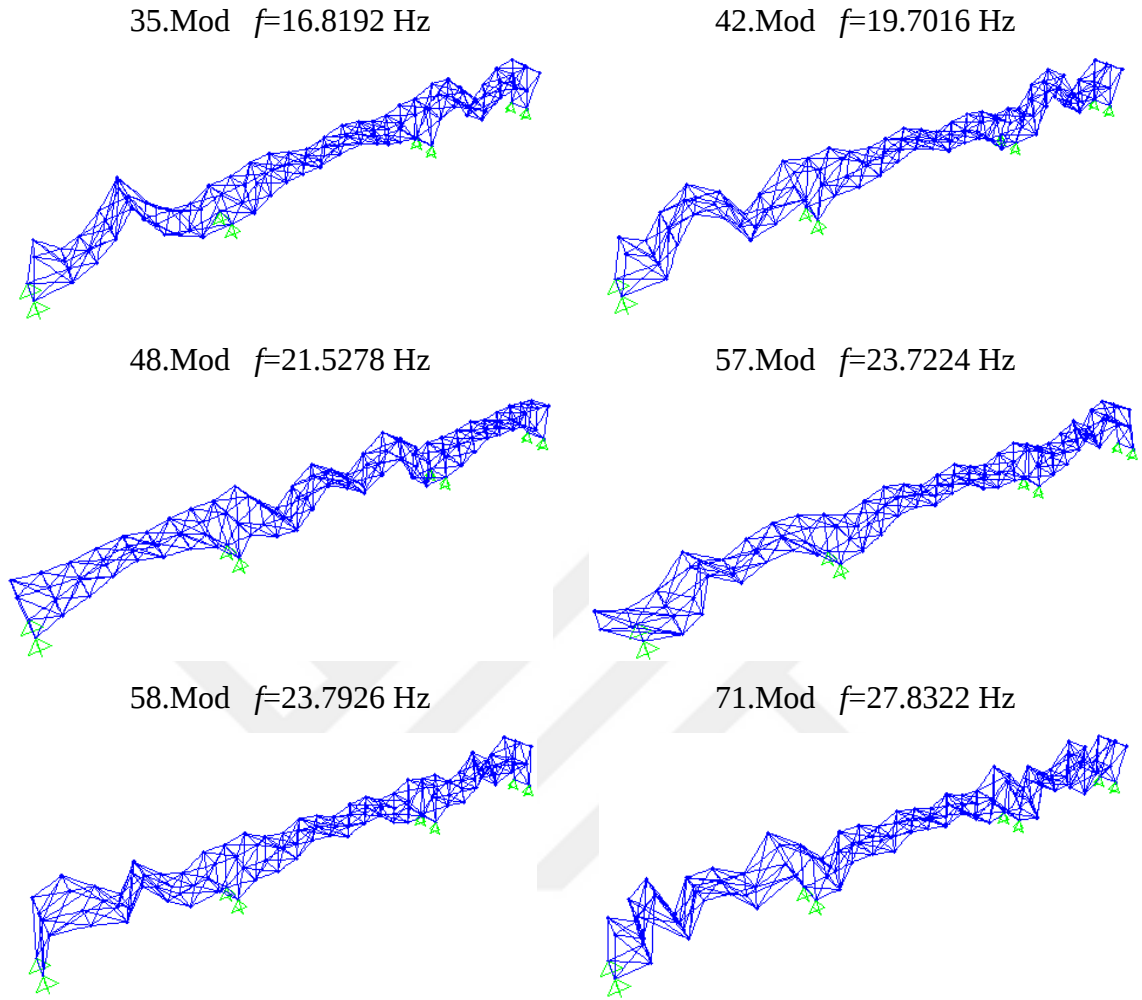
Tablo 8. Seçilen ana modlar ve modal kütle katılım oranları

x yönünde		y yönünde		z yönünde	
Seçilen modlar	Kütle katılım oranı	Seçilen modlar	Kütle katılım oranı	Seçilen modlar	Kütle katılım oranı
7	%26.88	1	%54.12	8	%26.18
15	%34.99	4	%60.48	24	%72.17
35	%39.32	5	%71.89	33	%87.47
42	%59.93	10	%87.29	58	%94.84
48	%81.18	12	%92.47		
57	%87.41				
71	%91.09				



Şekil 26. Seçilen 16 moda ait mod şekilleri

Şekil 26'nın devamı

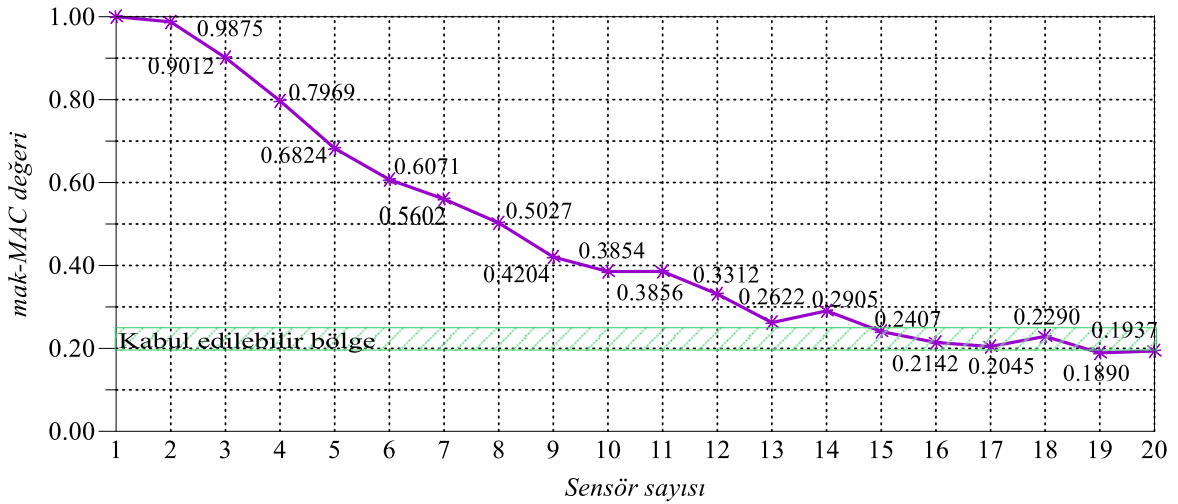


Oluşturulan programda sensör sayısının belirlenmesinde bu örnek için optimizasyon parametreleri; popülasyon büyüklüğü 100, iterasyon sayısı 200 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenmesinde, farklı popülasyon büyüklükleri üzerinde çeşitli denemeler gerçekleştirilmiş ve uygun optimizasyon parametrelerinin sağlandığı sonuç ele alınmıştır. Toplam koşum sayısı da 10 olarak dikkate alınmıştır.

