

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİNA TÜRÜ YAPILARDA YAPI SAĞLIĞI İZLEMESİNDE OPTİMUM SENSÖR
SAYISI VE KONUMUNUN RAO ALGORİTMASI KULLANILARAK
BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra YAKAK

HAZİRAN 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİNA TÜRÜ YAPILARDA YAPI SAĞLIĞI İZLEMESİNDE OPTİMUM SENSÖR
SAYISI VE KONUMUNUN RAO ALGORİTMASI KULLANILARAK
BELİRLENMESİ**

Büşra YAKAK

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 05 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 10 / 06 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Barbaros ATMACA

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Bina Türü Yapılarda Yapı Sağlığı İzlemede Optimum Sensör Sayısı ve Konumunun Rao Algoritması Kullanılarak Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını öneren ve tez çalışmam boyunca bana rehberlik eden, değerli bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Barbaros ATMACA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen ve kıymetli bilgileriyle bana ışık tutan Sayın Prof. Dr. Tayfun DEDE'ye teşekkürlerimi sunarım. Değerli görüşleriyle katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Şevket ATEŞ, Sayın Prof. Dr. Temel Türker ve Sayın Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA'ya teşekkür ederim. Eğitim hayatıma katkıda bulunan İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm hocalarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında bana motivasyon ve destek sağlayan Arş. Gör. Bahri Barış VATANDAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının tamamlanması sürecinde, her zaman yanımda olan maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Gülay YAKAK ve babam Fikret YAKAK'a, kardeşlerim Kübra YAKAK, Davut YAKAK, Beyza YAKAK, Yiğit Efe YAKAK ve Doruk ÇIRÇIR'a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının gelecekteki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Büşra YAKAK

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bina Türü Yapılarda Yapı Sağlığı İzlemesinde Optimum Sensör Sayısı ve Konumunun Rao Algoritması Kullanılarak 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. 10/06/2024

Büşra YAKAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yapı Sağlığı İzleme.....	2
1.3. Yapı Sağlığı İzleme Süreci.....	4
1.4. Sensör Teknolojileri.....	5
1.5. Sensör Çeşitleri.....	5
1.6. Sensör Yerleşim Stratejileri.....	6
1.7. Teorik Modal Analiz Yöntemi.....	7
1.7.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler.....	7
1.7.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler.....	9
1.8. Optimum Sensör Yerleşimi.....	12
1.8.1. Sensör Yerleştirme Yöntemleri.....	13
1.8.2. Optimizasyon Yöntemleri.....	17
1.9. Rao Algoritmaları.....	19
1.10. SAP2000 Açık Uygulama Programlama Arayüzü.....	21
1.11. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	22
1.12. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	29
2.1. Optimum Sensör Yerleşimi Problemlerinin Çözümü.....	30
2.2. Amaç Fonksiyonları.....	31
2.3. Seçilen Modellerin Yapısal Özellikleri.....	32
2.3.1. 10 Katlı Toplu Kütleli Sistem.....	32
2.3.2. 4 Katlı Çerçeve Sistem.....	34

2.3.3.	20 Katlı Çerçeve Sistem.....	35
2.4.	Seçilen Modellerin Sonlu Elemanlar Modeli	37
2.4.1.	4 Katlı Çerçeve Sistem.....	37
2.4.2.	20 Katlı Çerçeve Sistem.....	38
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
3.1.	10 Katlı Toplu Kütlesi Sistem	40
3.2.	4 Katlı Çerçeve Sistem.....	46
3.3.	20 Katlı Çerçeve Sistem.....	55
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
5.	KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BİNA TÜRÜ YAPILARDA YAPI SAĞLIĞI İZLEMESİNDE OPTİMUM SENSÖR SAYISI VE KONUMUNUN RAO ALGORİTMASI KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Büşra YAKAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Barbaros ATMACA
2024, 72 Sayfa

Bu tez çalışmasında, bina türü yapıların yapı sağlığı izlemesinde kullanılan sensörlerin optimum sayısının ve konumunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, MATLAB programlama dili, Rao-1 algoritması ve SAP2000 OAPI özelliklerinin etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Bu program kullanılarak SAP2000 programında sonlu elemanlar modeli oluşturulan iki veya üç boyutlu bina türü yapıların optimum sensör yerleşimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez kapsamında, oluşturulan program ile 10 katlı iki boyutlu toplu kütleli sistem, 4 katlı ve 20 katlı üç boyutlu çerçeve sistemin optimum sensör yerleşimi belirlenmiştir. Optimum sensör yerleşimi için modal güvence kriterinden türetilen *mak-MAC*, *ort-MAC* ve *rms-MAC* yöntemleri optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Bu tez çalışması genel olarak dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yapı sağlığı izleme sisteminin ilk adımı olan sensör yerleşiminin önemi vurgulanarak konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde, seçilen örneklerin yapısal özellikleri ve sonlu elemanlar modeli tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, seçilen örneklerden elde edilen veriler sunulmuştur. Dördüncü bölümde, sonuçlar özetlenerek önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Modal Analiz, Optimum Sensör Yerleşimi, Rao-1 Algoritması, SAP2000 OAPI, Yapı Sağlığı İzleme.

M.Sc. Thesis

SUMMARY

DETERMINING THE OPTIMAL SENSOR NUMBER AND LOCATION FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING IN BUILDING TYPE STRUCTURES USING RAO ALGORITHM

Büşra YAKAK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Barbaros ATMACA
2024, 72 Pages

In this thesis, it is aimed to determine the optimum number and location of sensors used in structural health monitoring of building type structures. For this purpose, a computer program has been created that works effectively with MATLAB programming language, Rao-1 algorithm and SAP2000 OAPI features. By using this program, optimum sensor placement of two- or three-dimensional building type structures whose finite element models are created in the SAP2000 program can be realized. Within the scope of this thesis, the optimum sensor placement of a 10-storey two-dimensional lumped mass system and a 4-storey and 20-storey three-dimensional frame system was determined with the created program. For optimum sensor placement, *max-MAC*, *avg-MAC*, and *rms-MAC* methods derived from the modal assurance criterion were considered as the objective function in the optimization process. This thesis generally consists of four parts. In the first part, previous studies on the subject are summarized by emphasizing the importance of sensor placement, which is the first step of the structural health monitoring system. In the second part, the structural properties and finite element model of the selected samples are introduced. In the third part, data obtained from selected samples are presented. In the fourth part, the results are summarized, and suggestions are given.

Key Words: Modal Analysis, Optimum Sensor Placement, Rao-1 Algorithm, SAP2000 OAPI, Structural Health Monitoring.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İnsan vücudu ile YSİ sisteminin benzerliği (Gharehbaghi vd., 2022).....	2
Şekil 2. Hasar tespit yöntemleri	3
Şekil 3. Veri yönetim sistemi.....	4
Şekil 4. Hasar tespit süreci.....	5
Şekil 5. İyi ve kötü sensör yerleşimi (Moussas ve Pnevmatikos, 2019).....	6
Şekil 6. TSD sistemin analitik modeli (a) ve serbest cisim diyagramı (b)	8
Şekil 7. ÇSD sistemin analitik modeli	9
Şekil 8. ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşimi.....	10
Şekil 9. Optimum sensör yerleştirme yöntemleri (Hassani ve Dackermann, 2023).....	13
Şekil 10. Rao algoritmalarının akış şeması.....	20
Şekil 11. SAP2000 OAPI veri akışı.....	21
Şekil 12. MATLAB yazılımı kullanılarak SAP2000 OAPI aracılığı ile SAP2000 ve optimizasyon arasında veri aktarımı.....	30
Şekil 13. Üç boyutlu model (a), 60 serbestlik dereceli toplu kütleli model (b) ve 10 serbestlik dereceli toplu kütleli model (c).....	33
Şekil 14. 10 katlı toplu kütleli sistem	34
Şekil 15. 4 katlı çerçeve sistemin üç boyutlu görünümü (a), yan görünümü (b) ve plan görünümü (c)	34
Şekil 16. 20 katlı çerçeve sistemin üç boyutlu görünümü (a), yan görünümü (b) ve plan görünümü (c)	36
Şekil 17. 4 katlı çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli	37
Şekil 18. 20 katlı çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli	38
Şekil 19. 20 katlı çerçeve sistemin düğüm noktalarının numaralandırması	39
Şekil 20. Farklı sensör sayılarında <i>mak-MAC</i> değerinin değişimi (a), <i>ort-MAC</i> değerinin değişimi (b) ve <i>rms-MAC</i> değerinin değişimi (c)	41
Şekil 21. <i>mak-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	43
Şekil 22. <i>ort-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	44
Şekil 23. <i>rms-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları	45
Şekil 24. 4 katlı çerçeve sistemin sensör sayısının belirlenmesi	47
Şekil 25. 4 katlı çerçeve sistemin <i>mak-MAC</i> değerinin yakınsama grafiği	47
Şekil 26. 4 katlı çerçeve sistemde optimum <i>mak-MAC</i> değeri	48

Şekil 27.	4 katlı çerçeve sistemde <i>mak-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	49
Şekil 28.	4 katlı çerçeve sistemin <i>ort-MAC</i> değerinin yakınsama grafiği	50
Şekil 29.	4 katlı çerçeve sistemde optimum <i>ort-MAC</i> değeri	51
Şekil 30.	4 katlı çerçeve sistemde <i>ort-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	51
Şekil 31.	4 katlı çerçeve sistemin <i>rms-MAC</i> değerinin yakınsama grafiği	52
Şekil 32.	4 katlı çerçeve sistemde optimum <i>rms-MAC</i> değeri.....	53
Şekil 33.	4 katlı çerçeve sistemde <i>rms-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	54
Şekil 34.	20 katlı çerçeve sistemin sensör sayısının belirlenmesi	56
Şekil 35.	20 katlı çerçeve sistemin <i>mak-MAC</i> değerinin yakınsama grafiği	57
Şekil 36.	20 katlı çerçeve sistemde optimum <i>mak-MAC</i> değeri	57
Şekil 37.	20 katlı çerçeve sistemde <i>mak-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	58
Şekil 38.	20 katlı çerçeve sistemin <i>ort-MAC</i> değerinin yakınsama grafiği	59
Şekil 39.	20 katlı çerçeve sistemde optimum <i>ort-MAC</i> değeri	60
Şekil 40.	20 katlı çerçeve sistemde <i>ort-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	60
Şekil 41.	20 katlı çerçeve sistemin <i>rms-MAC</i> değerinin yakınsama grafiği	62
Şekil 42.	20 katlı çerçeve sistemde optimum <i>rms-MAC</i> değeri.....	62
Şekil 43.	20 katlı çerçeve sistemde <i>rms-MAC</i> yöntemi ile elde edilen sensör konumları.....	63

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 4 katlı çerçeve sistemde kullanılan profiller	35
Tablo 2. 20 katlı çerçeve sistemde kullanılan profiller	37
Tablo 3. 4 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen <i>mak-MAC</i> değerleri	49
Tablo 4. 4 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen <i>ort-MAC</i> değerleri	52
Tablo 5. 4 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen <i>rms-MAC</i> değerleri	54
Tablo 6. 4 katlı çerçeve sistem için elde edilen optimum sensör konumları	55
Tablo 7. 20 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen <i>mak-MAC</i> değerleri	58
Tablo 8. 20 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen <i>ort-MAC</i> değerleri	61
Tablo 9. 20 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen <i>rms-MAC</i> değerleri	63
Tablo 10. 20 katlı çerçeve sistem için elde edilen optimum sensör konumları	64

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

F_I	: Atalet kuvveti
F_S	: Yay kuvveti
F_D	: Sönüm kuvveti
m	: Yapının kütlesi
c	: Sönüm katsayısı
k	: Yay katsayısı
$\ddot{x}(t)$	: Yapının ivmesi
$\dot{x}(t)$	: Yapının hızı
$x(t)$	: Yapının yer değiştirmesi
$F(t)$	: Yapıya uygulanan dış kuvvet
ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans
$[M]$	: Kütle matrisi
$[C]$	: Sönüm matrisi
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$\{\ddot{x}(t)\}$	: İvme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	: Hız vektörü
$\{x(t)\}$	: Yer değiştirme vektörü
$\{F(t)\}$	: Kuvvet vektörü
$\{X\}$	: Zamandan bağımsız genlik
λ	: Özdeğer
ϕ	: Özvektör
Φ	: Normalleştirilmiş özvektörler
$[\phi]$	: Modal matris
$[\Phi]$	: Normalleştirilmiş modal matris
MAC	: Modal güvence kriteri değeri
Φ_k, Φ_m	: Karşılaştırılan mod şekil vektörleri
E_D	: Etkin bağımsızlık katsayısı
Φ^T	: Mod şekil vektörünün transpozu
MKE	: Modal kinetik enerji katsayısı
$\otimes$	: Terim terim matris çarpımı

ECP	: Özvektör bileşen çarpım yöntemi katsayısı
DPR	: Sürüş noktası kalıntı yöntemi katsayısı
Λ^{-1}	: Köşegen özdeğer matrisinin tersi
$f(x)$	: Amaç fonksiyonu
$f(x)_{en\ iyi}$	: En iyi aday çözüm
$f(x)_{en\ kötü}$	: En kötü aday çözüm
$X_{j,k,i}$	: i . iterasyonda k . aday için j . değişken değeri
$X_{j,en\ iyi,i}$	: i . iterasyonda j değişkeninin en iyi aday değeri
$X_{j,en\ kötü,i}$	: i . iterasyonda j değişkeninin en kötü aday değeri
$X'_{j,k,i}$	: $X_{j,k,i}$ değerinin değiştirilmiş hali
$r_{1,j,i}, r_{2,j,i}$	: i . iterasyonda j . değişkeni için $[0, 1]$ arasında değişen rasgele değerler
C	: Kombinasyon sayısı
n	: Olası sensör konumu
s	: Sensör sayısı
$mak-MAC$	: MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının en büyük değeri
$ort-MAC$	: MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının ortalaması
$rms-MAC$	: MAC matrisinin köşegen dışı elemanlarının karekök ortalaması
$f_1(x)$	: $mak-MAC$ yönteminin amaç fonksiyonu
$f_2(x)$	: $ort-MAC$ yönteminin amaç fonksiyonu
$f_3(x)$	: $rms-MAC$ yönteminin amaç fonksiyonu
m	: İlgili mod sayısı
I	: Kolon atalet momenti
E	: Elastisite modülü
A	: Kesit alanı
YSİ	: Yapı sağlığı izleme
OSY	: Optimum sensör yerleşimi
TSD	: Tek serbestlik dereceli
ÇSD	: Çok serbestlik dereceli
GA	: Genetik algoritma
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
MA	: Maymun algoritması
BTA	: Benzetilmiş tavlama algoritması

TAA	: Tabu arama algoritması
SSYA	: Sıralı sensör yerleştirme algoritması
GGA	: Genelleştirilmiş genetik algoritma
DMA	: Değiştirilmiş maymun algoritması
YAK	: Yapay arı kolonisi
UMA	: Uyarlanabilir maymun algoritması
BA	: Bağışıklık algoritması
BMA	: Bağışıklık maymun algoritması
DEA	: Değiştirilmiş evrimsel algoritma



1. GENEL BİLGİLER

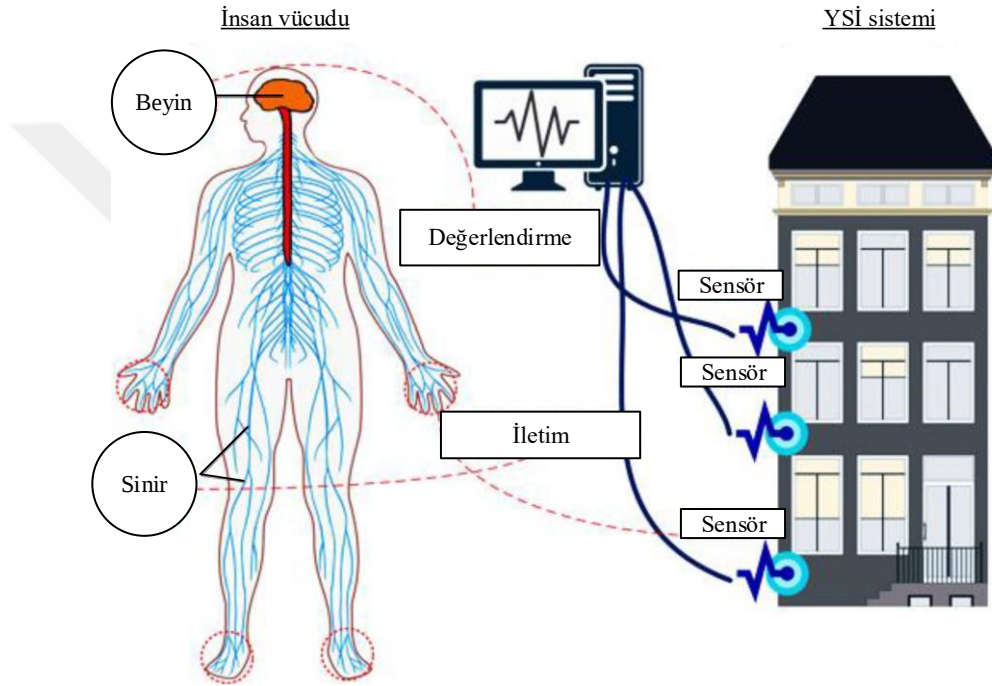
1.1. Giriş

İnşa edilen her yapı, ekonomik ömrü boyunca iç ve dış kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler neticesinde yapılarda hasar meydana gelebilmektedir. Hasar, bir yapının performansını etkileyerek yapısal davranışının değişmesine neden olan bir faktör olarak tanımlanmaktadır (Xu ve Chen, 2008). Sağlıklı bir yapı, inşa edildikten sonra etkin bir şekilde hizmet etmekte ve bütünlüğünü korumaktadır. Ancak hasar alan bir yapının malzemesinde ve daha sonra geometrisinde ve topolojisinde değişiklikler meydana gelmektedir (Doebling vd., 1998). Yapılar, tasarım aşamasında belirli yüklere göre inşa edilse de yapı tamamlandıktan sonra rüzgâr, sel, patlama veya tektonik hareketler gibi tasarımında dikkate alınandan farklı tür ve büyüklükteki yüklere maruz kaldığında tasarlandığı gibi davranıp davranmadığının incelenmesi ve buna göre gerekli müdahalelerin yapılması önem taşımaktadır. Yapıların bir dış etkene maruz kalması durumunda yük altındaki davranışı gözlemlenerek herhangi bir anormallikte erken teşhis sağlanması ve meydana gelebilecek hasara karşı erken müdahale yapılması durumunda olası birçok istenmeyen durumun önüne geçilmektedir.

İnşa edilen yapıların yapısal durumlarının incelenmesi, hasarın varlığının tespit edilmesi ve eğer bir hasar varsa gerekli onarım ve güçlendirmenin yapılması için hasar tespit yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Hasar tespit yöntemleri genel ve yerel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yerel hasar tespit yöntemleri ultrasonik muayene, akustik emisyonlar, görsel test gibi yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler genelde basit yapılarda uygulanmakta ve yapının belirli bir bölgesinde hasar tespitinde tercih edilmektedir. Genel hasar tespit yöntemleri de doğal frekans, mod şekli, mod şekil eğriliğine dayalı titreşim tabanlı yöntemleri içermektedir (Sun vd., 2023). Bu yöntemler ise karmaşık yapılara uygulanabilmekte ve bir yapının tüm davranışının incelenmesine olanak sağlamaktadır (Doebling vd., 1998).

Genel hasar tespit yöntemleri ile yapının titreşim özellikleri izlenerek yapısal değişiklikler tespit edilebilmektedir (Doebling vd., 1996). Bu özelliği ile genel hasar tespit yöntemleri yapı sağlığı izleme (YSİ) sisteminde önemli bir rol oynamaktadır. YSİ disiplini kapsamında bu yöntemler ile herhangi bir dış etki veya çevresel etki altında yapılar izlenerek dinamik karakteristikleri (mod şekilleri, frekans, sönüm oranları) elde edilmekte

ve yapısal güvenliğı tehdit eden hasarlar tespit edilebilmektedir. Ayrıca yapıların çevresel etkiler altında sürekli olarak izlenmesi ile elde edilen veriler değerdendirilerek yapıların güvenliğı hakkında bilgi sağlanabilmektedir. YSİ, insan vücudundaki sinir sistemine benzetilmektedir. YSİ sistemi, yapılardan sensörler aracılığıyla elde ettiğı verileri işlerken insan vücudu, beyne sinyal gönderen duyuşal bilgileri işlemektedir (Gharehbaghi vd., 2022). Her iki sistemde anormal davranışları tespit etmeye çalışmaktadır. İnsan vücudu ile YSİ sisteminin benzerliğı Şekil 1’de gösterilmektedir.



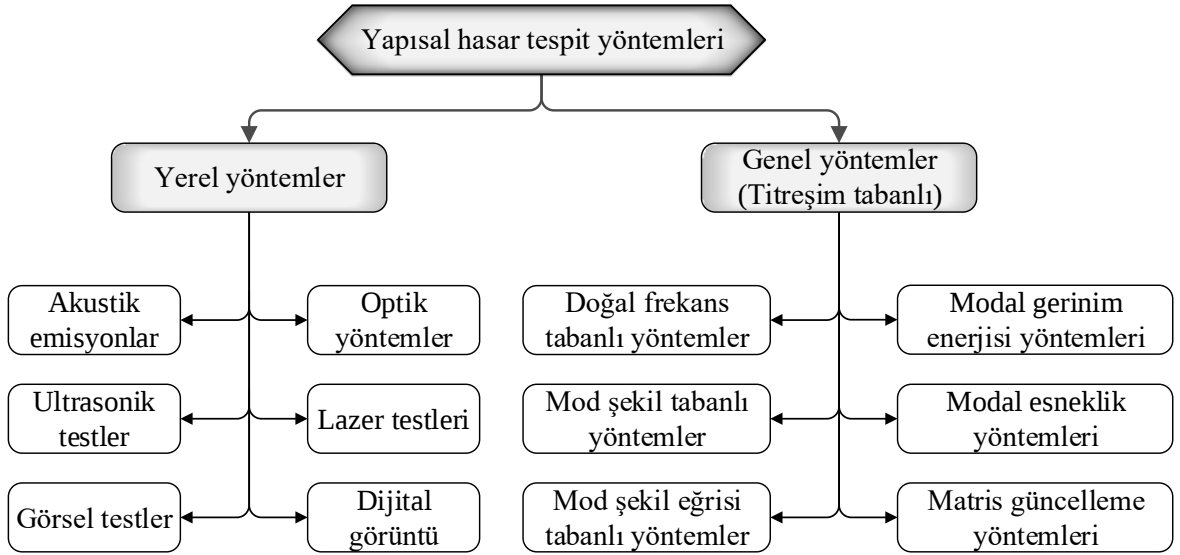
Şekil 1. İnsan vücudu ile YSİ sisteminin benzerliğı (Gharehbaghi vd., 2022)

Sonuç olarak genel hasar tespit yöntemleri kullanılarak YSİ sistemi ile yapıların mevcut sağlık durumları izlenebilmekte ve yapısal dinamik davranış hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Bir hasarın meydana gelmesi durumunda gerekli onarım ve güçlendirme çalışmaları ile yapılardaki hasarın ciddi boyutlara ulaşması engellenmektedir. Böylece yapı kullanım ömrünün uzatılması sağlanmaktadır.

1.2. Yapı Sağlığı İzleme

Yapı sağlığı izleme (YSİ), bir yapının yapısal değışikliklerini tespit etmek ve mevcut durumunu değerdendirmek için düzenli aralıklarla izlenmesi olarak tanımlanmaktadır. YSİ

sistemi ilk havacılık ve makine mühendisliği alanlarında hasar tespiti için uygulanmaya başlanmıştır. Daha sonra 1980'lerin başından itibaren ise köprü ve bina gibi yapıların hasar tespiti için uygulanmıştır (Farrar ve Worden, 2007). İlk YSİ çalışmalarında yapıların dinamik özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanan hasarları tespit etmek için titreşim testleri veya sayısal simülasyonlara dayalı geleneksel yöntemler kullanılmıştır (Hassani ve Dackermann, 2023). Beck ve Katafygiotis (1992), bir yapının rijitliğindeki değişiklikleri tespit ederek, yapının genel sağlığını izlemişlerdir. Doebling vd. (1996), hasar tespitiyle ilgili artan sayıda çalışmaları açıklayarak YSİ sisteminin birçok teknik zorluğu olduğunu vurgulamışlardır. Brownjohn (2007), farklı inşaat mühendisliği yapılarına yönelik YSİ uygulamalarını açıklamış ve yapı türlerine ilişkin örnekler vermiştir. Daha sonraki YSİ çalışmalarında Hilbert Huang dönüşümü, dalgacık analizi, sinir ağları ve optimizasyon yöntemleri gibi gelişmiş yöntemler kullanılmıştır (Hassani ve Dackermann, 2023). Günümüzde ise YSİ, teknolojik gelişmeler ile hasarın boyutunu, türünü tespit edebilme ve yapının kalan ömrünü tahmin edebilme yeteneğine sahip güvenilir sistemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. YSİ alanında Şekil 2’de verilen titreşim tabanlı genel yöntemler ve görsel incelemelere dayalı yerel yöntemler gibi hasar tespit yöntemleri kullanılmaktadır (Sun vd., 2023).

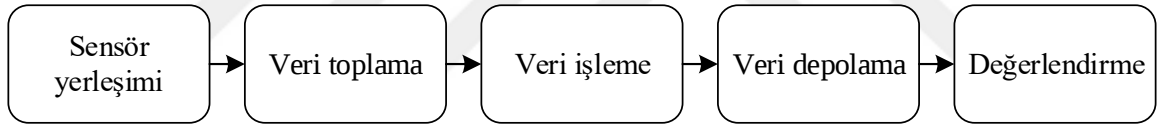


Şekil 2. Hasar tespit yöntemleri

YSİ ile yapıların güvenilirliğini ve dayanıklılığını arttırmak için hasar tespit yöntemleri ile yapısal değişiklikler izlenmekte, hasar tespiti yapılmakta ve yapıların kalan ömürleri tahmin edilmektedir.

1.3. Yapı Sağlığı İzleme Süreci

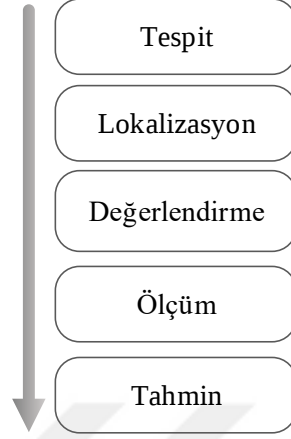
YSİ süreci, yapılara yerleştirilen sensörlerden veri toplama, bu verileri işleme, depolama ve işlenmiş verileri değerlendirme gibi adımları içeren bir veri yönetim sisteminden oluşmaktadır. Veri yönetim sistemi, sensörlerin bir yapı üzerindeki değişiklikleri algılama, veri toplama-depolama sistemine ileterek kaydetme, ardından kaydedilen verilerin analiz edilerek yapısal sağlık durumunun değerlendirilmesi gibi adımları içermektedir (Modares ve Waksmani, 2013). Veri yönetim sisteminin genel adımları Şekil 3'te gösterilmektedir. Veri yönetim sisteminin kullanılması ile yapısal sorunlar erken tespit edilerek maliyet etkinliği sağlanabilmektedir. Ayrıca etkili bir YSİ sistemi sunarak yapıların güvenli ve sürdürülebilir olmasına katkıda bulunmaktadır.



Şekil 3. Veri yönetim sistemi

YSİ veri yönetim sistemi ile hasarın erken tespiti için yapılar sürekli olarak izlenip veri toplanmaktadır. Toplanan verilere dayanarak herhangi bir değişiklik algılandığında hasarın türünü, boyutunu belirlemek, ilerlemesini ve tekrarlanmasını engellemek, hasarı minimize etmek ve yapısal bütünlüğü korumak gerekmektedir. Hasar meydana geldikten sonra etkili bir şekilde yönetilmesini sağlamak amacıyla hasar tespit sürecinden faydalanılmaktadır. Hasar tespit süreci Şekil 4'te verilmektedir. Hasarın varlığı tespit edildikten sonra bulunduğu konum ve boyutu belirlenmektedir. Daha sonra hasarın türü belirlenerek değerlendirme aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada hasarın büyüklüğü ve yapıyı hangi düzeyde etkilediği ölçülmektedir. Son olarak yapıda meydana gelen sorunlar ve gelecekte ortaya çıkabilecek sorunlar dikkate alınarak yapının kalan ömrü tahmin edilmektedir. Hasarın varlığının tespit edilmesinden yapının kalan ömrünün tahmin

edilmesine kadar geçen aşamalar, hasarın etkili bir şekilde yönetilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4. Hasar tespit süreci

1.4. Sensör Teknolojileri

YSİ sistemlerinde kullanılan sensör tipleri kablolu ve kablosuz olarak ikiye ayrılmaktadır. Kablolu sensörler veri iletimi için bir kabloya ihtiyaç duyarken kablosuz sensörler veri iletimini kablosuz iletişim teknolojisi kullanarak gerçekleştirmektedir. Kablolu sensörler yüksek veri toplama hızına sahip uzun ömürlü ve güvenilir sistemlerdir. Ancak kurulum maliyeti ve süresi, farklı konumlara kolay taşınamama gibi zorlukları bulunmaktadır. Kablosuz sensörler ise kablo gereksinimini ortadan kaldırarak daha hızlı ve az maliyetli bir kurulum sağlamaktadır. Ancak kablosuz sensörler pil veya batarya ile çalıştıklarından güç sorunları ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca sinyallerin çevresel faktörlerden etkilenmesi sonucu veri iletiminde güvenilirlik azalabilmekte ve veri aktarma hızı düşebilmektedir (Webb vd., 2015).

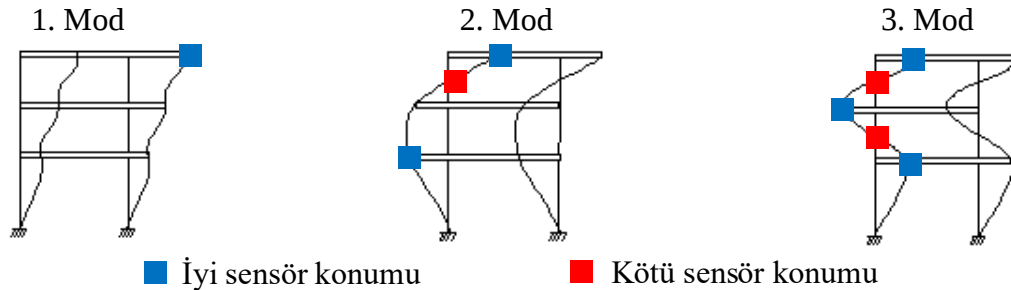
1.5. Sensör Çeşitleri

YSİ kapsamında yapıda takip edilmesi gereken parametreye uygun sensör seçimi yapılmaktadır. Bir yapıda ivme, sıcaklık, deplasman, basınç, nem, rüzgâr hızı, eğim gibi parametreler ölçülebilmektedir. Bu parametreler sırasıyla ivmeölçer, sıcaklıkölçer, deplasman ölçer, basınçölçer, nemölçer, rüzgâr hızı ölçer (anemometre), eğimölçer (tiltmetre) sensörleri ile ölçülmektedir (Türer, 2011). YSİ uygulamalarında yapıların

titreşimlerini, deprem etkilerini ve diğer dinamik yüklemeleri ölçmek için genellikle ivmeölçerler kullanılmaktadır. İvmeölçerler vasıtasıyla yapının sağlık durumu izlenerek dinamik karakteristikleri belirlenmektedir.

1.6. Sensör Yerleşim Stratejileri

YSİ sistemi; sensör yerleşimi, veri işleme ve veri değerlendirme olmak üzere üç ana başlıktan oluşmaktadır. Sensör yerleşimi YSI çalışmalarında kritik bir rol oynamaktadır. Sensörlerin en uygun noktalara en uygun sayıda yerleştirilmesi önem arz etmektedir. Sensörlerin yerleşim yerleri ve sayıları, elde edilen verileri etkilemektedir. Yapılara yerleştirilen sensörlerden alınan verilerin doğruluğu ve kalitesi, modal parametrelere ulaşabilmek için önemli bir adımdır. Fazla sayıda sensör kullanımı maliyet açısından ekonomik olmamaktadır. Ayrıca sensör sayısının artmasıyla işlenecek veri miktarının değerlendirme süresi uzamaktadır. Sensörlerin sayısı kadar konumu da verilerin doğruluğunu etkilemektedir. Dolayısıyla yapıya yerleştirilecek sensörlerden en uygun şekilde veri elde etmek ve bunu en ekonomik şekilde gerçekleştirmek için sensör yerleşiminde kullanılan yöntemler önem kazanmaktadır (Ostachowicz vd., 2019; Tan ve Zhang, 2020). Sensörler, küçük ölçekli yapılarda mühendislik bilgi birikimi ve tecrübe ile yerleştirilebilir, fakat büyük ölçekli ve karmaşık yapılarda sensör yerleşimi kritik hale gelmektedir (Meo ve Zumpano, 2004). Sensörler genellikle yapı sağlığı izlenecek yapının zayıf noktalarına, büyük genliklerin olduğu bölgelere homojen bir şekilde yerleştirilmesi amaçlanmaktadır (Moussas ve Pnevmatikos, 2019). Uygun sensör konumlarının bir gösterimi Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. İyi ve kötü sensör yerleşimi (Moussas ve Pnevmatikos, 2019)

Bir yapıdaki önemli noktalara sensörlerin stratejik olarak konumlandırılması, sensör yerleştirmenin temelini oluşturmaktadır. Bu şekilde yapının dinamik davranışının izlenmesi amaçlanmaktadır. Yapının dinamik davranışı mod şekilleri, doğal frekans ve sönüm oranı gibi parametreler ile temsil edilmektedir. Bir yapıdaki önemli mod şekilleri ve bunlara karşılık gelen doğal frekansları belirlemek için modal analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Modal analiz yöntemleri teorik ve deneysel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu tez çalışmasında teorik modal analiz yöntemi açıklanmıştır.

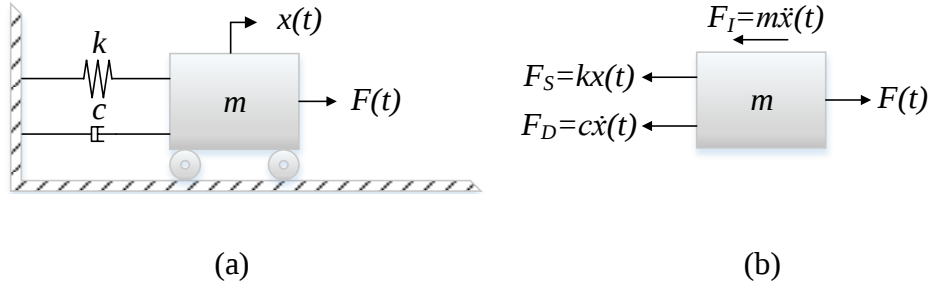
1.7. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Bir yapının dinamik davranışını temsil eden mod şekilleri, doğal frekanslar ve sönüm oranlarının elde edilmesi için yapılan çalışmalara modal analiz denilmektedir. Modal analiz yöntemleri titreşim teorisine dayanmaktadır. Titreşim, bir sistemin başlangıç koşulları veya uygulanan dış yükler etkisi altında gösterdiği tepki olarak tanımlanmaktadır. Serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki farklı titreşim bulunmaktadır. Başlangıç şartları (başlangıç yer değiştirmesi/hız) altında salınan sistemlerdeki titreşime serbest titreşim denirken, değişen dış yükler altında meydana gelen titreşime ise zorlanmış titreşim denilmektedir.