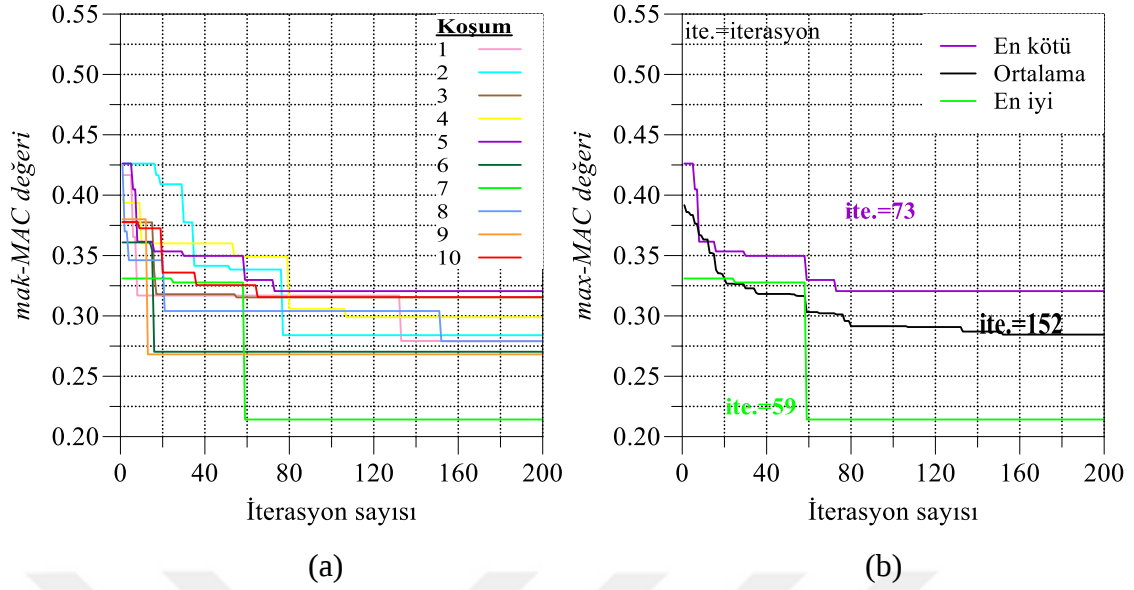
Bağıntı (33)'te ifade edilen ve MAC matrisindeki köşegen dışındaki en büyük değeri azaltmayı hedefleyen amaç fonksiyonu, farklı sensör sayıları için optimize edilmiştir. Bu süreçte, MAC matrisindeki diyagonal olmayan elemanların maksimum değeri 0.20-0.25 aralığında olan sensör sayısı yeterli kabul edilmiştir (Carne ve Dohrmann 1995). MAC matrisinin diyagonal olmayan elemanlarının sıfıra yaklaşması, mod şekli vektörlerinin bağımsızlığının artışına işaret etmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen yaklaşımla mod şekli vektörlerinin yeterli bağımsızlığa ulaşması öngörülmüştür.

Farklı sensör sayılarında mak-MAC değerlerinin değişimi Şekil 27’de gösterilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, 0.20-0.25 aralığındaki kabul edilebilir mak-MAC değerine ulaşan ilk sensör sayısı 15 olarak tespit edilmiş ve bu sayının önemli modları izlemek için yeterli olduğu görülmüştür. Ancak literatürde bulunan bazı çalışmalarda, seçilen mod sayısının izlenebilmesi için sensör sayısının en az mod sayısı kadar olması gerektiği belirtilmiştir (Li vd., 2007; Yi vd., 2012; Prabhu ve Atamturktur, 2013; Topkaraoglu, 2017). Bu doğrultuda, sistemin dinamik karakteristiklerini doğru bir şekilde izleyebilmek ve modal bilgilerin güvenilirliğini artırmak amacıyla sensör sayısı 16 olarak belirlenmiştir. Toplam 16 sensör ile mak-MAC değeri 0.2142’ye ulaşılmıştır. Çelik kafes köprü sisteminde optimum sensör sayısı 16 olarak belirlendikten sonra, sensörlerin en uygun konumlarını belirlemek için mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC olmak üzere üç farklı amaç fonksiyonu kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan programın analiz sonuçlarına dayanarak mak-MAC yöntemiyle elde edilen yakınsama grafiği Şekil 28(a)’da sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, en iyi koşuma en hızlı yakınsayan Koşum-7’de (59. İterasyon) elde edilirken, en kötü ise Koşum-5’te (73. İterasyon) gözlemlenmiştir. Tüm koşumların ortalamasını gösteren grafik ise Şekil 28(b)’de verilmiştir.

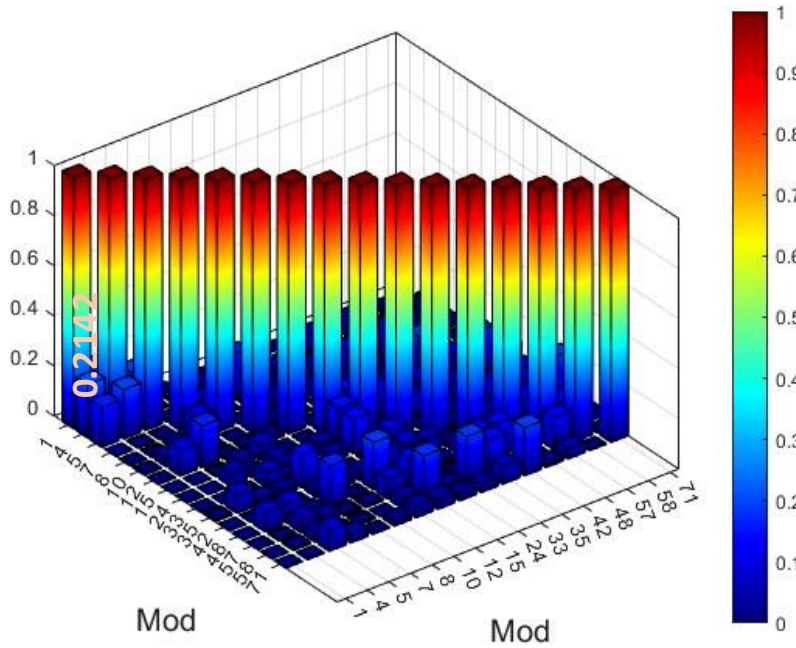


Şekil 27. 396 elemanlı çelik köprünün sensör sayısının belirlenmesi



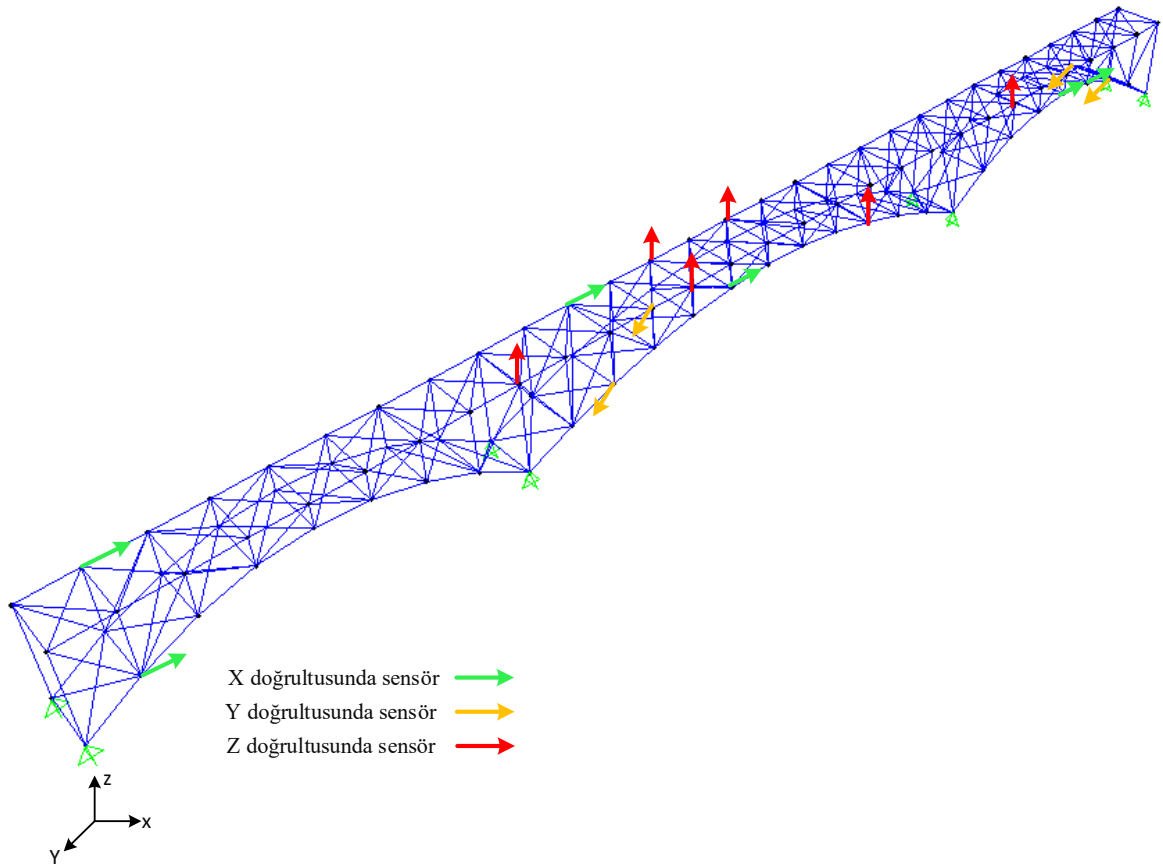
Şekil 28. 396 elemanlı çelik köprünün (a) mak-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları

396 elemanlı çelik kafes köprü sistemine yerleştirilecek 16 sensörün konumlarına ilişkin, mak-MAC yönteminin amaç fonksiyonu ile Koşum-7’de elde edilen en iyi MAC matrisinde, köşegen dışındaki en büyük değer 0.2142 olarak tespit edilmiştir. Şekil 29’da mak-MAC matrisinin üç boyutlu grafiği gösterilmiştir.



Şekil 29. 396 elemanlı çelik köprünün optimum mak-MAC değeri

Koşum-7'den elde edilen optimum sensör konumları örnek köprünün 3x, 12y, 17x, 19z, 26x, 27x, 28y, 38z, 42y, 43z, 52z, 87y, 89x, 98x, 100z ve 102z serbestlik dereceleri olarak belirlenmiş ve Şekil 30'da gösterilmiştir. Her koşumda elde edilen mak-MAC değerleri, bu değerlerin iterasyon sayısı ve analiz sayısı Tablo 9'da verilmiştir. Analiz sayısı, en iyi sonucun elde edilmesi için gerçekleştirilen analizlerin toplam sayısını ifade etmektedir. Bu değer, popülasyon büyüklüğü ile en iyi çözümün bulunduğu iterasyon sayısının çarpımına, popülasyon büyüklüğünün eklenmesiyle hesaplanmaktadır. Tablo 9'da, Koşum-7 için analiz sayısı $100 + 100 \times 59 = 6000$ olarak hesaplanmıştır.



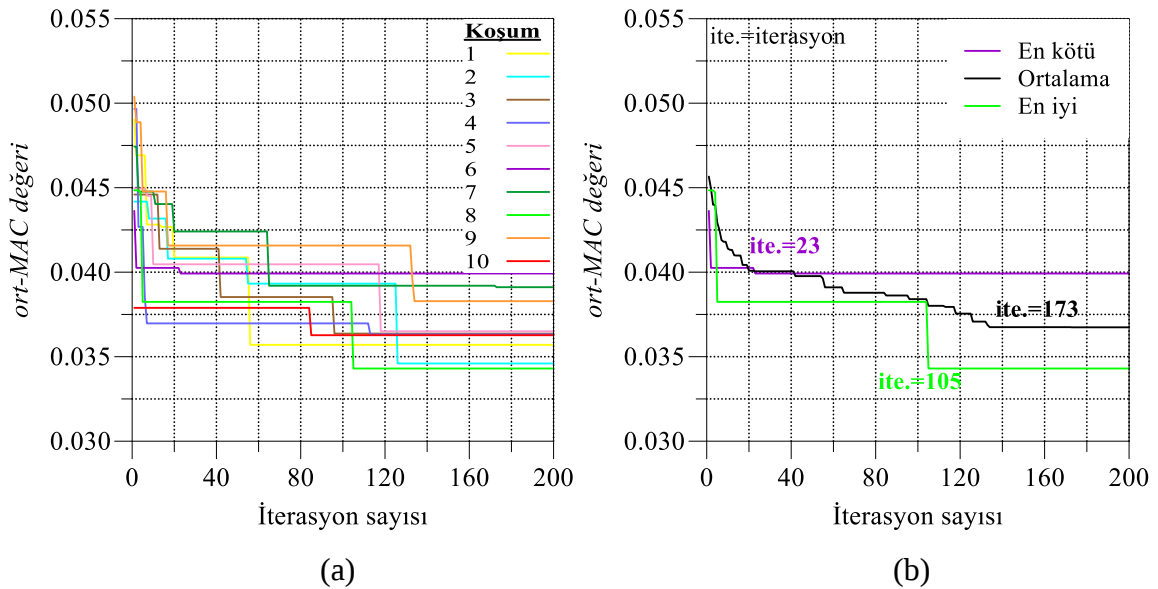
Şekil 30. 396 elemanlı çelik köprüde, mak-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları

Tablo 9. 396 elemanlı çelik köprünün analiz sonucunda elde edilen mak-MAC değerleri

Koşum No	mak-MAC değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.2792	133	13400
2	0.2840	77	7800
3	0.3153	55	5600
4	0.2989	107	10800
5	0.3205	73	7400
6	0.2703	16	1700
7*	0.2142	59	6000
8	0.2790	152	15300
9	0.2681	13	1400
10	0.3155	65	6600

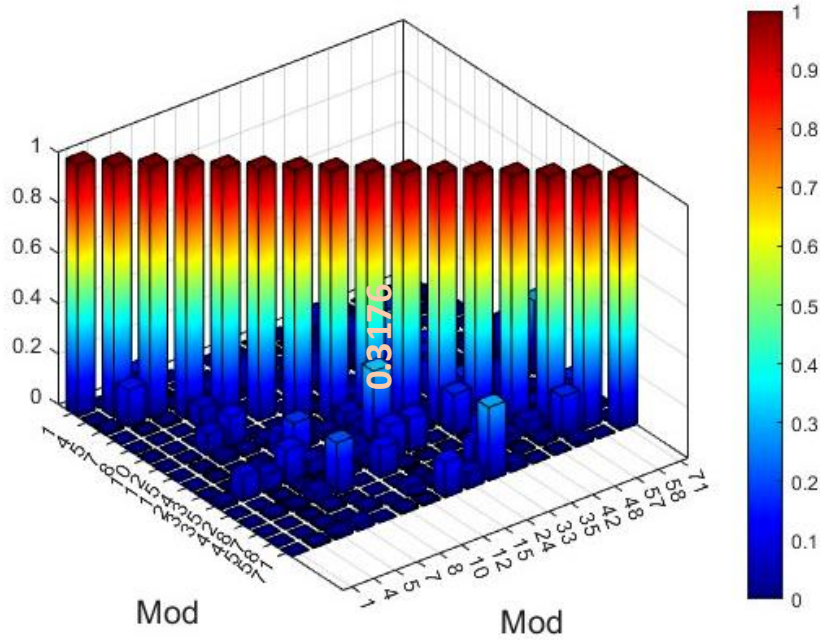
* En iyi sonuca ulaşan koşum

Sisteme yerleştirilecek 16 sensörün en uygun konumlarının belirlenmesi için yürütülen optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonu olarak kullanılan ort-MAC yöntemiyle elde edilen yakınsama grafiği Şekil 31(a)'da sunulmuştur. Bu yöntemin optimizasyonunda, popülasyon büyüklüğü 100, iterasyon sayısı ise 200 olarak belirlenmiş; toplamda 10 koşum gerçekleştirilmiştir. Grafikler incelendiğinde, en iyi koşuma en hızlı yakınsayan Koşum-8'de (105. İterasyon) elde edilirken, en kötü ise Koşum-6'da (23. İterasyon) gözlemlenmiştir. Tüm koşumların ortalamasını gösteren grafik ise Şekil 31(b)'de verilmiştir.



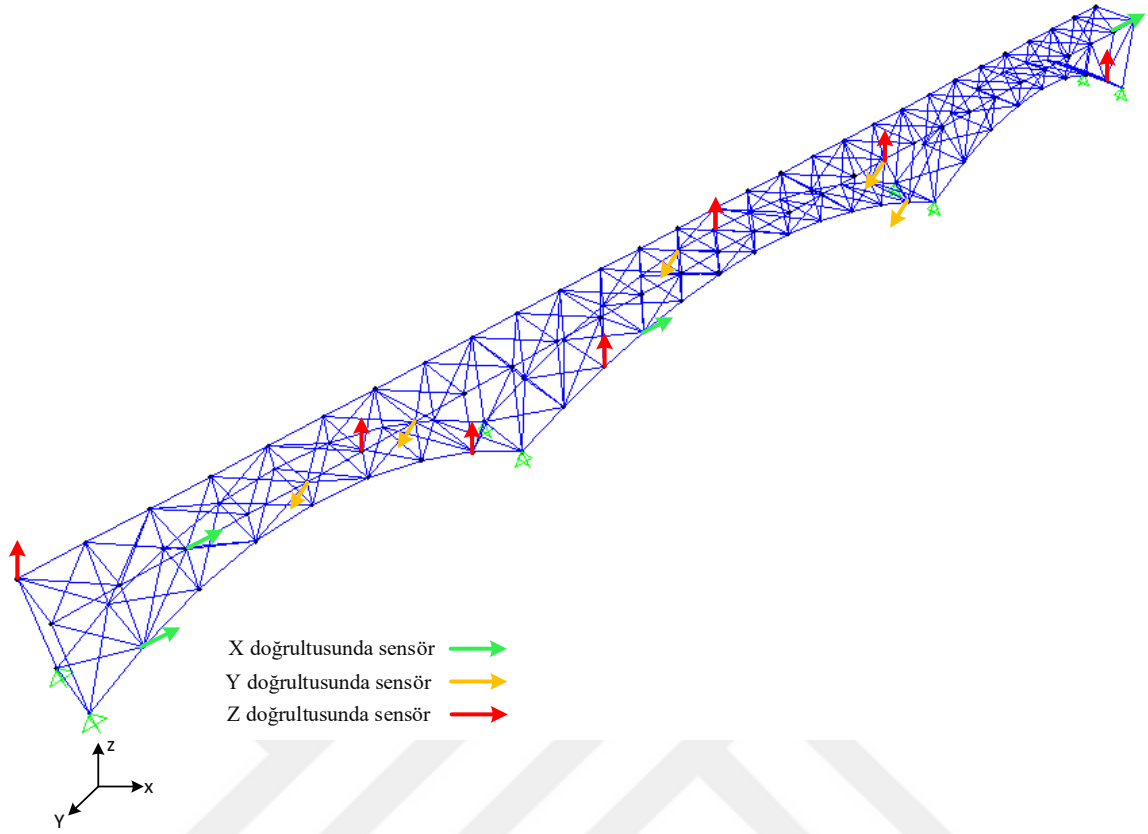
Şekil 31. 396 elemanlı çelik köprünün (a) ort-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) Tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları

396 elemanlı çelik köprü sistemine yerleştirilecek 16 sensörün konumlarına ilişkin, ort-MAC yönteminin amaç fonksiyonu ile Koşum-8’de elde edilen en iyi MAC matrisinde, köşegen dışındaki en büyük değer 0.3176 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, mak-MAC yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ort-MAC yöntemiyle belirlenen sensör konumlarının, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını sağlamada mak-MAC yöntemine kıyasla daha düşük bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, ort-MAC yönteminin doğrusal bağımsızlık kriterlerini tam anlamıyla karşılayamadığını ve sensör yerleşiminde mak-MAC yöntemine göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 32’de ort-MAC matrisinin üç boyutlu grafiği gösterilmiştir.



Şekil 32. 396 elemanlı çelik köprünün optimum ort-MAC değeri

Koşum-8’den elde edilen optimum sensör konumları örnek köprünün 3x, 12z, 13x, 21y, 29z, 35z, 36y, 48y, 48z, 57x, 62x, 64y, 73y, 74z, 88z ve 118z serbestlik dereceleri olarak belirlenmiş ve Şekil 33’te gösterilmiştir. Her bir koşumda elde edilen ort-MAC değerleri ile bu değerlerin iterasyon ve analiz sayılarına ilişkin bilgiler Tablo 10’da sunulmuştur.



Şekil 33. 396 elemanlı çelik köprüde, ort-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları

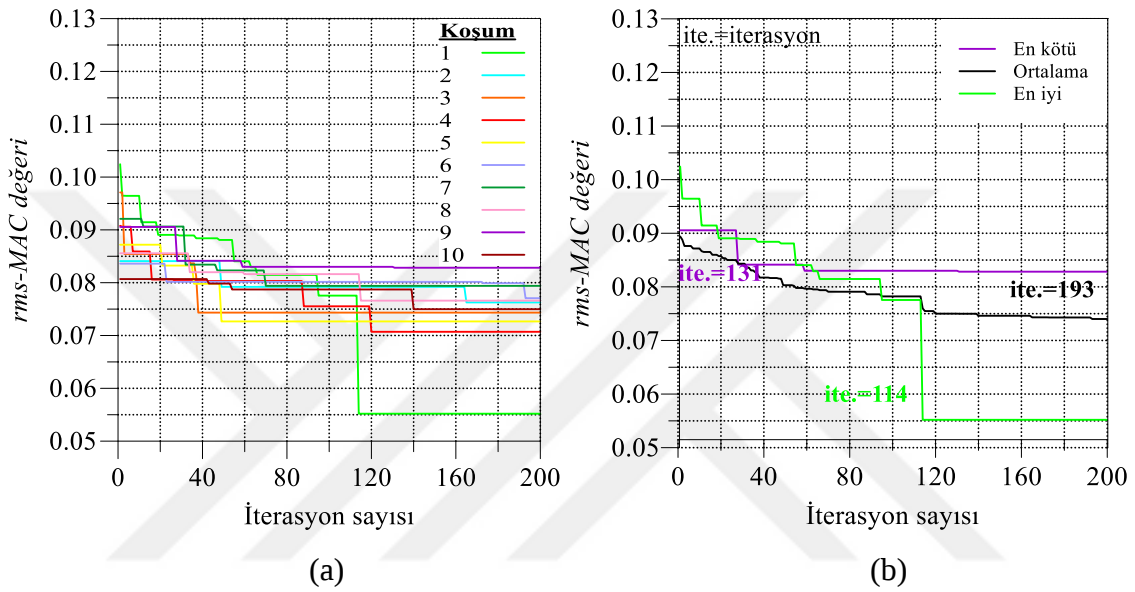
Tablo 10. 396 elemanlı çelik köprünün analiz sonucunda elde edilen ort-MAC değerleri