Modal analiz yöntemleri teorik ve deneysel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Teorik modal analizde ilk önce yapının kütle, sönüm oranı ve rijitlik özellikleri tanımlanmaktadır. Daha sonra bu özellikler kullanılarak analitik model elde edilmektedir. Son olarak analitik modelden yapının doğal frekansı, mod şekilleri ve sönüm oranları bulunmaktadır. Bu çalışmada sönümsüz serbest titreşim dikkate alınmış olup tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşimi açıklanmıştır.

1.7.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Tek serbestlik dereceli (TSD) sistemler, yapıları yay-kütle modeli ile basit bir şekilde temsil etmektedir. TSD sistemin analitik modeli Şekil 6(a)'da, serbest cisim diyagramı ise Şekil 6(b)'de verilmektedir.



Şekil 6. TSD sistemin analitik modeli (a) ve serbest cisim diyagramı (b)

Şekil 6(b)'de verilen serbest cisim diyagramına bakılarak denge denklemi yazılırsa,

$$F_I + F_S + F_D = F(t) \quad (1)$$

elde edilir. Burada F_I atalet kuvveti, F_S yay kuvveti, F_D ise sönüm kuvvetidir. Serbest cisim diyagramında bu kuvvetlerin sağ tarafında bulunan ifadeler Eşitlik (1)'de yerine yazıldığında TSD sistemin genel hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (2)$$

olarak elde edilir. Burada m yapının kütesini, c sönüm katsayısını, k yay katsayısını temsil ederken, $\ddot{x}(t)$ yapının ivmesini, $\dot{x}(t)$ yapının hızını, $x(t)$ yapının yer değiştirmesini ve $F(t)$ yapıya uygulanan dış kuvveti temsil etmektedir.

Yapıda sönüm olmaması durumunda $c = 0$, serbest titreşim yaptığı durumda ise $F(t) = 0$ olmaktadır. Bu ifadeler Eşitlik (2)'de yerine konulursa TSD sistemin sönümsüz serbest titreşimi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3)$$

ile ifade edilir. Eşitlik (3) düzenlenirse,

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (4)$$

elde edilir. Buradan,

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

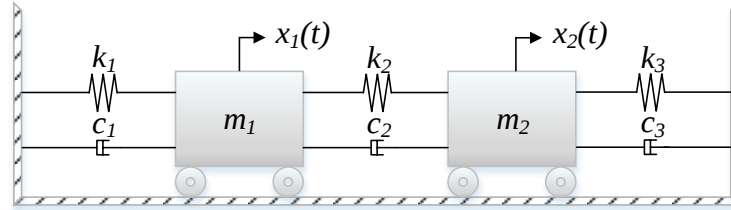
ifadesi bulunur. Burada ω , sönümsüz doğal açısal frekanstır.

1.7.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçekte yapılar, çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemlerdir. ÇSD sistemler, basit bir yay-kütle modelinden oluşan TSD sistemlerin birleşiminden oluşmaktadır. ÇSD sistemin Eşitlik (6)'de verilen genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

ile ifade edilmektedir. Burada $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ sönüm matrisi, $[K]$ rijitlik matrisini temsil ederken, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörü, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörü ve $\{F(t)\}$ kuvvet vektörünü temsil etmektedir. ÇSD sistemin analitik modeli Şekil 7'de gösterilmektedir.

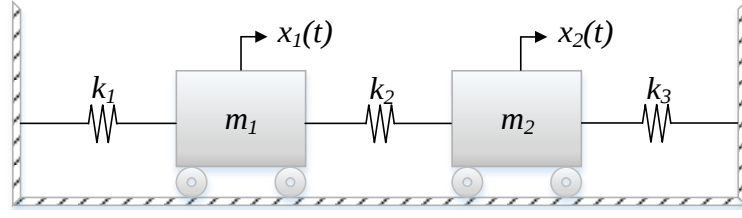


Şekil 7. ÇSD sistemin analitik modeli

Bu tez çalışmasında ÇSD sistemin sönümsüz titreşimi dikkate alınmıştır. Sönümsüz serbest titreşimde $[C] = 0$ ve $\{F(t)\} = 0$ kabul edilmektedir. Bu durumda ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşimin hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (7)$$

olmaktadır. Şekil 8'de ise ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşimi gösterilmektedir.



Şekil 8. ÇSD sistemin sönümsüz serbest titreşimi

Eşitlik (7)'nin çözümü için,

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (8)$$

ifadesi dikkate alınır. Burada $\{X\}$, N serbestlik derecesi olmak üzere $N \times 1$ boyutunda zamandan bağımsız genliği ifade etmektedir. Eşitlik (7) düzenlenip çözülürse,

$$[K] + \omega^2[M]\{X\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (9)$$

elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det|[K] + \omega^2[M]| = 0 \quad (10)$$

karakteristik determinant denklemi elde edilir. Bu denklemin çözümüyle N sayıda sönümsüz doğal açısal frekans elde edilmektedir. Bu doğal frekanslar sıralandığında en küçük doğal frekans temel frekansa karşılık gelmektedir. Temel frekansa karşılık gelen mod şekli ise temel mod şekli olarak adlandırılmaktadır (Chopra, 1995). Eşitlik (10)'da $\omega^2 = \lambda$ alınırsa,

$$\det|[K] + \lambda[M]| = 0 \quad (11)$$

elde edilir. Burada λ değerine “özdeğer” denilmektedir. Bu denkleme ise “özdeğer denklemi” adı verilmektedir. Bu denklemin çözümü gerçekleştirildiğinde N serbestlik dereceli bir sistemin N adet özdeğer vektörü (λ) elde edilmekte ve her bir özdeğer vektörüne karşılık N adet özvektör (ϕ) bulunmaktadır. Eşitlik (7)'nin çözümünden,

$$|[K] + \lambda_n[M]|\{\phi\}_n = 0 \quad (12)$$

elde edilir. Burada n altsimesi mod sayısını belirtmektedir. Bu denklemin çözümü gerçekleştirildiğinde j . mod şekil vektörü,

$$\{\phi\}_j = \begin{Bmatrix} \phi_{1j} \\ \phi_{2j} \\ \vdots \\ \phi_{ij} \\ \vdots \\ \phi_{nj} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

ile gösterilir. Özdeğer probleminden elde edilen $\{\phi\}$ vektörlerinin kesin genlikleri bulunmamaktadır. Aynı mod şekillerinin farklı genlikleri elde edilebilmektedir. Bunu ortadan kaldırmak için normleştirme işlemi yapılmaktadır. Kütle matrisi ile normleştirme işlemi yapıldığında,

$$\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j = M_j \quad (14)$$

bulunur. Böylelikle normleştirilmiş modlar,

$$\Phi_{ij} = \frac{\phi_{ij}}{\sqrt{\{\phi\}_j^T [M] \{\phi\}_j}} \quad (15)$$

elde edilir. Bu şekilde j . normleştirilmiş mod şekli,

$$\{\Phi\}_j = \begin{Bmatrix} \Phi_{1j} \\ \Phi_{2j} \\ \vdots \\ \Phi_{ij} \\ \vdots \\ \Phi_{nj} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

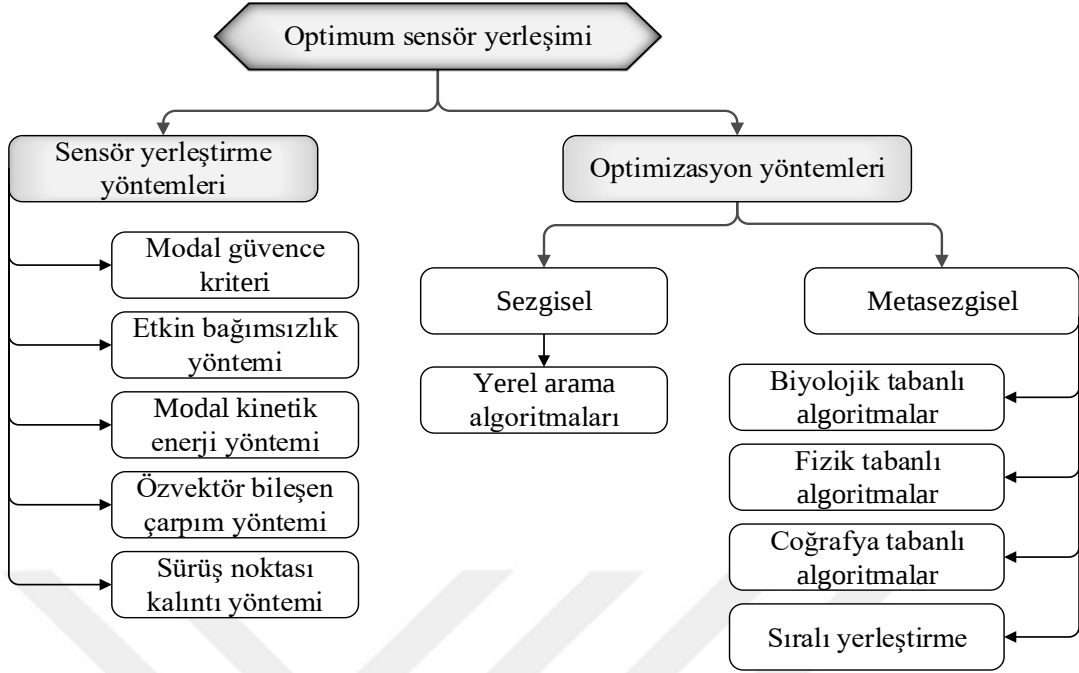
elde edilir. N serbestlik dereceli bir sistemin modal matrisleri,

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1j} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{12} & \dots & \phi_{2j} & \dots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{i1} & \phi_{i2} & \dots & \phi_{ij} & \dots & \phi_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \dots & \phi_{nj} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \quad [\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1j} & \dots & \Phi_{1n} \\ \Phi_{21} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{2j} & \dots & \Phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{i1} & \Phi_{i2} & \dots & \Phi_{ij} & \dots & \Phi_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{n1} & \Phi_{n2} & \dots & \Phi_{nj} & \dots & \Phi_{nn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

şeklindedir. Burada $[\phi]$, modal matris; $[\Phi]$, normalleştirilmiş modal matristir.

1.8. Optimum Sensör Yerleşimi

YSİ sürecinde sensör yerleştirme problemlerinin kullanılması genellikle yapının karmaşıklığına bağlı olmaktadır. Özellikle büyük ölçekli ve karmaşık yapıların çok fazla serbestlik derecesi bulunmaktadır. Her bir serbestlik derecesi potansiyel bir sensör konumunu temsil etmektedir. Bir yapıdaki serbestlik derecesinin artması sensör yerleştirme kombinasyonlarının sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda tüm sensör kombinasyonlarını denemek ve en iyi kombinasyonu belirlemek zor bir hale gelmektedir. Bu gibi büyük ölçekli ve karmaşık bir yapıdaki sensör yerleşimi optimum sensör yerleşimi (OSY) problemini ortaya çıkarmaktadır. OSY probleminin çözümü için çeşitli algoritmalar ve yöntemler kullanılmaktadır (Hassani ve Dackermann, 2023; Li, 2011; Ostachowicz vd., 2019). Genellikle kullanılan optimizasyon algoritmaları ve diğer yöntemler Şekil 9'da verilmektedir. Bu yöntemler ile yapı üzerindeki kritik serbestlik dereceleri belirlenmekte ve sensörlerin stratejik bir şekilde bu noktalara yerleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen sensör yerleşimi, veri toplama sürecini iyileştirerek izleme sisteminin etkinliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 9. Optimum sensör yerleştirme yöntemleri (Hassani ve Dackermann, 2023)

1.8.1. Sensör Yerleştirme Yöntemleri

Yapının dinamik davranışını belirlemek için uygun analiz yöntemleri kullanarak optimum sensör yerleşimi için modal güvence kriteri, etkin bağımsızlık yöntemi, modal kinetik enerji yöntemi, özvektör bileşen çarpım yöntemi, sürüş noktası kalıntı yöntemi gibi sensör yerleştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

a) Modal Güvence Kriteri

Modal güvence kriteri, modal analizde kullanılan ve mod şekilleri arasındaki korelasyonu belirten bir terimdir. Mod şekilleri arasındaki büyük farklılıklara karşı duyarlı, küçük farklılıklara karşı daha az duyarlı olmakta ve böylelikle mod şekilleri arasındaki tutarlılığı göstermektedir. Modal güvence kriteri MAC değeri ile gösterilmektedir. MAC değeri,

$$MAC(i, j) = \frac{|\{\Phi_k\}_i^T \{\Phi_m\}_j|^2}{(\{\Phi_k\}_i^T \{\Phi_k\}_i)(\{\Phi_m\}_j^T \{\Phi_m\}_j)} \quad (18)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada Φ_k ve Φ_m karşılaştırılan mod şekil vektörleridir. i ve j sütun vektörleridir. MAC matrisindeki elemanların değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Mod şekil vektörleri arasında yüksek benzerlik varsa 1'e yakın değerler, mod şekilleri arasında düşük benzerlik varsa 0'a yakın değerler almaktadır. MAC değerlerinin 1 olması modların tamamen benzer olduğu, 0 olması modların benzer olmadığı anlamına gelmektedir (Pastor vd., 2012).

Modal güvence kriteri, modal vektörlerin niceliksel olarak karşılaştırmasını sağlamaktadır. Genel olarak aşağıdaki uygulamalarda kullanılmaktadır.

- Analitik modelden elde edilen mod şekilleri ile deneysel modelden elde edilen mod şekillerinin benzerlik ve farklılık oranını bulmak için kullanılmaktadır. Böylelikle mevcut yapının dinamik davranışı doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir.
- Aynı yapıdan elde edilen farklı deneysel uyarılma koşullarında elde edilen mod şekillerini karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Bu durumda, yapının farklı koşullarda dinamik davranışı değerlendirilmektedir.
- Bir yapıda fiziksel değişiklik olmadan önce ve olduktan sonra elde edilen deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması için kullanılmaktadır. Bu, yapı performansının nasıl etkilendiğinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.
- Deneysel veya analitik modelden elde edilen farklı mod şekilleri arasındaki benzerliği belirlemek için kullanılmaktadır. Böylelikle farklı mod şekillerinin ne kadar benzer olduğu veya ne kadar farklı olduğu niceliksel olarak karşılaştırılmış olmaktadır.

OSY problemlerinde analitik modelden elde edilen mod şekil vektörleri arasındaki korelasyon MAC değeri ile ölçülmektedir. Eşitlik (18) kullanılarak iki mod şekil vektörünün skaler çarpımının vektörlerin uzunluğuna bölünmesi ile iki vektör arasındaki açının kosinüsü elde edilmektedir. Kosinüs açısı 1'e yakın ise vektörler kolayca ayırt edilememekte, kosinüs açısı 0'a yakın ise iki mod şekil vektörü birbirinden kolayca ayırt edilebilmektedir (Carne ve Dohrmann, 1994). Dolayısıyla iki mod şekil vektörünün birbirinden kolayca ayırt edilebilmesi, diğer bir deyişle birbirinden bağımsız olabilmesi için MAC matrisinin köşegen dışı terimlerinin küçük olması gerekmektedir. Ancak köşegen dışı terimlerin 0 olması beklenmemektedir. Çünkü iki mod şekil vektörünün MAC matrisinde yüksek bir benzerlik göstermesi için mutlaka birbirlerine dik (ortogonal) olmaları gerekmez. Mod şekil vektörleri farklı şekillerde de yüksek benzerlik gösterebilmektedir.

Carne ve Dohrmann (1994), sonlu elemanlar modelinden elde edilen mod şekillerini kullanarak yeni bir sensör yerleşim prosedürü açıklamışlardır. İlk başta gerekli sensör sayısından daha az olacak şekilde bir sensör seti belirlemişlerdir. Bu sensör setine birer birer sensör ekleyerek *MAC* matrisinin en büyük köşegen dışı terimini küçültülmeye çalışmışlardır. Yeni sensörlerin eklenmesi ile en büyük köşegen dışı terimi 0.6'dan 0.15'e düşürmüşlerdir.

b) Etkin Bağımsızlık Yöntemi

Optimum sensör yerleştirme yöntemlerinden etkin bağımsızlık yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem başlangıçta belirlenen aday sensör konumlarından yinelemeli bir şekilde indirgeme yaparak optimum sonuca ulaşmayı hedef almaktadır. Aday sensörler, önemli dinamik özelliklerin tamamını içeren hedef modları kapsayacak kadar geniş olmalıdır. Aday sensör sayısı çok fazla olduğundan optimum sensör konumuna indirgeme yapılmaktadır (Kammer, 1991). Aday sensörlerin etkin bağımsızlık katsayısı E_D katsayısı ile belirtilmektedir. E_D katsayısı,

$$E_D = \text{diag}(\Phi[\Phi^T\Phi]^{-1}\Phi^T) \quad (19)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada Φ , mod şekil matrisi, Φ^T ise mod şekil matrisinin transpozudur. E_D değeri 0 ile 1 arasında bir değerdir. Büyük E_D değerleri hedef modunun doğrusal bağımsızlığına katkısının fazla olduğu ve sensörler için uygun bir konum olduğu anlamına gelmektedir. Her bir konumun E_D değeri hesaplanarak hedef modunun doğrusal bağımsızlığına katkısına göre sıralanmaktadır. Katkı sağlamayan konumlar yinelemeli bir şekilde aday sensör kümesinden çıkarılmaktadır. Böylelikle optimum sensör yerleşimi belirlenmektedir.

c) Modal Kinetik Enerji Yöntemi

Modal kinetik enerji yönteminde, başlangıçta tüm dinamik özellikleri içeren hedef modları kapsayacak şekilde aday sensör konumları seçilmektedir. Bunların arasından hedef mod şekillerine en çok dinamik katkıyı sağlayan konumlar belirlenmektedir. Bu yöntem yapının serbestlik derecelerinden hangilerinin en fazla dinamik özellikleri gösterdiğini açıklamakta ve hedef modların içinden en büyük genliğe sahip konumu seçmektedir

(Papadopoulos ve Garcia, 1998). Her bir aday sensör konumun modal kinetik enerji katsayısı MKE katsayısı ile bulunmaktadır. MKE katsayısı,

$$MKE = \Phi \otimes M \Phi \quad (20)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada MKE , serbestlik derecelerinin modal kinetik enerji değerini temsil etmektedir. Φ , mod şekil matrisi, M , kütle matrisi, $\otimes$, terim terim matris çarpımıdır. Büyük MKE değeri, aday sensör konumlarının hedef mod şekillerine dinamik katkı sağlayan noktaları göstermektedir.

d) Özvektör Bileşen Çarpım Yöntemi

Özvektör bileşen çarpım yöntemi ile mod şekil matrisinin her satır vektörünün mutlak çarpımları hesaplanarak her bir sensör konumu için ECP katsayısı bulunmaktadır. ECP katsayısı,

$$ECP_i = \prod_{k=1}^m |\Phi_{ik}| \quad (21)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada ECP_i , i . sensör konumunun ECP değerini göstermektedir. m , mod şekillerinin sayısıdır. Küçük ECP değerleri düşük enerjiye sahip sensör konumlarını, büyük ECP değerleri ise yüksek enerjiye sahip sensör konumlarını temsil etmektedir. Düşük enerjiye sahip sensör konumlar silinerek yüksek ECP değerine sahip sensör konumları optimum sensör konumu olarak belirlenmektedir (Li, 2011).

e) Sürüş Noktası Kalıntı Yöntemi

Sürüş noktası kalıntı yönteminde yapının mod şekilleri elde edilip sensör konumları için DPR katsayısı hesaplanmaktadır. DPR katsayısı,

$$DPR = \Phi \otimes \Phi \Lambda^{-1} \quad (22)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada Φ , mod şekil matrisini, Λ^{-1} , köşegen özdeğer matrisinin tersidir. $\otimes$, terim terim matris çarpımıdır. DPR değerinin büyük olması durumunda aday sensör konumu, yerleşim için uygun sensör konumu olması beklenmektedir (Li, 2011).

1.8.2. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri, bir problemin en uygun veya en iyi çözümünü bulmayı amaçlamaktadır. Bunun için probleme özgü bir amaç fonksiyonu belirlenip belirli kısıtlar altında amaç fonksiyonu maksimize veya minimize edilmeye çalışılmaktadır. Optimizasyon yöntemleri, tüm aday çözümleri amaç fonksiyonuna göre değerlendirerek sistematik bir şekilde en uygun çözüme ulaşmaktadır. Bir optimizasyon probleminin çözüm sürecinde amaç fonksiyonu, tasarım değişkeni ve sınırlayıcılar kullanılmaktadır.

- **Amaç Fonksiyonu:** Bir optimizasyon probleminde en iyi çözüme ulaşana kadar tekrarlı bir şekilde minimize veya maksimize edilen matematiksel bir ifadedir.
- **Tasarım Değişkeni:** Amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesinde kullanılan değerlerdir.
- **Sınırlayıcılar:** En iyi çözümü ararken problemin türüne göre ihlal edilmemesi gereken değerlerdir. Belirli sınırlar altında olası çözümleri belirleyerek en iyi çözüme ulaşmayı sağlamaktadır.

OSY problemlerinde çoğunlukla biyolojik tabanlı, fizik tabanlı, coğrafya tabanlı ve sıralı yerleştirme optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır (Hassani ve Dackermann, 2023). Algoritmalar, bazı problemlerde iyi performans, bazı problemlerde ise kötü performans gösterebilmektedir. Bunun nedeni, çözüm uzayında etkin arama yapmak için geliştirilen optimizasyon yöntemlerinin her zaman en iyi çözümü bulmayı garanti etmemesidir.

a) Biyolojik Tabanlı Algoritmalar

Biyolojik tabanlı algoritmalar, çeşitli problemlerin çözümünde biyolojik sistemdeki doğal süreçlerden ilham almaktadır. Bu algoritmalar biyolojik organizmaların çevresel etkileşimlerini, evrimsel süreçlerini ve popülasyon davranışlarını modelleyerek en iyi çözümü elde etmeyi amaçlamaktadır. OSY problemlerinde yaygın olarak genetik algoritmalar (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), maymun algoritması (MA) kullanılmaktadır. GA, bir popülasyondaki bireylerin genlerinin seçim, mutasyon ve çaprazlama işlemlerinden geçiren ve Darwin'in seçim ve evrim teorisine dayanan bir algoritmadır (Yi vd., 2011). PSO, kuş sürülerinin hareketini ilham almaktadır. Kuş sürüsündeki her bir birey bir parçacık olarak kabul edilmektedir. Her parçacık çözüm alanında bir konumu göstermektedir. Parçacıkların en iyi konumuna ulaşması

amaçlanmaktadır (Rao ve Anandakumar, 2007). MA, tırmanma, izle-atla ve takla işlemlerinden oluşmaktadır. En iyi yerel çözümü ararken tırmanma işlemi, amaç değerini aşan mevcut çözümlerin noktalarını bulmak ve arama süreci hızlandırmak için izle-atla işlemi, hızlı bir şekilde yeni arama alanlarına geçmek için takla işlemi gerçekleştirilmektedir (Yi vd., 2012).

b) Fizik Tabanlı Algoritmalar

Fizik tabanlı algoritmalar, problemleri çözmek için çeşitli fiziksel yasaları ve kavramları kullanarak tasarlanmaktadır. Bu algoritmalar, fiziksel sistemlerin davranışlarından ve fizik biliminden esinlenerek optimizasyon problemlerini ele almaktadır. OSY problemlerinde yaygın olarak benzetilmiş tavlama algoritması (BTA) kullanılmaktadır. BTA, başlangıçta rasgele bir çözüm alanını yüksek sıcaklıkta başlatıp yavaş yavaş soğutarak çözüm alanının enerjisi azaltmaya çalışmaktadır. Sıcaklık azaldıkça elde edilen çözümlerin kabul edilme olasılığı azalmaktadır. Böylelikle en iyi çözüme yaklaşması sağlanmaktadır (Tong vd., 2014).

c) Coğrafya Tabanlı Algoritmalar

Coğrafya tabanlı algoritmalar, coğrafi arama alanında çözümler üretmeye dayanan optimizasyon algoritmasıdır. Tabu arama algoritması (TAA) coğrafya tabanlı algoritmalarından biridir (Ostachowicz vd., 2019). TAA, en iyi çözümü elde etmek için çözüm alanında gezinmeyi amaçlamaktadır. Gezinme sırasında bazı adımlara izin verilirken bazı adımlar yasaklanmaktadır. Bunları dikkate alarak en iyi çözüme ulaşmaya çalışmaktadır (Zhan ve Yu, 2014).

d) Sıralı Yerleştirme Algoritmaları

Sıralı yerleştirme algoritmaları, problemdeki elemanları belirli bir sıraya göre yerleştirmek veya dizmek için kullanılmaktadır. OSY problemlerinde sıralı sensör yerleştirme algoritması (SSYA) kullanılmaktadır. SSYA, minimum sayıda sensörleri en uygun konumlara yerleştirmek amacıyla her iterasyonda aday kümeye ekleme veya çıkarma yapmaktadır (Papadimitriou, 2004).

1.9. Rao Algoritmaları

Mevcut optimizasyon yöntemleri, OSY problemlerinde yaygın olarak uygulanan ve etkinlikleri gösterilen yöntemlerdir. Bu yöntemlerin performansı, farklı yapılarda ve çeşitli durumlarda uygulanarak gösterilmiştir. Ancak mevcut yöntemler her durumda optimum sonuca hızlı bir şekilde ulaşmayı garanti etmemektedir. Mevcut yöntemlerin eksikliklerini gidermek, problemlere yeni bir bakış açısı getirmek ve farklı algoritmaların keşfedilmesini sağlamak amacıyla yeni algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni algoritmalar, mevcut optimizasyon yöntemlerinden farklı bir yaklaşım sunabilmekte ve daha iyi performans gösterebilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada OSY problemlerinde daha önce kullanılmayan ve ilk olarak Rao (Rao, 2020) tarafından önerilen üç adet algorithmadan (Rao-1, Rao-2 ve Rao-3) Rao-1 algoritması kullanılmıştır.

Rao algoritmaları, Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 algoritmalarından oluşmaktadır. Algoritmaya özgü parametrelere bağlı olmayan, yalnızca iterasyon sayısı, popülasyon büyüklüğü gibi parametreleri kullanan metaforsuz bir algoritmadır. Rao algoritmaları mevcut popülasyonun en iyi ve en kötü çözümlerini kullanarak optimum sonuca ulaşmayı amaçlamaktadır. Mevcut popülasyonun en iyi ve en kötü çözümleri, optimizasyon sürecinin her iterasyonunda bir sonraki popülasyonu oluşturmak için kullanılmaktadır. Bir sonraki popülasyonun öncekinden daha üstün olması beklenmektedir.

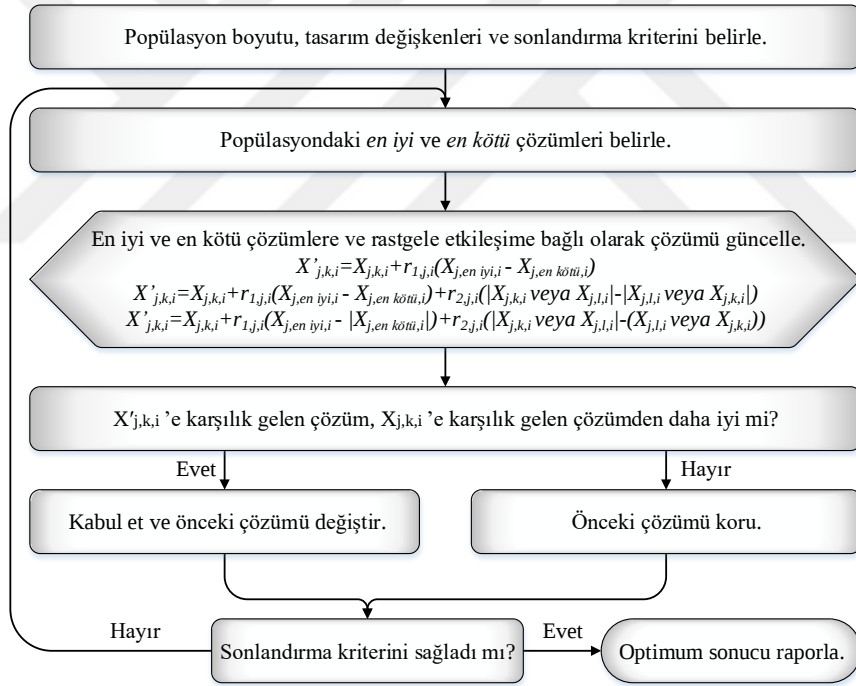
Minimize veya maksimize edilecek bir $f(x)$ fonksiyonu olduğu, herhangi bir i iterasyonunda m adet tasarım değişkeni ve n adet aday çözüm (popülasyon büyüklüğü, $k=1,2,...,n$) olduğu varsayıldığında tüm aday çözümlerden en iyi adayın $f(x)_{en\ iyi}$, en kötü adayın ise $f(x)_{en\ kötü}$ olduğu düşünülmektedir. i . iterasyonda k . aday için j . değişken değeri $X_{j,k,i}$ ise bu değer Eşitlik (23-25)'te verilen Rao algoritmaları denklemlerine göre güncellenmektedir.

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - X_{j,en\ kötü,i}) \quad (23)$$

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - X_{j,en\ kötü,i}) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} veya X_{j,l,i}| - |X_{j,l,i} veya X_{j,k,i}|) \quad (24)$$

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,en\ iyi,i} - |X_{j,en\ kötü,i}|) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} veya X_{j,l,i}| - (X_{j,l,i} veya X_{j,k,i})) \quad (25)$$

Burada, Eşitlik (23) Rao-1 algoritması, Eşitlik (24) Rao-2 algoritması, Eşitlik (25) ise Rao-3 algoritmasına ait denklemlerdir. $X_{j,en\ iyi,i}$ i . iterasyonda j değişkeninin en iyi aday değeri, $X_{j,en\ kötü,i}$ i . iterasyonda j değişkeninin en kötü aday değeridir. $X'_{j,k,i}$ değeri, $X_{j,k,i}$ değerinin güncellenmiş halidir. $r_{1,j,i}$ ve $r_{2,j,i}$, i . iterasyonda j . değişkeni için $[0, 1]$ arasında değişen rasgele değerlerdir. Eşitlik (24) ve Eşitlik (25)'te bulunan " $X_{j,k,i}$ veya $X_{j,l,i}$ " terimi, k . aday çözümün herhangi bir l . aday çözüm ile karşılaştırıldığı anlamına gelmektedir. Eğer " $X_{j,k,i}$ veya $X_{j,l,i}$ " teriminde k . çözümün uygunluk değeri l . çözümün uygunluk değerinden daha iyi ise bu terim $X_{j,k,i}$ olmaktadır. Aynı şekilde eğer " $X_{j,k,i}$ veya $X_{j,l,i}$ " teriminde l . çözümün uygunluk değeri k . çözümün uygunluk değerinden daha iyi ise bu terim $X_{j,l,i}$ olmaktadır. " $X_{j,l,i}$ veya $X_{j,k,i}$ " terimi için de aynı kural geçerli olmaktadır. Rao algoritmalarının akış şeması Şekil 10'da verilmektedir.

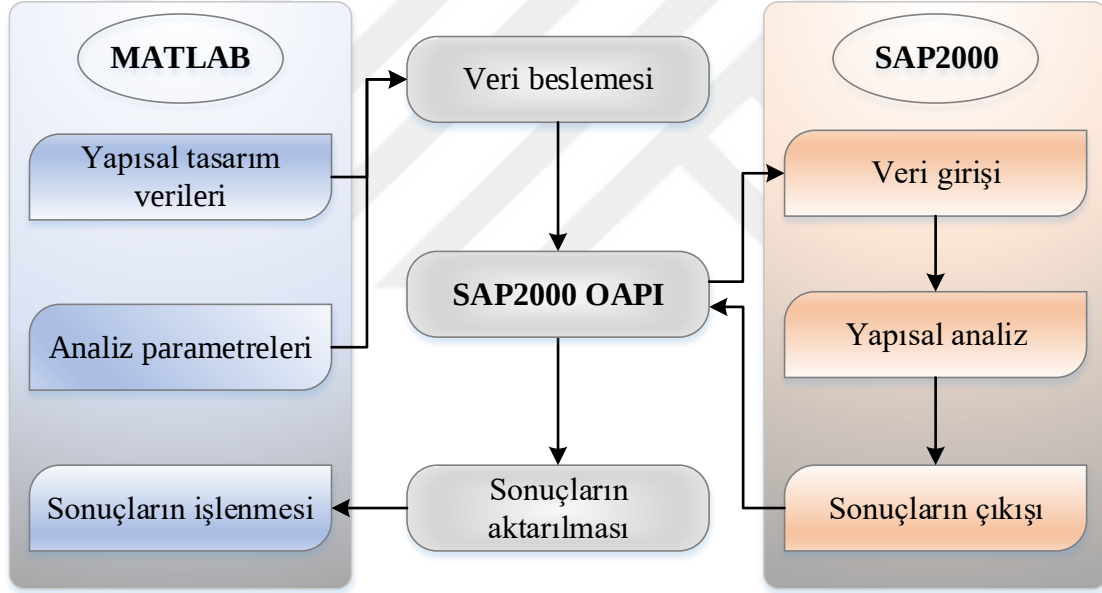


Şekil 10. Rao algoritmalarının akış şeması

Rao-1, Rao-2 ve Rao-3 algoritmalarının akış şemaları aynı olup algoritma değiştirildiğinde algoritmaya özgü denklem kullanılmaktadır. Rao algoritmaları, en iyi ve en kötü çözümün yanı sıra popülasyondaki aday çözümler arasındaki rastgele etkileşimini temel almaktadır.

1.10. SAP2000 Açık Uygulama Programlama Arayüzü

SAP2000 Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI), SAP2000 yapısal analiz ve tasarım programını, diğer yazılımlarla etkileşimini sağlamak amacıyla yazılım geliştiricilerin kullanabileceği bir programlama aracıdır. SAP2000 programının temel özelliklerini geliştirmek, özelleştirmek ve genişletmek için kullanılmaktadır. SAP2000 OAPI, birçok yazılım geliştirme dillerinin kullanımını desteklemektedir. Bu özelliği sayesinde yazılım geliştiriciler, kendi ihtiyaçları doğrultusunda üçüncü bir uygulamanın SAP2000 (2010) programıyla bağ kurmasını sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında MATLAB (2022) yazılım dili kullanılmıştır. Programlar arası veri akışı Şekil 11’de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 11. SAP2000 OAPI veri akışı

SAP2000 OAPI özellikleri doğrultusunda, SAP2000 ile hızlı ve güvenilir bir bağlantı sağlayarak iki yönlü veri akışıyla hem işlem öncesi hem de işlem sonrası süreçleri kolaylaştırmaktadır. Ayrıca büyük modellerin analizi sırasında veri alışverişi için gerekli süreyi azaltmak amacıyla ara dosya kullanımını ortadan kaldırmaktadır. Bir başka önemli özelliği ise farklı programlama dillerine uyum sağlamasıdır. Bu sayede üçüncü taraf uygulamalarla yapısal modelin kontrolü sağlanırken eş zamanlı veri aktarımına olanak tanınmaktadır. Bir diğer özelliği ise SAP2000 programının gelecek sürümleriyle uyumlu olacak şekilde üçüncü bir uygulamanın geliştirilmesine ve kullanımına izin vermesidir.