Koşum No	ort-MAC değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0357	56	5700
2	0.0346	126	12700
3	0.0364	154	15500
4	0.0363	113	11400
5	0.0365	118	11900
6	0.0399	23	2400
7	0.0391	173	17400
8*	0.0343	105	10600
9	0.0383	134	13500
10	0.0363	85	8600

* En iyi sonuca ulaşan koşum

Son aşamada, sisteme yerleştirilecek 16 sensörün en uygun konumlarının belirlenmesi için yürütülen optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonu olarak kullanılan rms-MAC

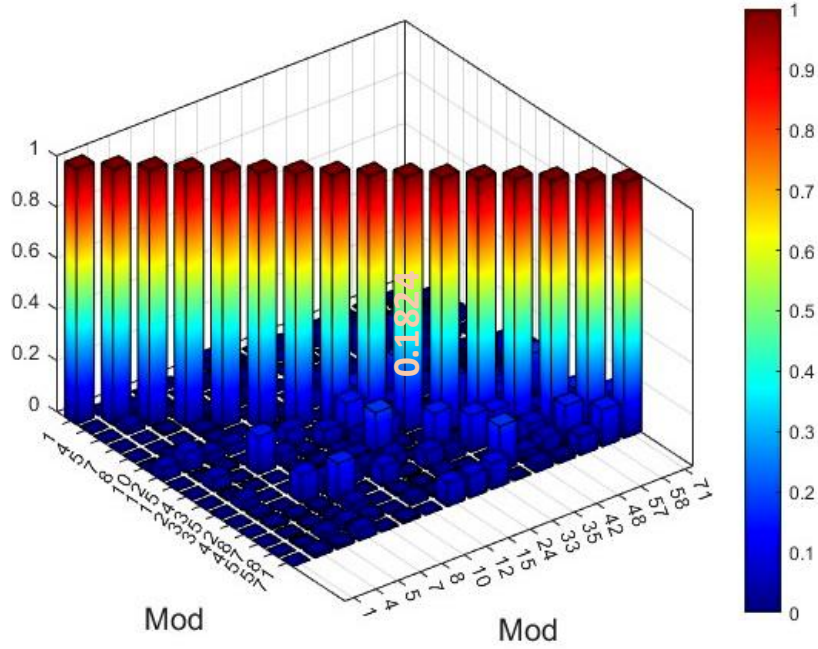
yöntemiyle elde edilen yakınsama grafiği Şekil 34(a)'da sunulmuştur. Bu yöntemin optimizasyonunda, popülasyon büyüklüğü 100, iterasyon sayısı ise 200 olarak belirlenmiş; toplamda 10 koşum gerçekleştirilmiştir. Grafikler incelendiğinde, en iyi koşuma en hızlı yakınsayan Koşum-1'de (114. İterasyon) elde edilirken, en kötü ise Koşum-9'da (131. İterasyon) gözlemlenmiştir. Tüm koşumların ortalama performansını gösteren grafik ise Şekil 34(b)'de verilmiştir.



Şekil 34. 396 elemanlı çelik köprünün (a) rms-MAC değerinin yakınsama grafiği, (b) tüm koşumların ortalama, en iyi ve en kötü sonuçları

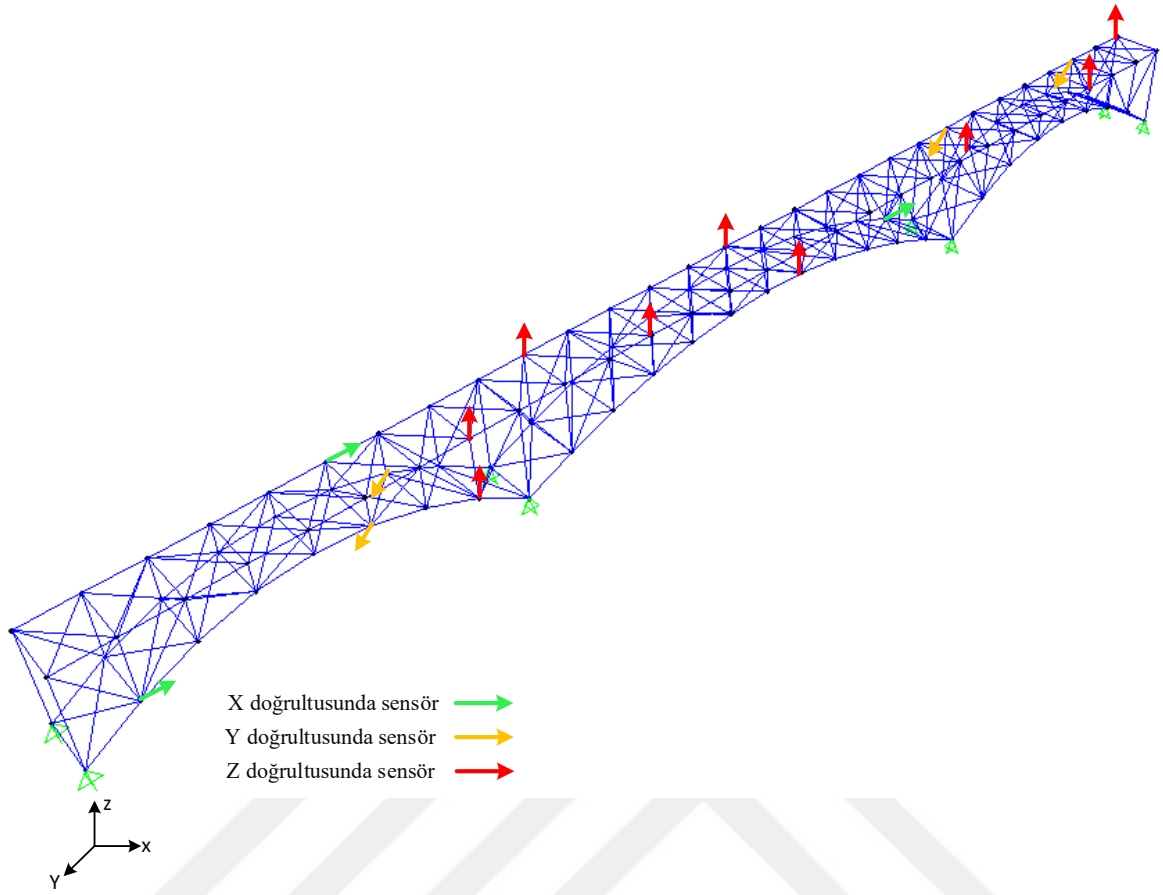
396 elemanlı çelik köprü sistemine yerleştirilecek 16 sensörün konumlarını belirlemek amacıyla rms-MAC yönteminin amaç fonksiyonu kullanılarak, Koşum-1'de elde edilen en iyi MAC matrisinde, köşegen dışındaki en büyük değer 0.1824 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, mak-MAC yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, rms-MAC yöntemiyle belirlenen sensör konumlarının, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını sağlamada mak-MAC yöntemine kıyasla daha yüksek bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, mak-MAC yönteminin doğrusal bağımsızlık kriterlerini tam anlamıyla karşılayamadığını ve sensör yerleşiminde rms-MAC yöntemine göre daha az etkili olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, rms-MAC yöntemiyle elde edilen köşegen dışı en büyük değer, ort-MAC yöntemiyle elde edilen değerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, rms-MAC yönteminin sensör konumlarını belirlemede mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını

sağlamada ort-MAC yöntemine kıyasla daha yüksek bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 35'te ort-MAC matrisinin üç boyutlu grafiği gösterilmiştir.



Şekil 35. 396 elemanlı çelik köprünün optimum rms-MAC değeri

Koşum-1'den elde edilen optimum sensör konumları örnek köprünün 3x, 19y, 21z, 37z, 41z, 55z, 66y, 79x, 82z, 93x, 97z, 102z, 110y, 114y, 116z ve 118z serbestlik dereceleri olarak belirlenmiş ve Şekil 36'da gösterilmiştir. Her bir koşumda elde edilen rms-MAC değerleri ile bu değerlerin iterasyon ve analiz sayılarına ilişkin bilgiler Tablo 11'de sunulmuştur.



Şekil 36. 396 elemanlı çelik köprüde, rms-MAC yöntemiyle tespit edilen sensör konumları

Tablo 11. 396 elemanlı çelik köprünün analiz sonucunda elde edilen rms-MAC değerleri

Koşum No	rms-MAC değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1*	0.0552	114	11500
2	0.0763	165	16600
3	0.0743	38	3900
4	0.0707	120	12100
5	0.0727	49	5000
6	0.0771	193	19400
7	0.0794	70	7100
8	0.0766	115	11600
9	0.0828	131	13200
10	0.0750	140	14100

* En iyi sonuca ulaşan koşum

396 elemanlı çelik köprü sistemde mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC için kullanılan yöntem, önemli mod sayısı, optimum sensör sayısı, en iyi koşum ve optimum sensör

konumları Tablo 12’de verilmiştir. Sistemde elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, 10 koşulda en iyi performansı sergileyen amaç fonksiyonunun rms-MAC olduğu belirlenmiştir.

Tablo 12. 396 elemanlı çelik köprü sistemi için elde edilen optimum sensör konumları

Yöntem	Önemli mod sayısı	Sensör sayısı	En iyi koşul	MAC değeri	Yön	Optimum sensör konumları
mak-MAC	16	16	Koşum-7	0.2142	x	3-17-26-27-89-98
					y	12-28-42-87
					z	19-38-43-52-100-102
ort-MAC	16	16	Koşum-8	0.3176	x	3-13-57-62
					y	21-36-48-64-73
					z	12-29-35-48-74-88-118
rms-MAC*	16	16	Koşum-1	0.1824	x	3-79-93
					y	19-66-110-114
					z	21-37-41-55-82-97-102-116-118

* Mac değerine göre en iyi sonucu veren yöntem

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, köprü türü yapılarda YSİ sistemlerinin etkinliğini artırmak amacıyla optimum sensör sayısı ve konumlarının belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sensörlerin doğru sayıda ve konumda yerleştirilmesi hem izleme doğruluğunu artırmak hem de maliyet ve veri yoğunluğunu optimize etmek açısından kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, optimum sensör sayısı ve konumlarının belirlenmesi sağlayan, MATLAB programı ile SAP2000-OAPI özelliklerinin ve Jaya algoritmasının etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Modal güvence kriterinden türetilen mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC yöntemleri, amaç fonksiyonları olarak optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Oluşturulan programın etkinliğini göstermek için 17 ve 77 elemanlı iki boyutlu çelik kafes köprü modeli ile 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modelleri üzerinde sensör yerleşim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sensör sayısının artmasının elde edilen amaç fonksiyonun minimize ettiği, ancak belirli bir noktadan sonra ek sensörlerin katkılarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, aşırı sensör kullanımının veri işleme maliyetlerini artırırken sağladığı faydanın sınırlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, optimum sensör sayısının belirlenmesi hayati önem taşımaktadır.
- Sensör sayısının optimum seviyede belirlenmesi, gereksiz veri işleme yükünü azaltarak daha hızlı ve güvenilir analiz yapılmasına olanak sağlayacaktır. Bu çalışmada 3 farklı köprü modeli üzerinde sensör konumlarının optimizasyonu ile belirlenen noktalar, köprülerin en kritik bölgelerine yerleştirilerek daha doğru ve güvenilir veri toplanmasını sağlamıştır.
- Çalışmada 17 ve 77 elemanlı düzlem çelik kafes köprü ile 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü gibi farklı ölçeklerde modeller kullanılmıştır. Böylelikle tez kapsamında oluşturulan program yardımıyla hem küçük ölçekli hem de büyük ölçekli yapılar için sensör yerleşimi optimizasyonunun gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir.
- 17 elemanlı köprü sistemine aynı sayıda sensör, üç farklı yöntem kullanılarak yerleştirilmiştir. Her yöntemin sensör konumlarını belirleme yaklaşımı farklı olduğundan, genellikle farklı yerleşimler elde edilmiştir. Ancak sensör sayısı

arttıkça, üç yöntemde de sensörlerin daha fazla ortak noktaya yerleştiği gözlemlenmiştir.

- Çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip iki köprü sisteminin dinamik davranışları modal analiz yoluyla incelenmiştir. 77 elemanlı iki boyutlu çelik köprü sisteminde, x ve z yönlerinde modal kütle katılım oranı 4. modda %90'a ulaştığı için ilk dört mod önemli modlar olarak değerlendirilmiştir. 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modelinde ise dikkate alınacak modlar, her modun dinamik tepkiye katkısını esas alan etkili modal kütle katılım oranı yöntemine göre belirlenmiş; toplam katkı %90'a ulaşmaya kadar 16 mod analiz kapsamına alınmıştır. Her iki sistemde de MAC matrislerinde köşegen dışındaki en büyük değerlerin 0.20 ile 0.25 arasında olması, mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığın sağlandığını ve seçilen modların yeterli doğrulukla temsil edildiğini göstermektedir.
- Sensörlerin doğru konumlandırılması, modal bağımsızlığı maksimize ederek yapı üzerindeki potansiyel hasar noktalarının daha doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlayacaktır. Çalışmada kullanılan mak-MAC, ort-MAC ve rms-MAC yöntemleri, farklı sensör yerleşim senaryolarında test edilmiş ve modal güvence kriterleri açısından karşılaştırılmıştır. 77 elemanlı iki boyutlu ve 396 elemanlı üç boyutlu çelik kafes köprü modellerinde yapılan analizler sonucunda, en iyi performans sağlayan sensör yerleşimine rms-MAC yöntemiyle ulaşılmıştır. rms-MAC yöntemiyle elde edilen köşegen dışı en büyük değerlerin, mak-MAC ve ort-MAC yöntemlerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, rms-MAC yöntemiyle belirlenen sensör konumlarının, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını sağlamada diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.
- Tez kapsamında oluşturulan MATLAB tabanlı program ile OSY'de literatürde sınırlı sayıda ele alınan optimum sensör sayısının belirlenmesi de başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın daha ileri taşınabilmesi ve geliştirilmesi adına aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Çelik kafes köprülerin yanı sıra, yüksek binalar, tüneller ve barajlar gibi diğer büyük ölçekli yapılar için de sensör yerleşimi optimizasyonu yapılabilir. Böylelikle metodolojinin geniş bir yelpazede uygulanabilirliği test edilebilir.