Böylelikle kullanıcının ihtiyaçlarına göre bir arayüz geliştirilebilmekte veya kullanıcının programladığı bir uygulama bu arayüze yerleştirilebilmektedir (Sextos ve Balafas, 2011).

1.11. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Yapı sağlığı izleme (YSİ) sisteminde sensörlerin optimum bir şekilde yerleştirilmesi geniş bir araştırma alanını kapsamaktadır. Optimum sensör yerleşimi (OSY) alanında çeşitli sensör yerleştirme yöntemleri, farklı yaklaşımlar ve optimizasyon algoritmaları kullanılarak sensör konfigürasyonlarının en uygun bir biçimde yerleştirilmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle YSI sisteminin ilk adımı olan sensör yerleşimi optimize edilerek sistemin performansı ve verilerin etkinliği artırılmış olmaktadır. Literatür incelendiğinde, farklı mühendislik yapılarında farklı yöntemlere ve algoritmalara başvurulduğu görülmektedir. Her bir yöntemin ve algoritmanın etkinliği farklı yapılar üzerinde uygulanarak incelenmiştir. En uygun yöntemin belirlenebilmesi için her bir yöntemin avantajları ve dezavantajlarının araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle OSY konusu sürekli olarak değişen ve gelişen bir alan olmaktadır. Bu tez çalışmasında bina türü yapılarda OSY problemleri ele alındığından, bu bölümde başta bina türü yapılar olmak üzere OSY alanında son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalar ve gelişmeler yer almaktadır. İlk olarak iki boyutlu bina türü yapılarda daha sonra iki boyutlu farklı yapılarda yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Bunlardan sonra sınırlı sayıda çalışılmış olan üç boyutlu bina türü yapılar ve daha sonra üç boyutlu farklı yapılarda yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Yi vd. (2011) ve Yi vd. (2012) büyük ölçekli yapıların yapı sağlığının izlenmesinde OSY probleminin çözümü için geliştirilmiş genetik algoritması (GGA) ve değiştirilmiş maymun algoritmasını (DMA) önermişlerdir. Sensörleri, yapının her bir serbestlik derecesi yerine katlara yerleştirmeyi amaçlamışlardır. Elde edilen sonuçları, genetik algoritma (GA) ve maymun algoritması (MA) sonuçları ile karşılaştırmış ve önerilen algoritmaların GA ve MA'ya göre daha hızlı yakınsadığı ve daha iyi sensör yerleşimi elde ettiği sonucuna ulaşmışlardır.

Sun ve Büyüköztürk (2015), yapay arı kolonisi (YAK) algoritmasını kullanarak sensör yerleşimini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın OSY problemlerinde uygulanabilirliğini göstermek amacıyla kafes köprü, yüksek bir yapı ve Canton Kulesi olmak üzere üç örnek üzerinde incelemişlerdir. İncelenen örneklerden yüksek yapı ve Canton Kulesi'nin toplu kütleli iki boyutlu modellerini oluşturmuşlardır. Böylece

basitleştirilmiş toplu kütleli model üzerinde sensör yerleşimini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen YAK algoritmasının OSY problemlerinde etkili olduğunu göstermişlerdir.

Yi vd. (2015), yüksek yapılara sensör yerleşimini belirleyebilmek için uyarlanabilir maymun algoritmasını (UMA) önermişlerdir. Önerilen UMA'nın performansını göstermek için iki yüksek yapı üzerinde sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yüksek yapıların toplu kütleli iki boyutlu modellerini oluşturmuşlardır. Toplu kütleli model üzerinde belirli adette sensör yerleşimi gerçekleştirmişlerdir. UMA'nın, MA'ya göre daha yüksek hesaplama verimliliğine sahip olduğu, diğer algoritmalara göre daha az iterasyon sayısı ve daha kararlı sonuçlar elde ettiği sonucuna varmışlardır.

Yi vd. (2015), optimum bir şekilde sensör yerleşimini gerçekleştirmek için MA ve bağışıklık algoritmasını (BA) birleştirerek hibrit bir yöntem olan bağışıklık maymun algoritmasını (BMA) önermişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için Canton Kulesi'ne sensör yerleştirmeyi amaçlamışlardır. Canton Kulesi'nin toplu kütleli iki boyutlu modelini oluşturarak sensörleri yerleştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın, MA'ya göre daha iyi arama yeteneğine sahip olduğu ve OSY problemlerinin çözümünde daha etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Lin vd. (2020), değiştirilmiş evrimsel algoritma (DEA) ile parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) birleştirerek çok amaçlı karar verme stratejisini kullanmışlardır. Önerilen stratejiyi, öteleme serbestlik derecelerinin dikkate alındığı Canton Kulesi'nin toplu kütleli modeline uygulamışlardır. İlk amaç fonksiyonu modal güvence kriteri, ikinci amaç fonksiyonu dinamik veri fazlalığı ve üçüncü amaç fonksiyonu ise titreşim yanıtının gücü olmak üzere üç amaç fonksiyonu kullanmışlardır. Canton Kulesi'nin önceki çalışmalarından elde edilen çözümleri, üç amaç fonksiyonunda uygulayarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. İlk amaç fonksiyonunun, karşılaştırdığı çalışmalara göre iyi olmadığı, ikinci amaç fonksiyonunun tüm çalışmalarda zayıf performans sergilediği, üçüncü amaç fonksiyonunun ise diğer çalışmalara göre üstün olduğunu göstermişlerdir.

İki boyutlu bina türü yapılara ek olarak iki boyutlu diğer yapılarda da OSY probleminin çözümü üzerinde durulmuştur.

Guo vd. (2004) ve Liu vd. (2008), iki boyutlu kafes sistemde sensörlerin konumunu GGA ile optimize etmişlerdir. GGA'nın, GA'ya göre daha iyi sonuçlar elde ettiği ve hasar tespitine dayalı sensör konumlarını optimize etme yeteneğine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Lee ve Eun (2022), sensör yerleşimlerini optimize etmek amacıyla etkin bağımsızlık, modal kinetik enerji, modal birim şekil değiştirme enerjisi, modal güvence kriteri yöntemleri gibi OSY yöntemlerini değiştirerek sistem tanımlama, hasar tespiti, titreşim kontrolü gibi amaçlara yönelik yeni yaklaşımlar önermişlerdir. İki boyutlu kafes sistemde değiştirilmiş farklı OSY yöntemlerini kullanarak sensör yerleşimini gerçekleştirmişlerdir. Her bir yöntemin farklı sensör düzenine neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Sensörlerin öngörülen amaca uygun yöntem ile yerleştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Martin ve Droguett (2024), OSY probleminin çözümü için ortalama birim şekil değiştirme enerjisini kullanan kuantum yaklaşık optimizasyon algoritmasını sunmuşlardır. Önerilen algoritmayı farklı ölçeklerdeki iki boyutlu kafes köprülere uygulamışlardır. Kuantum devresinin boyutunun artmasıyla çözümlerin doğruluğunun arttığını göstermişlerdir.

Literatür incelendiğinde, son 5 yılda üç boyutlu bina türü yapılarda OSY problemi ele alınmaya başlandığı görülmektedir.

Liu vd. (2018), sensör yerleştirme yöntemlerini değerlendirerek en küçük karelerinin ortalamasının kareköküne dayalı bir algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmayı üç boyutlu kafes kule yapısına uygulamışlardır. Belirli sensör sayısı ve ilgili mod sayısına göre oluşan etkiyi; koşul numarası, Fisher bilgi matrisinin determinantı ve karelerinin ortalamasının karekökü olmak üzere üç amaç fonksiyonu kullanarak sensör yerleştirme yöntemlerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Karelerinin ortalamasının karekökünün minimum değerlerini tercih eden algoritmanın, çoğu durumda doğrusal bağımsızlığı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Moussas ve Pnevmatikos (2019), üç boyutlu küçük ölçekli ve büyük ölçekli bir çerçeve taşıyıcı sisteme sahip bir yapıya sensör yerleşimi için yer değiştirme indeksi yöntemini önermişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için yapıların üç boyutlu sonlu elemanlar modelini SAP2000 yapısal analiz programında oluşturduktan sonra modal analiz sonuçlarını Excel-VBA veya MATLAB'da geliştirilen optimizasyon aracında kaydetmişlerdir. Küçük ölçekli binada, her bir serbestlik derecesinin yer değiştirme indeksleri hesaplanıp önem sırasına göre azalan bir şekilde sıralayarak en üstteki noktaları seçmişlerdir. Büyük ölçekli ve karmaşık binalarda dikkate alınması gereken önemli mod sayısı ve serbestlik derecesi arttığından önerilen yöntemin geliştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Üç boyutlu bina türü yapılara ek olarak üç boyutlu diğer yapılarda da OSY çalışmaları yapılmıştır.

Meo ve Zumpano (2004) ile Meo ve Zumpano (2005), bir köprünün yapısal dinamik davranışını karakterize edebilmek için farklı sensör yerleştirme yöntemlerini kullanmışlardır. Bu yöntemleri, ortalama kare hatası ve Fisher bilgi matrisini karşılaştırma kriteri kullanarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak Meo ve Zumpano (2004), sensör yerleştirme yöntemlerinden etkin bağımsızlık-sürüş noktası kalıntı yönteminin etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır. Meo ve Zumpano (2005), varyans yönteminin, etkin bağımsızlık-sürüş noktası kalıntı yöntemine yakın sonuçlar elde ettiği sonucuna ulaşmışlardır.

Cruz vd. (2010), üç boyutlu stadyum yapısına sensörleri konumlandırmak için genetik algoritmasını (GA) kullanmışlardır. GA ile elde edilen sonuçları, etkin bağımsızlık ve modal kinetik enerji yöntemi gibi sensör yerleştirme yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. GA'nın diğer yöntemlere göre daha düzgün bir sensör dağılımı oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

Lian vd. (2013), kemer barajlarda sensör yerleşimi gerçekleştirmek için geliştirilmiş ayrık PSO ile klonal seçme algoritmasını birleştirerek hibrit bir algoritma; Cao vd. (2021) ise veri füzyonu algoritmasını önermişlerdir. Önerilen algoritmaların etkinliklerini göstererek büyük yapıların OSY problemlerinin çözümünde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Zhang vd. (2014), kubbe yapısına sensör yerleşimi yapmak için geliştirilmiş PSO algoritmasını; Beygzadeh vd. (2014), geliştirilmiş genetik algoritmasını (GGA); Kaveh vd. (2022), iki farklı ölçekli kubbe yapısı için ikili su döngüsü algoritmasını önermişlerdir. Zhang vd. (2014), geliştirilmiş PSO algoritmasının, PSO algoritmasına göre yakınsama hızının daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Beygzadeh vd. (2014), GGA'nın, GA'ya göre daha iyi yakınsadığı ve daha iyi sensör düzeni sağladığını ortaya koymuşlardır. Kaveh vd. (2022), önerilen algoritmanın, ikili PSO, ikili Harris şahinleri algoritması ve ikili gri kurt algoritmasına göre üstün olduğu ve yakınsama hızı açısından daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Yin vd. (2019), bir kafes köprü ve kemer köprü üzerinde sıralı yerleştirme algoritma (SYA) kullanarak sensör yerleşimini optimize etmişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak modal güvence kriterini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yöntemin diğer SYA'lara göre daha az sensöre ihtiyaç duyduğu ve MAC matrisinin en büyük köşegen dışı

değerine daha hızlı ulaştığı, ancak sensör sayısı arttıkça hesaplama süresinin arttığını göstermişlerdir.

1.12. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapı sağlığı izleme (YSİ) sistemlerinin ilk aşaması olan sensörlerin sayısı ve yerleşimi, yapıların güvenliği ve YSİ sisteminin verimliliği açısından kritik bir önem taşımaktadır. Minimum sayıda sensörün en uygun konumlara yerleştirilmesi, optimum sensör yerleşimi (OSY) problemi ile ele alınmaktadır. OSY yöntemleri kullanılarak sensörlerin konumlandırılması, sensörlerden alınan verilerin doğruluğunun ve kalitesinin artırılmasına, verilerin değerlendirme süresinin azaltılmasına ve böylelikle maliyet tasarrufunun sağlanmasına olanak tanımaktadır. İlk OSY çalışmaları, matematiksel teknikler ve sezgisel yaklaşımlar kullanarak sensör yerleştirme yöntemlerini sunmaktadır. Teknolojik gelişmeler ile bu alandaki çalışmalar ve araştırmalar sürekli olarak gelişmekte ve iyileştirilmektedir. Sensörler genellikle yüksek binalar ve köprü gibi potansiyel risklerin önemli olduğu yapılara yerleştirilmektedir. Ancak gelişen teknoloji ile sensörler uygun maliyetli ve erişilebilir bir araç haline gelmektedir. Bu sayede her yapıya sensörler yerleştirilebilmekte ve YSİ kapsamında izlenebilmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde, bina türü yapılara uygulanan OSY çalışmalarında genellikle iki boyutlu yüksek yapıların dikkate alındığı, üç boyutlu yapılarla ilgili çalışmaların ise son 5 yılda artmaya başladığı görülmüştür. Bu çalışmalarda sensörler, yapının her bir serbestlik derecesi yerine sadece kat seviyelerine yerleştirilmiştir. Ayrıca sensör yerleşiminde, çalışmaların birçoğunda ilgili modlar seçilirken yapının modal kütle katılımı dikkate alınmadan sınırlı sayıda mod dikkate alınarak sensör yerleşimi yapılmıştır. Ancak tercihe bağlı olarak belirlenen bu mod sayısı her zaman önemli modları kapsamayabilmektedir. Doğru modal parametrelere ulaşabilmek için önemli modların dikkate alınması gerekmektedir. Aksi takdirde yapısal değişikliklerin doğru bir şekilde değerlendirilememesine sebep olmaktadır. Yine çalışmaların önemli bir kısmında kullanılacak sensör sayısı araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Bu seçim tercihe bağlı olarak belirlenmekte ve genellikle optimum sensör sayısını garanti etmemektedir. Fakat OSY problemlerinde sensörlerin yerleşimi kadar sensör sayısı da oldukça önemlidir. Az sayıda sensör kullanılması yeterli kalitede veri elde edilememesine ve YSİ sisteminin güvenilirliğinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Fazla sayıda sensör kullanımı ise

maliyet açısından ekonomik olmamakla birlikte işlenecek veri miktarının artmasına ve verilerin değerlendirme süresinin uzamasına neden olmaktadır. Literatürde OSY problemlerinin ele alındığı çalışmalar incelendiğinde, optimum sensör sayısının belirlendiği yeterli sayıda çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada OSY problemi için ele alınacak yapının ilgili mod sayısı, modal kütle katılım oranı ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra seçilen ilgili mod sayısına göre farklı sensör sayıları optimize edilerek optimum sensör sayısı belirlenmiştir. Bu amaçla hem mod sayısı hem de sensör sayısının optimize edilmesi sağlanmıştır.

Günümüzde sensör teknolojisindeki gelişmeler sayesinde basit yapılardan karmaşık yapılara kadar her yapının YSİ kapsamında izlenmesi mümkün hale gelmektedir. Bu nedenle, yeni optimizasyon algoritmalarının OSY problemlerine uygulanması ve etkinliğinin gösterilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada yukarıda belirtilen amaçlara ek olarak, literatürde daha önce OSY problemlerinde uygulanmayan ve sınırlı sayıda gerçek yapısal problemlerde kullanılan metaforsuz algoritma yöntemlerinden biri olan Rao-1 algoritması kullanılması amaçlanmıştır. Rao-1 algoritmasının kullanılmasının temel nedeni, literatürdeki önceki algoritmaların eksik olduğu veya geliştirilebilecek yönlerini ele alarak Rao-1 algoritmasının potansiyelini keşfetmektir. Bu amaçlar doğrultusunda, MATLAB programlama dili, Rao-1 algoritması ve SAP2000 Açık Uygulama Programlama Arayüzü (OAPI) özelliklerinin etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturularak bina türü yapıların yapı sağlığı izlemesinde optimum sensör yerleşiminin belirlenmesi planlanmaktadır. Bu tez çalışması genel olarak dört bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, YSİ sistemi hakkında bilgi verilmiş olup, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı için bu sürecin öneminden bahsedilmiştir. YSİ sürecinin adımları anlatılarak sistemin ilk adımı olan sensör yerleşiminin önemi vurgulanmıştır. Optimum sayıda sensörün en uygun konumlara yerleştirilmesi amacıyla uygulanan OSY yöntemleri üzerinde durulmuştur. Yapısal davranışın değerlendirilebilmesi ve OSY yöntemlerinin uygulanabilmesi için modal analiz yöntemleri açıklanmıştır. Daha önce OSY yöntemlerinde uygulanan algoritmalar incelenerek bu çalışmada tercih edilen algoritmaya yer verilmiştir. Son olarak konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde, tez kapsamında MATLAB programlama dili, Rao-1 algoritması ve SAP2000 OAPI özellikleri ile oluşturulan bilgisayar programı açıklanmıştır. Bu bilgisayar programı bir akış şeması ile özetlenmiş olup optimizasyon sürecinde kullanılan amaç fonksiyonlarına yer verilmiştir. OSY problemlerinin çözümü için seçilen 10 katlı iki

boyutlu toplu kütleli sistem, 4 katlı ve 20 katlı üç boyutlu çerçeve sistemin yapısal modelleri ve sonlu elemanlar modeli tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, seçilen örneklerin OSY sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu veriler grafik, tablo ve şekiller halinde sunulmuş olup detaylı açıklamalarla yorumlanmıştır.