- Bu çalışma ağırlıklı olarak teorik modellemelere dayanmakla birlikte, gerçek saha uygulamalarında sensör yerleşimi test edilerek önerilen optimizasyon sonuçlarının pratikteki doğruluğu incelenebilir.
- Jaya algoritmasının yanında, OSY problemlerinde son yıllarda geliştirilen farklı algoritmalar da kullanılabilir. Böylelikle, farklı algoritmaların OSY çalışmalarındaki etkinlikleri incelenebilir.
- Çalışma kapsamında tek eksenli sensör tercih edilmiş, ilerleyen çalışmalarda çok eksenli sensörler için de benzer uygulamalar yapılması önerilmektedir.
- Çalışmada kullanılan SAP2000 ve MATLAB yazılımlarına ek olarak, farklı mühendislik yazılımlarının entegrasyonu ile analiz süreçleri geliştirilebilir.

Bu tez, YSİ alanında yenilikçi bir yaklaşımla OSY problemini ele almış ve önemli bulgular ortaya koymuştur. Geliştirilen yöntem, mühendislik uygulamalarında yapıların güvenliğini artırarak daha etkin bir izleme süreci sunacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın, gelecekte yapılacak araştırmalara rehberlik etmesi ve uygulamalı mühendislik projelerinde karar süreçlerini desteklemesi beklenmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı). (2020). Yapı Sağlığı İzleme Yönergesi. Ankara: Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı.
- Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K. A., & Tsikos, C. J. (2000). Issues in infrastructure health monitoring for management. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(7), 711–724.
- Artar, M., & Carbas, S. (2021). Discrete sizing design of steel truss bridges through teaching-learning-based and biogeography-based optimization algorithms involving dynamic constraints. *Structures*, 34, 3533–3547.
- Aslan, M. (2020). Ayırık optimizasyon problemlerinin çözümü için Jaya algoritması tabanlı yeni yaklaşımlar. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya.
- Atmaca, B., Dede, T., & Grzywiński, M. (2020). Optimization of cables size and prestressing force for a single pylon cable-stayed bridge with Jaya algorithm. *Steel and Composite Structures*, 34(6), 853-862.
- Aydın, E. & Dinçer, S. (13 Aralık 2023). Yapı Sağlığı İzleme Ve Bu Çözümün Yeni Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki Yeri. https://eski.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/2aa832b6d8d888e_ek.pdf?tipi=79&turu=X&sube=3.
- Carne T.G. & Dohrmann C.F. (1995) A modal test design strategy for model correlation Thomas G. Carne and Clark Ft. Dohrmann Sandia National Laboratories Albuquerque , New Mexico 87185-0557.
- Chang, M., & Pakzad, S. N. (2014). Optimal sensor placement for modal identification of bridge systems considering number of sensing nodes. *Journal of Bridge Engineering*, 19(6), 04014019.
- Chioccarelli, E., Giunta, D., De Angelis, A., & Bilotta, A. (2024). Discussing optimal sensor placement for ambient vibration test of an existing bridge. *Engineering Structures*, 310, 118000.
- Çolak, H. (2016). Structural health monitoring condition assessment and seismic vulnerability estimation of highway bridges. Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Computers and Structures Inc. (2010). SAP2000: Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures. Berkeley, CA, USA.
- Dede, T., Grzywiński, M., & Rao, R. V. (2019). Jaya: A new meta-heuristic algorithm for the optimization of braced dome. *Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques: Select Proceedings of AEOTIT 2018*, Springer, pp. 11-19.

- Doğan, E., Erdal, F., Çarbaş, S., Hasaebi, O., & Saka, M. P. (2013, Ağustos). Yapı mühendisliği problemlerinin çözümünde kullanılan optimizasyon tekniklerinin karşılaştırılması. XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi Bildirileri, 26-30 Ağustos, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye, 153.
- Erdoğan, Y. S., Catbas, F. N., & Gündes Bakır, P. (2014). Structural identification using finite element models for optimum sensor configuration and uncertainty quantification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 373–388.
- Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, Practice, and Application*. Research Studies Press.
- Farr, J. (1999). The evolution of structural health monitoring technology. *Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-2)*, 1–13.
- Flager, F., Adya, A., Haymaker, J., & Fischer, M. (2014). A bi-level hierarchical method for shape and member sizing optimization of steel truss structures. *Computers and Structures*, 131, 1–11.
- Gönen, S., Demirlioglu, K., & Erduran, E. (2023). Optimal sensor placement for structural parameter identification of bridges with modeling uncertainties. *Engineering Structures*, 292, 116561.
- Grzywiński, M., Dede, T., & Özdemir, Y. I. (2019). Optimization of the braced dome structures by using Jaya algorithm with frequency constraints. *Steel and Composite Structures*, 30(1), 47-55.
- Gündoğan, M. (2012). Çelik Model Köprünün Yapı Sağlığının Gözlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Harik, İ. (2018). Lessons learned from six different structural health monitoring systems on highway bridges, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 39(3), 616–630.
- Hasaebi, O. (2008). Adaptive evolution strategies in structural optimization: Enhancing their computational performance with applications to large-scale structures. *Computers and Structures*, 86 (1-2), 119–132.
- Hasaebi, O., Çarbas, S., Doğan, E., Erdal, F., & Saka, M. P. (2009). Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures. *Computers and Structures*, 87(5–6), 284–302.
- Hassani, R. & Dackermann, U. (2023). A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement. *Sensors*, 23, 3293.
- Lee, E-T. & Eun, H-C. (2022). Optimal Sensor Placement in Reduced-Order Models Using Modal Constraint Conditions. *Sensors*, 22(5), 589.
- Li, B., Li, D., Zhao, X., & Ou, J. (2012). Optimal sensor placement in health monitoring of suspension bridge. *Science China Technological Sciences*, 55(7), 2039–2047.

- Li, D.S., Li, H.N. & Fritzen, C.P. (2007). The connection between effective independence and modal kinetic energy methods for sensor placement. *Journal Of Sound And Vibration*, 305(1), 945-955.
- Li, D. (2011). *Sensor Placement Methods and Evaluation Criteria in Structural Health Monitoring*. Doktora tezi, Universität Siegen, Maschinenbau.
- Liu, K., Yan, R.-J., & Guedes Soares, C. (2018). Optimal sensor placement and assessment for modal identification. *Ocean Engineering*, 165, 209–220.
- Karakostas, C., Quaranta, G., Chatzi, E., Zülfikar, A. C., Çetindemir, O., De Roeck, G., Döhler, M., Limongelli, M. P., Lombaert, G., Memişoğlu Apaydın, N., Pakrashi, V., Papadimitriou, C., & Yeşilyurt, A. (2024). Seismic assessment of bridges through structural health monitoring: A state-of-the-art review. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Karlsson A. & Nilsson A. (2007) *Dynamic analysis of railway bridges using the mode superposition method*. Chalmers University of Technology, Yüksek Lisans Tezi, Sweden.
- Kaveh, İ., Eslamlou, A. D., Rahmani, P. & Amirsoleimani, P. (2022). Optimal sensor placement in large-scale dome trusses via Q-learning-based water strider algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(7), 1–20.
- Kaveh, A., & Karami, A. (2022). Q-Learning Based Water Path Algorithm for Optimal Sensor Placement in Bridge Health Monitoring. *Engineering Optimization*, 52(4), 352-369.
- Korucu, A. (2022). *Developing a structural optimization software for efficient and practical optimum design of real-world steel structures*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Köroğlu, İ. (28 Aralık 2023). Yapısal Sağlık İzleme Nedir? <https://thecircle-o.com/blog/yapisal-saglik-izleme>.
- Marano, G. C., Quaranta, G., Trentadue, F., & Monti, G. (2012). Numerical study on the optimal sensor placement for historic swing bridge dynamic monitoring. *Taylor and Francis Group*, 10(1), 57–68.
- MATLAB (2022). MathWorks, Inc. USA.
- Meng, X., Zhang, H., Jia, K., Li, H., & Huang, Y. (2023). Optimal sensor placement for structural health monitoring based on deep reinforcement learning. *Smart Structures and Systems*, 31(3), 247-257.
- Meo, M. & Zumpano, G. (2004). Optimal Sensor Placement on a large scale civil structure. *Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III*, 5394(0), 108-117.
- Meo, M., & Zumpano, G. (2005). On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure. *Engineering Structures*, 27(10), 1488-1497.

- Özoğul, C. (2019). Comparative Study On Optimal Sensor Placement For Structural Health Monitoring Applications. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Pachón, P., Castro, R., García-Macías, E., Compan, V. & Puertas, E. (2018). E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors. *Engineering Structures*, 162, 11–21.
- Paz M. & Kim Y. H. (2018). Structural Dynamics, Springer Nature Switzerland AG, USA.
- Pınar, Ö. G. (2020). Haliç Metro Köprüsü Sağlık İzleme Sistemi Ve Üç Boyutlu Doğrusal Sonlu Eleman Modeli Geliştirilmesi. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Prabhu, S., & Atamturktur, S. (2013). Selection of optimal sensor locations based on modified effective independence method: Case study on a Gothic Revival cathedral. *Journal of Architectural Engineering*, 19(4), 221–231.
- Ober, R. J. (2002). The Fisher information matrix for linear systems. *Systems & Control Letters*, 47(3), 221–226.
- Qin, X., Zhan, P., Yu, C., Zhang, Q., & Sun, Y. (2021). Health monitoring sensor placement optimization based on initial sensor layout using improved partheno-genetic algorithm. *Advances in Structural Engineering*, 24(2), 252–265.
- Qu, G., & Sun, L. (2024). Performance prediction for steel bridges using SHM data and Bayesian dynamic regression linear model: A novel approach. *Journal of Bridge Engineering*, 29(7), 04024044.
- Quaranta, G., Marano, G. C., Trentadue, F., & Monti, G. (2014). Numerical study on the optimal sensor placement for historic swing bridge dynamic monitoring. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(1), 57–68.
- Rao, A. R. M., Lakshmi, K., & Krishnakumar, S. (2014). A generalized optimal sensor placement technique for structural health monitoring and system identification. *Procedia Engineering*, 86, 529–538.
- Rao, J. S. (2011). Mechanical Vibrations (5th ed.). Pearson.
- Rao, R. V., (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7 (1): 19–34.
- Sahu, S. K., & Reddy, K. S. (2017). Application of Jaya algorithm to optimal design of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 132, 1-12.
- Segeja, M. (2021). Optimal sensor placement for structural health monitoring. Yüksek Lisans Tezi, The University of British Columbia, Vancouver, Canada). The University of British Columbia Library.

- Soyöz, S., & Fırat, F. K. (2011). Köprülerde yapısal sağlık izleme sistemleri ve Türkiye'deki uygulamaları. 7. Ulusal Kıyı ve Deniz Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Trabzon
- Sun, H. & Büyüköztürk, O. (2015). Optimal sensor placement in structural health monitoring using discrete optimization. *Smart Materials and Structures*, 24(12), 125034.
- Şafak, E. (2007). Yapı titreşimlerinin izlenmesi: Nedir, neden yapılır, nasıl yapılır, ve ne elde edilir? 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul, Türkiye (s. 285). İstanbul: Maya Basın Yayın.
- Tan, Y., & Zhang, L. (2019). Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review. *Structural Health Monitoring*, 19(4), 1287–1308.
- Topkaraoğlu, N. (2017). Farklı Tipteki Yapıların Yapısal Sağlık Takibinde (Structural Health Monitoring) Kullanılacak Sensörlerin Sayısının Ve Lokasyonunun Optimize Edilmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun.
- URL-1. (2023). Osmangazi Köprüsü ve İzleme Sistemleri. GÜNDEM ARTVIN. <https://www.gundemartvin.com> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2016). Yavuz Sultan Selim Köprüsü: Trafik ve Güvenlik İzleme Sistemleri. TRT HABER. <https://www.trthaber.com> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2023, 8 Aralık). The Advantages and Disadvantages of Sensors. Lolaapp. <https://www.lolaapp.com/advantages-and-disadvantages-of-sensors/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2019, Mart 9). Wired or Wireless Sensors? The Advantages and Disadvantages of Wired and Wireless Sensor Systems. Pressac. <https://www.pressac.com/insights/wired-or-wireless-sensors/> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2019, Ocak 4). Erken hasar tespiti ve müdahale için köprülerin uygun izlenmesi hakkında bilmeniz gerekenler. Quakelogic. https://www.quakelogic.net/tr/blog-posts/bridge_monitoring adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2020). Köprü Sağlık İzleme. RMC Engineering. RMC Mühendislik. <https://www.rmc.com.tr> adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2017, Mart 20). Boğaziçi Üniversitesi, köprülerin "yapısal sağlığı" nı 7/24 izliyor. Boğaziçi Üniversitesi Haberler. <https://haberler.bogazici.edu.tr/tr/haber/bogazici-universitesi-koprulerin-yapisal-sagligini-724-izliyor> adresinden alınmıştır.
- Wang, M. L., Heo, G. & Satpathi, D. (1998). A health monitoring system for large structural systems. *Smart Materials and Structures*, 7(5), 606.
- Xiaohan, H. (2022). Optimal sensor placement for structural health monitoring using a robust information entropy-based approach. Doktora Tezi, University of Macau,

Faculty of Science and Technology, Department of Civil and Environmental Engineering.

- Yakak, B. (2024). Bina türü yapılarda yapı sağlığı izlemesinde optimum sensör sayısı ve konumunun Rao algoritması kullanılarak belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Yi, T.-H., Li, H.-N., & Zhang, X.-D. (2012). A modified monkey algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, 21(10), 105033.
- Yılmaz, H. Ç. (2021). Yapı Sağlığı İzleme Sistemleri İle Yapıların Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi. İskenderun Teknik Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Yormaz, D. (2017). Bir Demiryolu Çelik Köprüsünün Mevcut Durumunun Hasarsız Yöntemlerle Belirlenmesi ve Yapı Sağlığının İzlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Zhang, X., Li, J., Xing, J., Wang, P., Yang, Q., Wang, R., & He, C. (2014). Optimal sensor placement for latticed shell structure based on an improved particle swarm optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-12.

ÖZGEÇMİŞ

Hülya AKSOY, İlköğrenimini Çifteköprü İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2016 yılında Trabzon Hasansadri Yetmişbir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2017-2018 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2021 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. AKSOY orta derecede İngilizce bilmekte ve uluslararası konferansta aşağıda verilen bildirisi bulunmaktadır.

Uluslararası Konferans Bildirileri

Aksoy, H., Yakak, B., Atmaca, B., & Dede, T. (2025). Optimum sensor placement in space truss bridge by using AOA algorithm. 5th International Conference on Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques, AEOTIT 2024, Surat, Hindistan,