Dördüncü bölümde, elde edilen sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

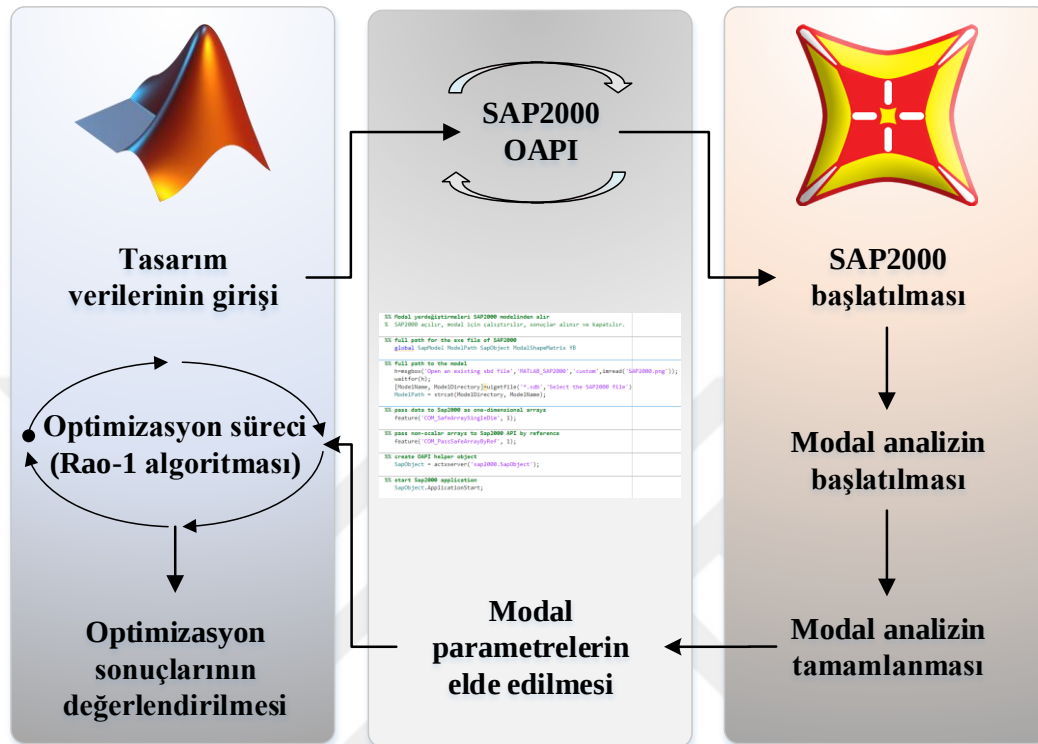


2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, 10 katlı iki boyutlu toplu kütleli sistem ile 4 katlı ve 20 katlı üç boyutlu sistemlerin optimum sensör yerleşimi (OSY) problemlerinin çözümü gerçekleştirilmiştir. Öncelikle OSY yönteminin uygulanışı göstermek amacıyla basit bir yapı olan 10 katlı toplu kütleli sistem ele alınmıştır. Bu sisteme farklı sayıda sensörlerin yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik MATLAB'da 10 katlı toplu kütleli sistemin modal analizi gerçekleştirilerek sensörlerin yerleştirilebileceği olası kombinasyonlar hesaplanıp en uygun konumları bulunmuştur. Ancak gerçek hayatta yapılar birçok serbestlik derecesinden oluşan karmaşık sistemlerdir. Dolayısıyla böyle sistemlerin MATLAB'da modellenmesi, modal analizinin gerçekleştirilmesi ve sensörlerin yerleştirilebileceği olası kombinasyonların hesaplanıp en iyi çözümün elde edilmesi çok zordur. Bu yüzden karmaşık sistemlerin sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve analizlerinin gerçekleştirebilmesi için SAP2000 gibi paket programlardan faydalanılmaktadır. Bu gibi karmaşık sistemlerin OSY probleminde sensörlerin yerleştirilebileceği çok fazla serbestlik derecesi olduğundan olası kombinasyonları değerlendirerek en iyi çözümün elde edilmesi zor bir hale gelmektedir. Bu nedenle bu tür OSY problemlerini çözmek için optimizasyon yöntemlerine başvurulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bina türü yapıların OSY problemlerinin çözümü için MATLAB, Rao-1 algoritması ve SAP2000 OAPI özelliklerinin etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı kullanılarak sensör sayısı ve konumu optimize edilmiştir. Bu bilgisayar programı yardımı ile tasarım değişkenlerinin (ilgili mod sayısı, sensör sayısı) veri girişi yapılarak OSY probleminin çözümünde gerekli olan modal parametreleri almak için SAP2000'den veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin uygulanabilmesi için öncelikle OSY gerçekleştirilecek yapı SAP2000 programında modellenmiştir. Daha sonra MATLAB'da tasarım değişkenleri ve yapı boyutu (iki veya üç boyutlu) girilerek yapının düğüm noktalarında dikkate alınması gereken serbestlik dereceleri belirlenmiştir. Sensörler, yapının hangi doğrultudaki serbestliğine (x, y ve z) yerleştirilecek ise o serbestlik dereceleri dikkate alınmıştır. Bu adımdan sonra SAP2000 OAPI aracılığıyla SAP2000 ile bağlantı kurularak modal analiz gerçekleştirip modal parametreler elde edilmiştir. Optimizasyon parametreleri (koşum sayısı, popülasyon ve iterasyon sayısı) girildikten sonra ilgili amaç fonksiyonu belirlenerek optimizasyon algoritması (Rao-1 algoritması)

seçilmiştir. Bu işlemlerden sonra optimizasyon süreci başlatılmış olmaktadır. Son olarak optimizasyon süreci tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Oluşturulan bilgisayar programının genel bir akış şeması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. MATLAB yazılımı kullanılarak SAP2000 OAPI aracılığı ile SAP2000 ve optimizasyon arasında veri aktarımı

2.1. Optimum Sensör Yerleşimi Problemlerinin Çözümü

OSY, minimum sayıda sensörlerin en uygun konumlara yerleştirilmesi amacıyla tüm konumlardan en iyi konumları seçmeye çalışan kombinatoryal bir optimizasyon problemidir. Bir yapıda n adet olası sensör konumu (serbestlik derecesi) ve bu konumlara yerleştirilmesi gereken s adet sensör ($s < n$) olduğu varsayıldığında, sensörlerin tüm kombinasyonları,

$$C = \frac{n!}{s!(n-s)!} \quad (26)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada C tüm kombinasyonların sayısını belirtmektedir.

Serbestlik derecesi az olan yapıların olası kombinasyon sayısı az olduğundan bu tip yapıların OSY problemlerinin çözümü kolaylıkla elde edilebilmektedir. Ancak yapıdaki

serbestlik derecesi arttıkça kombinasyon sayısı artmakta ve bu durum kesin çözümü bulmayı zorlaştırmaktadır. Serbestlik derecesi çok olan karmaşık yapıların OSY probleminin çözümü için optimizasyon yöntemlerinden faydalanılarak en iyi çözüme en kısa sürede ulaşılması amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, 10 katlı toplu kütleli sisteme yerleştirilecek sensörlerin olası kombinasyonları hesaplanıp en iyi çözüm elde edilmiştir. Üç boyutlu çerçeve sistemlere yerleştirilecek sensör sayısı ve konumu ise açıklanan bilgisayar programı ile optimize edilmiştir.

2.2. Amaç Fonksiyonları

OSY problemlerinde, sensörleri konumlandırmak için amaç fonksiyonu belirlenmektedir. Amaç fonksiyonu, bir optimizasyon probleminde minimize veya maksimize edilen fonksiyondur. Bu çalışmada, iki mod şekil vektörü arasındaki korelasyonu belirten modal güvence kriterinden türetilen üç yöntem kullanılmıştır. İlk yöntem *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının en büyük değerini küçültmeye çalışan *mak-MAC* yöntemidir. İkinci yöntem *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının en küçük ortalamasını veren *ort-MAC* yöntemidir. Son yöntem ise *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının en küçük karekök ortalaması veren *rms-MAC* yöntemidir. Bu üç yöntem için ayrı ayrı üç amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Optimizasyon sürecinde mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı arttırmak için Eşitlik (18)'de verilen *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının en büyük değerini küçültmeye çalışan *mak-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu,

$$f_1(x) = \max_{i \neq j} \{MAC_{ij}\} \quad (27)$$

ile gösterilmektedir. Burada $f_1(x)$, *mak-MAC* yönteminin amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Bu eşitlikte i ve j sırasıyla satır ve sütun değerlerini göstermektedir. *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1'e yakın değerler mod şekil vektörleri arasında yüksek benzerlik olduğu ve birbirinden ayırt edilemez olduğu anlamına gelirken 0'a yakın değerler mod şekil vektörleri arasında benzerliğin az olduğu ve birbirinden ayırt edilebilir olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin minimize edilmesi optimum bir çözümün elde edilebileceğini göstermektedir.

Bir diğer yöntem olan ve Eşitlik (18)'de verilen *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının en küçük ortalamasını dikkate alan *ort-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu,

$$f_2(x) = \text{ort}_{i \neq j} \{MAC_{ij}\} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (MAC_{ij}) \quad (28)$$

ile ifade edilmektedir. Burada $f_2(x)$, minimize edilmesi amaçlanan *ort-MAC* yönteminin amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Bu eşitlikte m , ilgili mod sayısını göstermektedir. *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasını veren $f_2(x)$ fonksiyonu, mod şekil vektörleri arasındaki benzerliği göstermektedir. $f_2(x)$ fonksiyonunun küçük değerleri benzerliğin az olduğu, büyük değerleri ise benzerliğin fazla olduğunu göstermektedir.

OSY probleminin çözümü için kullanılan son yöntem olan ve Eşitlik (18)'de verilen *MAC* matrisinin köşegen dışı elemanlarının karekök ortalama (root mean square, rms) değerini veren *rms-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu ise,

$$f_3(x) = \text{rms}_{i \neq j} \{MAC_{ij}\} = \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (MAC_{ij})^2} \quad (29)$$

şeklindedir. Burada $f_3(x)$, minimize edilmesi amaçlanan *rms-MAC* yönteminin amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. $f_3(x)$ fonksiyonu da mod şekil vektörleri arasındaki benzerliği göstermektedir.

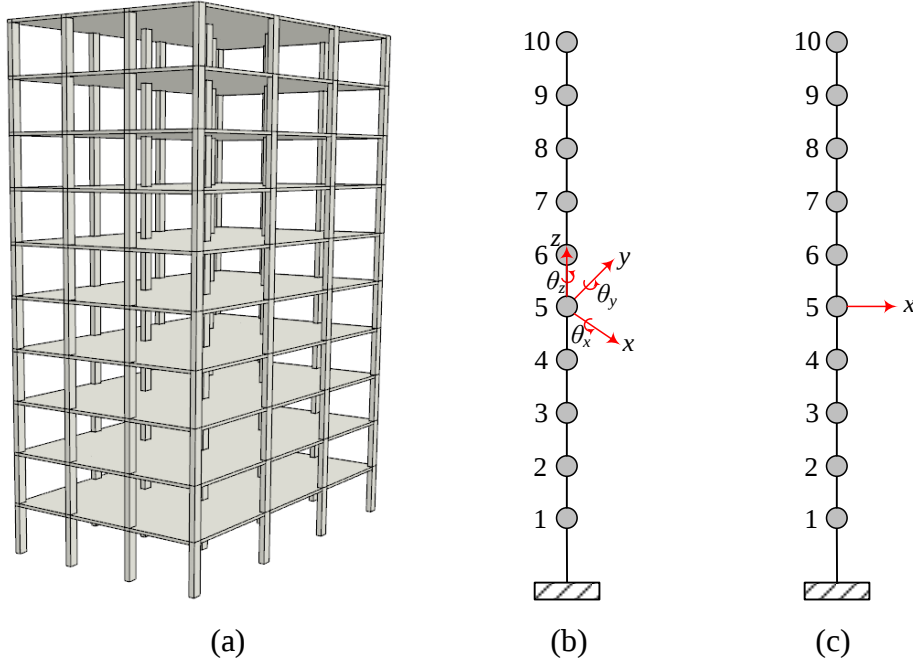
2.3. Seçilen Modellerin Yapısal Özellikleri

2.3.1. 10 Katlı Toplu Kütleli Sistem

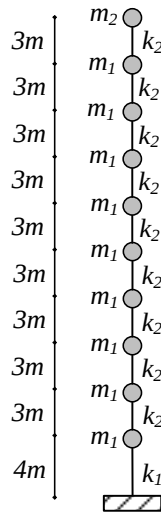
OSY yönteminin uygulanışını basit bir yapı üzerinde göstermek amacıyla 10 kattan oluşan toplu kütleli bir sistem kullanılmıştır. Toplu kütleli sistem, belirli bir hacim içinde yayılı olan kat kütlelerinin bir noktada toplandığı kabulüne dayanmaktadır. Bu kabul ile sistemin serbestlik derecesi azaltılmaktadır. Şekil 13(a)'da 10 kattan oluşan üç boyutlu bir bina gösterilmektedir. Üç boyutlu bina, birçok serbestlik derecesinden oluşan karmaşık bir sistem olup Şekil 13(b)'deki gibi basitleştirilmiş toplu kütleli sisteme dönüştürülmüştür. Şekil 13(b)'de her katın üç öteleme ve üç dönme olmak üzere 6 adet serbestlik derecesi, 10

katlı toplu kütleli sistemin ise toplam 60 adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Dönme serbestlik derecelerinin gerçek uygulamalarda ölçülmesi zor olduğundan yatay ötelemeler dikkate alınmaktadır. Şekil 13(c)'de görüldüğü gibi 10 katlı toplu kütleli sistemde yalnızca x yönünde öteleme serbestlik derecesi dikkate alınmış olup toplam serbestlik derecesi 10'a düşürülmüştür. Basitleştirilmiş toplu kütleli sistemin OSY probleminin çözümü için *mak-MAC*, *ort-MAC* ve *rms-MAC* yöntemleri kullanılarak farklı sayılarda sensör yerleşimi yapılması ve bu sensörlerin en uygun konumlarının gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, MATLAB'da farklı sayıdaki sensörlerin tüm kombinasyonları için amaç fonksiyonunu minimize edecek şekilde bir kod oluşturulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan 10 katlı toplu kütleli sistem Şekil 14'te verilmektedir. Bu sistemde, ilk 9 katın kütlesi aynı olup $m_1=9860$ kg, son katın kütlesi ise $m_{10}=9845$ kg'dır. İlk katın yüksekliği 4 m, diğer katların yükseklikleri aynı olup 3 m'dir. Kolon atalet momenti, $I=5.20 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ olarak verilmiştir. İlk katın yüksekliği farklı olduğundan eğilme rijitliği diğer katlardan farklı olmak üzere $k_1=2.93 \times 10^7$ N/m, diğer katların eğilme rijitliği ise $k_2=6.94 \times 10^7$ N/m olarak verilmiştir. Elastisite modülü ve kesit alanı değerleri sırasıyla, $E=3 \times 10^{10}$ N/m² ve $A=0.25$ m² alınmıştır. Bu örnekte sadece x yönünde öteleme serbestlik derecesi dikkate alınmıştır.



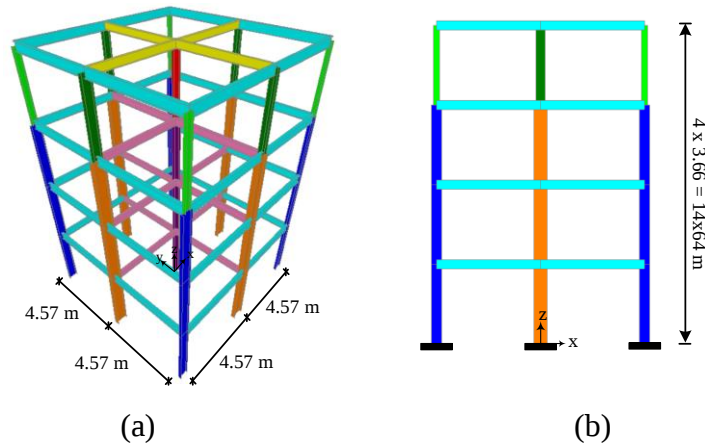
Şekil 13. Üç boyutlu model (a), 60 serbestlik dereceli toplu kütleli model (b) ve 10 serbestlik dereceli toplu kütleli model (c)



Şekil 14. 10 katlı toplu kütleli sistem

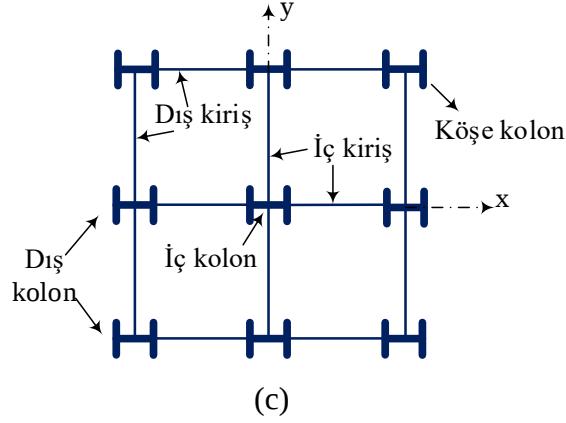
2.3.2. 4 Katlı Çerçeve Sistem

MATLAB, Rao-1 algoritması ve SAP2000 OAPI özellikleri ile oluşturulan bilgisayar programı ile daha önce optimum ağırlık problemlerinde ele alınan 4 katlı üç boyutlu çerçeve sistem ele alınmıştır (Daloğlu vd., 2016). Çerçeve sistemde 36 adet kolon, 48 adet kiriş ve 45 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Sistemi oluşturan kolon ve kiriş elemanlar toplam 10 gruba ayrılmış olup her bir grup farklı renkte gösterilmiştir. Gruplara ayrılmış elemanların üç boyutlu modelde görünümü Şekil 15(a)'da; sistemin yan görünümü Şekil 15(b)'de; plan görünümü ise Şekil 15(c)'de verilmiştir. Her bir grupta kullanılan profiller Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 15. 4 katlı çerçeve sistemin üç boyutlu görünümü (a), yan görünümü (b) ve plan görünümü (c)

Şekil 15'in devamı

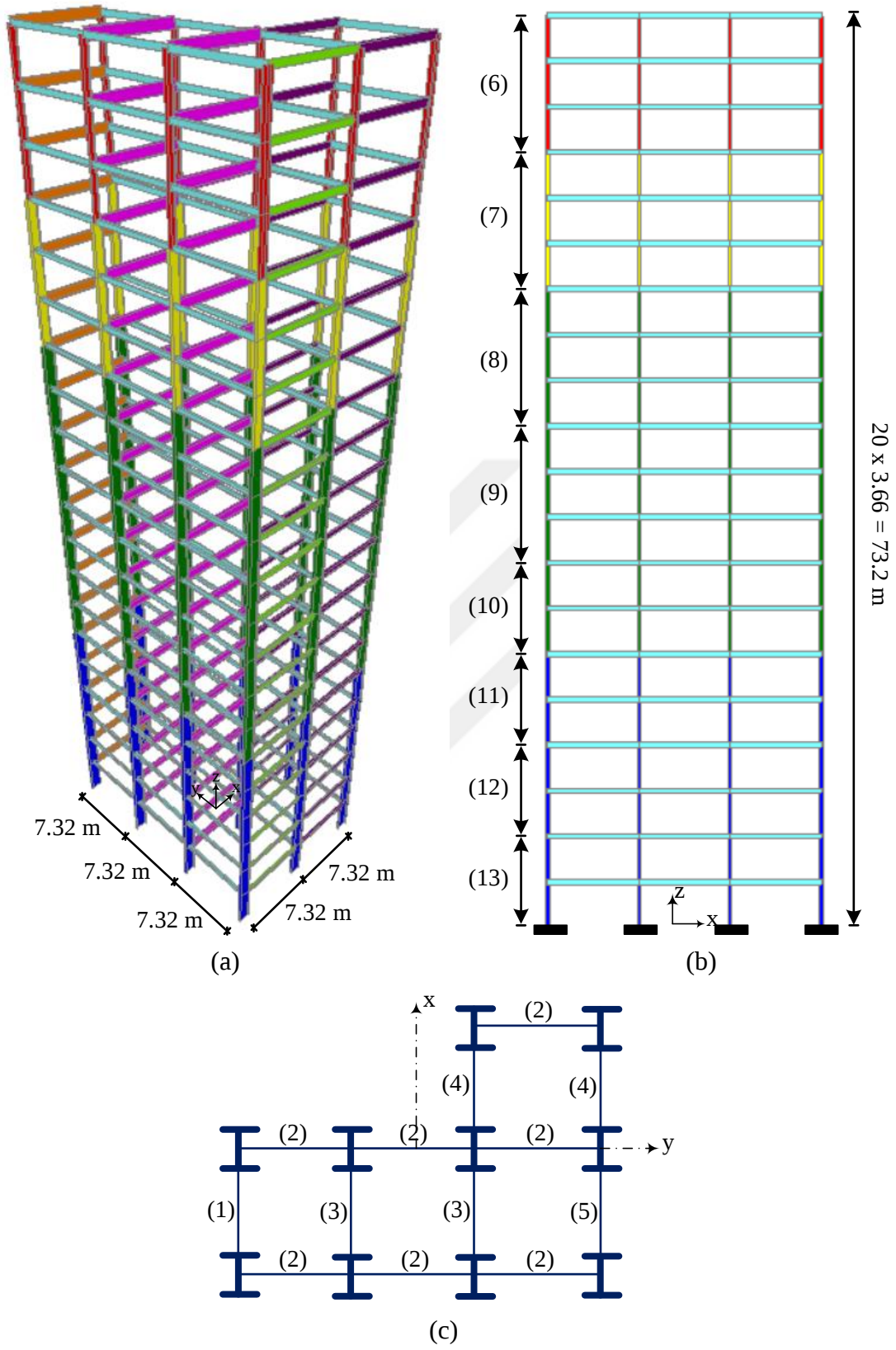


Tablo 1. 4 katlı çerçeve sistemde kullanılan profiller

Grup no	Grup rengi	Elemanlar	Profil adı
(1)	●	4. katın dış kirişleri	W16X31
(2)	●	3., 2. ve 1. katın dış kirişleri	W16X31
(3)	●	4. katın iç kirişleri	W14X26
(4)	●	3., 2. ve 1. katın iç kirişleri	W14X30
(5)	●	4. katın köşe kolonları	W10X26
(6)	●	3., 2. ve 1. katın köşe kolonları	W18X40
(7)	●	4. katın dış kolonları	W16X40
(8)	●	3., 2. ve 1. katın dış kolonları	W24X68
(9)	●	4. katın iç kolonları	W16X26
(10)	●	3., 2. ve 1. katın iç kolonları	W16X36

2.3.3. 20 Katlı Çerçeve Sistem

Daha önce optimum ağırlık problemlerinde ele alınan 20 katlı üç boyutlu çerçeve sistemin de OSY probleminin çözümü oluşturulan bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir (Daloğlu vd., 2016). Çerçeve sistemde 200 adet kolon, 260 adet kiriş ve 210 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Sistemi oluşturan kolon ve kiriş elemanlar toplam 13 gruba ayrılmış olup her bir grup farklı renkte gösterilmiştir. Gruplara ayrılmış elemanların üç boyutlu modelde görünümü Şekil 16(a)'da; sistemin yan görünümü Şekil 16(b)'de; kolon yerleşimi plan üzerinde Şekil 16(c)'de verilmiştir. Her bir grupta kullanılan profiller Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 16. 20 katlı çerçeve sistemin üç boyutlu görünümü (a), yan görünümü (b) ve plan görünümü (c)

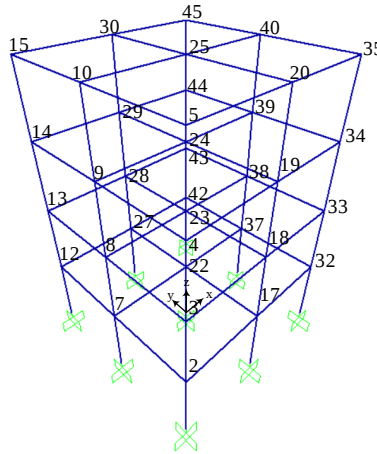
Tablo 2. 20 katlı çerçeve sistemde kullanılan profiller

Grup no	Grup rengi	Profil adı
(1)	●	W27X84
(2)	●	W16X57
(3)	●	W30X90
(4)	●	W21X44
(5)	●	W18X46
(6)	●	W18X86
(7)	●	W30X99
(8)	●	W40X149
(9)	●	W40X149
(10)	●	W40X149
(11)	●	W44X198
(12)	●	W44X198
(13)	●	W44X198

2.4. Seçilen Modellerin Sonlu Elemanlar Modeli

2.4.1. 4 Katlı Çerçeve Sistem

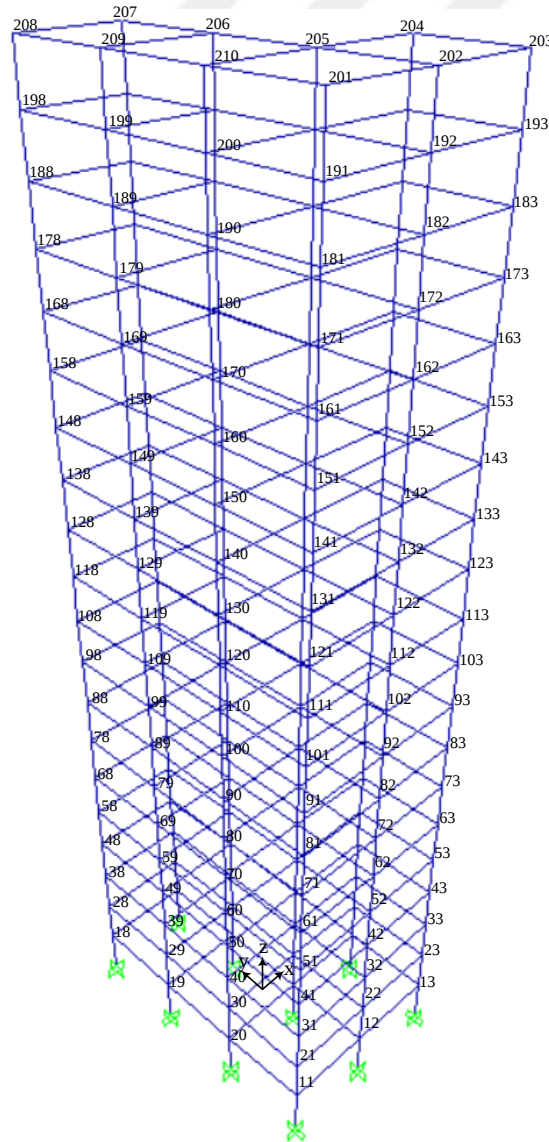
Oluşturulan bilgisayar programında kullanılmak üzere 4 katlı üç boyutlu çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli SAP2000 programında modellenmiştir. Çerçeve sistemde 84 adet çubuk eleman ve 45 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Sistemin tüm düğüm noktalarında 6 adet serbestlik derecesi olup her katta döşemelerde rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Sistem ankastre mesnetlidir. Elastisite modülü ve yoğunluk değerleri sırasıyla, $E=2 \times 10^{11}$ N/m² ve $\rho=7850$ kg/m³ alınmıştır. 4 katlı çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli ve düğüm noktalarının numaraları Şekil 17’de verilmiştir.



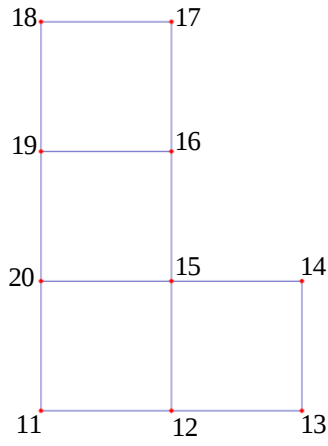
Şekil 17. 4 katlı çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli

2.4.2. 20 Katlı Çerçeve Sistem

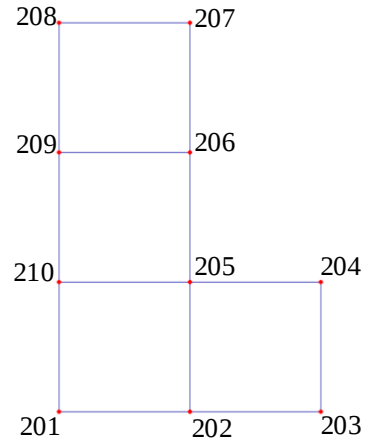
Oluşturulan bilgisayar programında kullanılmak üzere 20 katlı üç boyutlu çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli SAP2000 programında modellenmiştir. Çerçeve sistemde 460 adet çubuk eleman ve 210 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Sistemin tüm düğüm noktalarında 6 adet serbestlik derecesi olup her katta döşemelerde rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Sistem ankastre mesnetlidir. Elastisite modülü ve yoğunluk değerleri sırasıyla $E=2 \times 10^{11}$ N/m² ve $\rho=7850$ kg/m³ alınmıştır. 20 katlı çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli Şekil 18’de verilmektedir. Çerçeve sistemin düğüm noktalarının numaralandırmasına ait bilgiler Şekil 19’da verilmiştir.



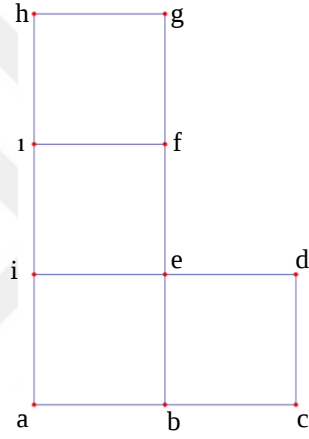
Şekil 18. 20 katlı çerçeve sistemin sonlu elemanlar modeli



1. kat düğüm noktaları



20. kat düğüm noktaları



n. kat düğüm noktaları

$$\begin{aligned}
 a &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 1 \\
 b &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 2 \\
 c &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 3 \\
 d &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 4 \\
 e &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 5 \\
 f &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 6 \\
 g &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 7 \\
 h &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 8 \\
 i &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 9 \\
 j &= (\text{kat sayısı} \times 10) + 10
 \end{aligned}$$

Şekil 19. 20 katlı çerçeve sistemin düğüm noktalarının numaralandırması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. 10 Katlı Toplu Kütleli Sistem

10 katlı toplu kütleli sistemin modal analizi MATLAB’da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm mod şekil vektörleri dikkate alınarak sensör yerleşimi yapılmıştır. Sensör yerleşimi yapılırken *mak-MAC*, *ort-MAC* ve *rms-MAC* yöntemlerinin Eşitlik (27-29)’da verilen amaç fonksiyonları kullanılmış olup sabit mod sayısı ve değişen sensör sayısına göre elde edilen tüm kombinasyonlar hesaplanarak amaç fonksiyonlarının en iyi değeri bulunmuştur. Seçilen sensör sayılarının en uygun konumları her üç amaç fonksiyonu için görselleştirilmiştir. MATLAB kodu kullanılarak elde edilen özvektör matrisi,

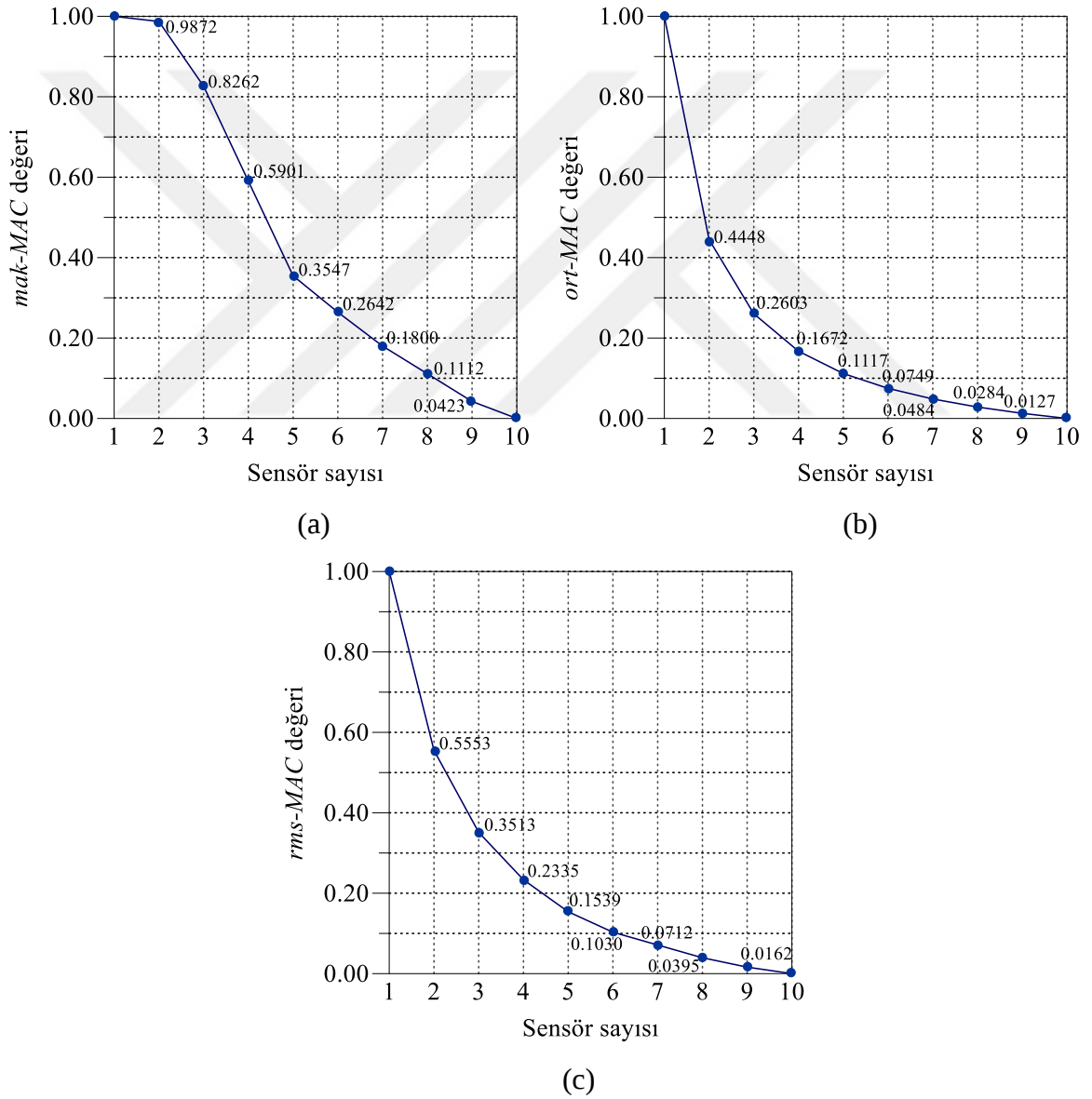
$$[\Phi] = \begin{bmatrix} -0.0013 & -0.0032 & 0.0042 & 0.0044 & -0.0042 & 0.0038 & -0.0032 & 0.0025 & 0.0017 & -0.0009 \\ -0.0018 & -0.0041 & 0.0040 & 0.0023 & 0.0001 & -0.0024 & 0.0040 & -0.0045 & -0.0038 & 0.0022 \\ -0.0023 & -0.0042 & 0.0020 & -0.0019 & 0.0043 & -0.0037 & 0.0006 & 0.0028 & 0.0045 & -0.0033 \\ -0.0027 & -0.0037 & -0.0009 & -0.0044 & 0.0023 & 0.0026 & -0.0044 & 0.0011 & -0.0035 & 0.0040 \\ -0.0031 & -0.0026 & -0.0034 & -0.0029 & -0.0030 & 0.0036 & 0.0022 & -0.0041 & 0.0012 & -0.0044 \\ -0.0034 & -0.0011 & -0.0043 & 0.0012 & -0.0039 & -0.0028 & 0.0029 & 0.0039 & 0.0015 & 0.0044 \\ -0.0037 & 0.0006 & -0.0033 & 0.0042 & 0.0009 & -0.0034 & -0.0041 & -0.0005 & -0.0037 & -0.0040 \\ -0.0039 & 0.0022 & -0.0007 & 0.0035 & 0.0044 & 0.0029 & -0.0002 & -0.0033 & 0.0045 & 0.0031 \\ -0.0041 & 0.0035 & 0.0022 & -0.0004 & 0.0016 & 0.0033 & 0.0043 & 0.0044 & -0.0036 & -0.0020 \\ -0.0042 & 0.0042 & 0.0041 & -0.0039 & -0.0035 & -0.0031 & -0.0026 & -0.0020 & 0.0014 & 0.0007 \end{bmatrix} \quad (30)$$

şeklindedir. Bu özvektör matrisindeki 10 mod dikkate alınarak Eşitlik (27)’de verilen *mak-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_1(x)$ fonksiyonu ile *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değeri küçültülmeye çalışılmıştır. Farklı sensör sayılarında $f_1(x)$ fonksiyonunun değeri incelendiğinde, sensör sayısının artmasıyla *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değerinin azaldığı görülmüştür. Farklı sensör sayılarında *mak-MAC* değerinin değişimi Şekil 20(a)’da verilmektedir.

Eşitlik (28)’de verilen *ort-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_2(x)$ fonksiyonu kullanılarak farklı sensör sayılarında *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasını en küçük yapan sensör kombinasyonları elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasının, sensör sayısı

arttıkça azaldığı görülmüştür. Farklı sensör sayılarında *ort-MAC* değerinin değişimi Şekil 20(b)'de verilmektedir.

Son olarak, Eşitlik (29)'de verilen *rms-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_3(x)$ fonksiyonu kullanılarak farklı sensör sayılarında *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin karekök ortalamasını en küçük yapan sensör kombinasyonları elde edilmiştir. *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin karekök ortalamasının değeri incelendiğinde, sensör sayısının artmasıyla $f_3(x)$ fonksiyonunun değerinin azaldığı görülmüştür. Farklı sensör sayılarında *rms-MAC* değerinin değişimi Şekil 20(c)'de verilmektedir.

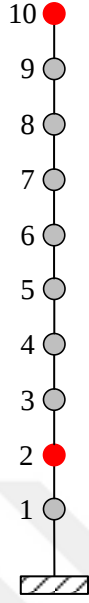


Şekil 20. Farklı sensör sayılarında *mak-MAC* değerinin değişimi (a), *ort-MAC* değerinin değişimi (b) ve *rms-MAC* değerinin değişimi (c)

10 katlı toplu kütleli sistemde bulunan tüm noktalar 1'den 10'a kadar numaralandırılmıştır. 10 noktaya 1 adet sensör yerleştirileceği durumda 10 farklı kombinasyon bulunmaktadır. Sadece 1 adet sensörün herhangi bir noktaya yerleştirilmesi sonucu *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değeri her zaman 1 olmaktadır. Dolayısıyla sisteme 1 adet sensör yerleştirilmesi mod şekil vektörlerinin bağımsızlığını sağlamamaktadır. 10 noktaya 2 adet sensör yerleştirileceği durumda ise 45 farklı kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Bu durumda *mak-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu olan $f_1(x)$ fonksiyonunun optimize edilmesiyle *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değerini en küçük yapan sensör kombinasyonu, toplu kütleli sistemin 2. ve 10. noktasına yerleştirilerek elde edilmiştir (Şekil 20(a)). *mak-MAC* yönteminde diğer durumlarda, $f_1(x)$ fonksiyonunun en iyi değerine karşılık gelen sensör konumları Şekil 21'de; *ort-MAC* yönteminde her bir farklı durum için $f_2(x)$ fonksiyonunun en iyi değerine karşılık gelen sensör konumları Şekil 22'de; *rms-MAC* yönteminde $f_3(x)$ fonksiyonunun en iyi değerine karşılık gelen sensör konumları ise Şekil 23'te gösterilmiştir.

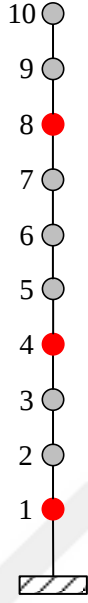
Sonuç olarak, 10 katlı toplu kütleli sisteme, farklı sayılarda sensör yerleşimi gerçekleştirildiğinde, sensör sayısının artmasıyla birlikte her bir yöntemin amaç fonksiyonu değerinin azaldığı görülmüştür. Aynı sayıda sensör, üç farklı yöntemle toplu kütleli sisteme yerleştirildiğinde genellikle farklı konumlar elde edildiği, ancak sensör sayısının artmasıyla daha fazla ortak noktaya yerleştiği tespit edilmiştir. Kullanılan üç yöntem de ilgili mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı arttırmaya çalışsa da her bir yöntemin farklı bir yaklaşımı olduğundan elde edilen sensör konumlarının farklı olduğu görülmüştür.

$$f_I(x)=0.9872$$



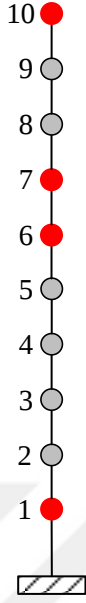
(a)

$$f_I(x)=0.8262$$



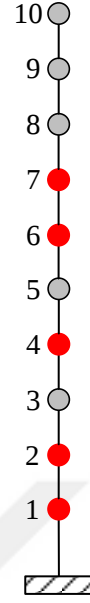
(b)

$$f_I(x)=0.5901$$



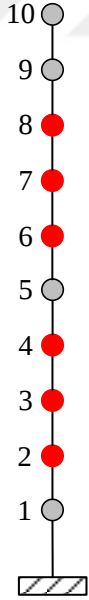
(c)

$$f_I(x)=0.3547$$



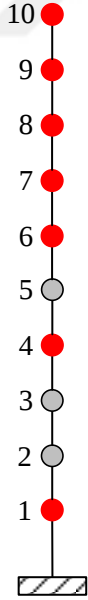
(d)

$$f_I(x)=0.2642$$



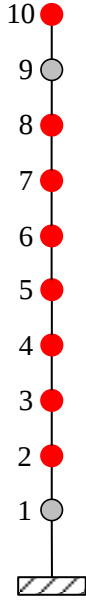
(e)

$$f_I(x)=0.1800$$



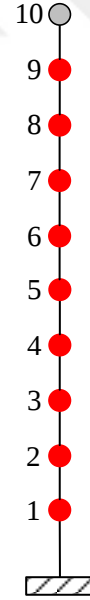
(f)

$$f_I(x)=0.1112$$



(g)

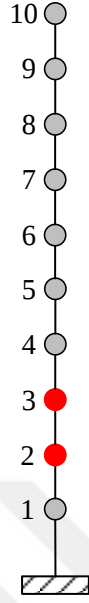
$$f_I(x)=0.0423$$



(h)

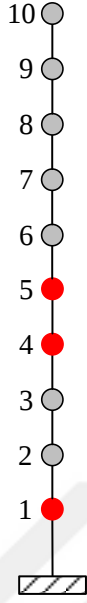
Şekil 21. *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

$$f_2(x)=0.4448$$



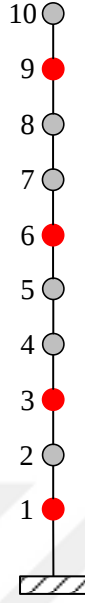
(a)

$$f_2(x)=0.2603$$



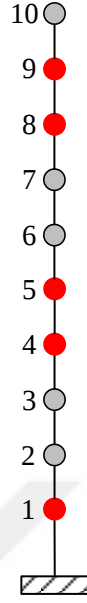
(b)

$$f_2(x)=0.1672$$



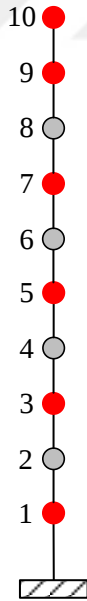
(c)

$$f_2(x)=0.1117$$



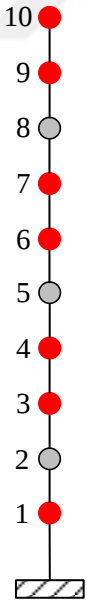
(d)

$$f_2(x)=0.0749$$



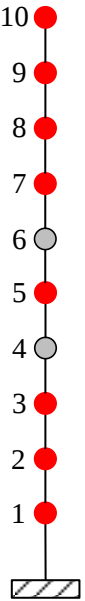
(e)

$$f_2(x)=0.0484$$



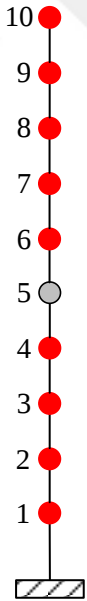
(f)

$$f_2(x)=0.0284$$



(g)

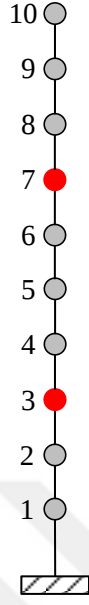
$$f_2(x)=0.0127$$



(h)

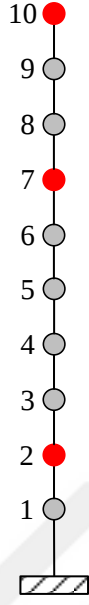
Şekil 22. *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

$$f_3(x)=0.5553$$



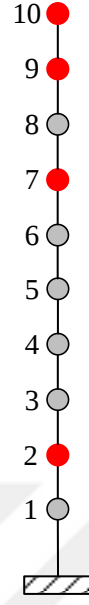
(a)

$$f_3(x)=0.3513$$



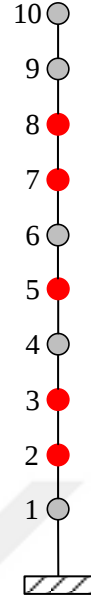
(b)

$$f_3(x)=0.2335$$



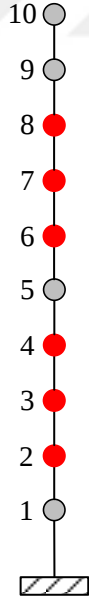
(c)

$$f_3(x)=0.1539$$



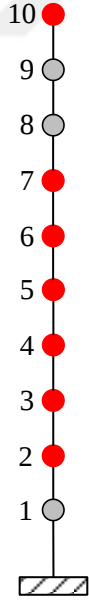
(d)

$$f_3(x)=0.1030$$



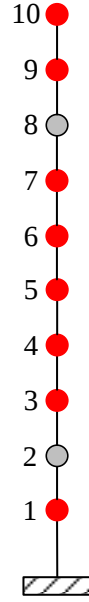
(e)

$$f_3(x)=0.0712$$



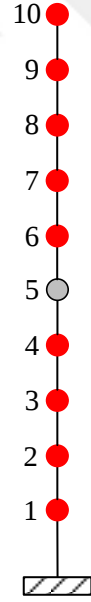
(f)

$$f_3(x)=0.0395$$



(g)

$$f_3(x)=0.0162$$



(h)

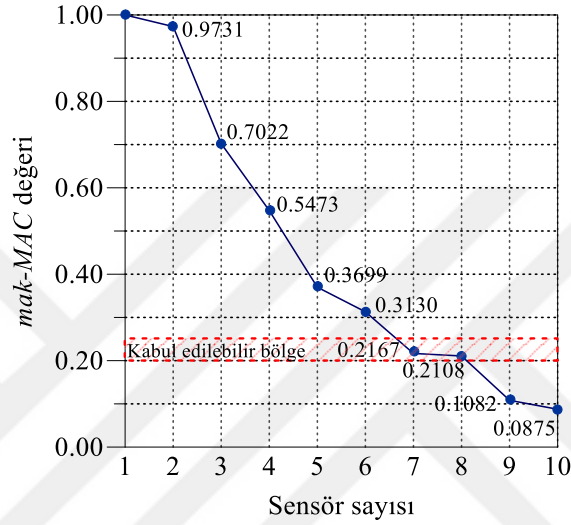
Şekil 23. *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

3.2. 4 Katlı Çerçeve Sistem

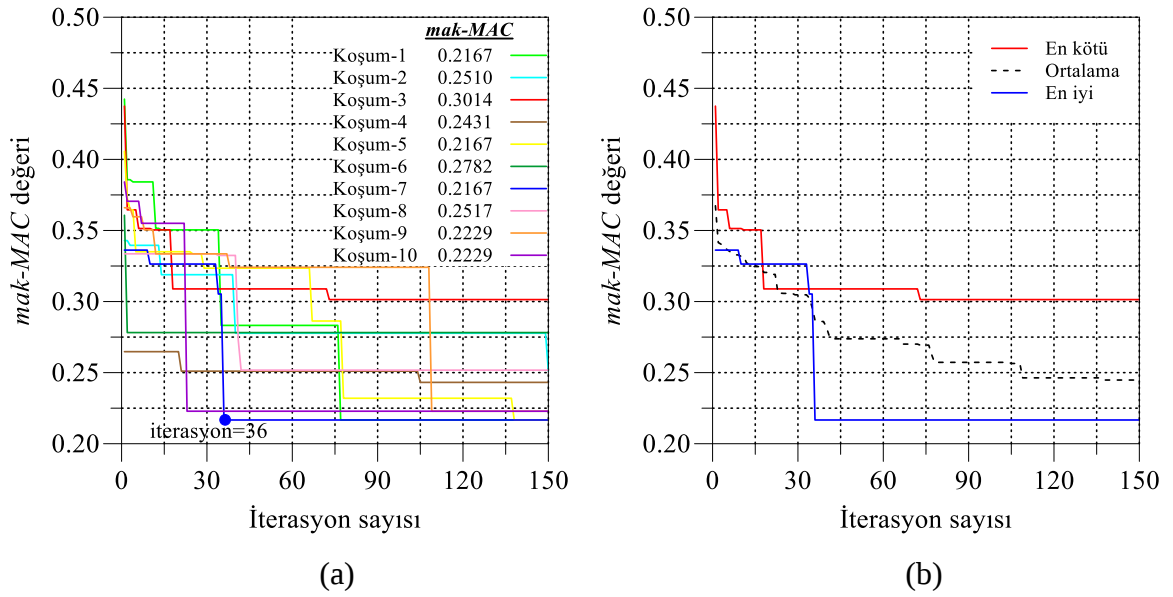
4 katlı çerçeve sistemin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuş ve modal parametreleri (mod sayısı, periyot, modal yer değiştirmeler, modal kütle katılım) belirlenmiştir. Modal kütle katılım oranı, bir yapının dinamik davranışının yüzdelik olarak etkisinin katılımını belirtmekte olup her bir modda yapının toplam kütlelerinin katılma oranını göstermektedir. Yapının modal parametrelerine doğru bir şekilde ulaşabilmek için önemli modların dikkate alınması gerekmektedir. Her bir mod için hesaplanan modal etkin kütlelerin yapının toplam kütlelerinin %90'ına ulaştığı durum literatürde genel olarak kabul edilmektedir (Wilson, 2002). Bu tez kapsamında 4 katlı çerçeve sistemin OSY probleminde dikkate alınacak ilgili mod sayısı, her bir mod için hesaplanan modal kütle katılım oranının, yapının toplam kütlelerinin %90'ına ulaştığı mod tespit edilerek belirlenmiştir. 4 katlı çerçeve sistemin modal kütle katılım oranı 8. modda %90'a ulaştığından ilk 8 mod ilgili mod olarak seçilmiştir. İlgili mod sayısı, modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranına göre belirlendikten sonra seçilen ilgili modu en iyi şekilde temsil edecek tek eksenli sensör sayısı belirlenmiştir. Eşitlik (27)'de verilen ve *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değerini küçültmeye çalışan amaç fonksiyonu, farklı sensör sayılarında optimize edilmiştir. *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değerinin 0.20 ile 0.25 arasında olması mod şekil vektörleri arasındaki bağımsızlığı sağlamakta ve ilgili modu iyi bir şekilde temsil edecek sensör sayısına ulaştığı anlamına gelmektedir (Carne ve Dohrmann, 1994).

Sensör sayısı belirlenirken optimizasyon parametrelerinden popülasyon ve iterasyon sayısı sırasıyla 100 ve 150 olarak belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken farklı popülasyon sayılarında denemeler yapılmış olup ilgili optimizasyon parametrelerinin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Toplam koşum sayısı da 10 olarak dikkate alınmıştır. Optimizasyon süreci sonunda 0.20-0.25 kabul edilebilir *mak-MAC* değerine ilk ulaşan sensör sayısı, optimum sensör sayısı olarak belirlenmiştir. Farklı sensör sayılarında *mak-MAC* değerlerinin değişimi Şekil 24'te gösterilmektedir. Grafikten anlaşılabacağı üzere kabul edilebilir aralığa ilk ulaşan sensör sayısı 7 olarak elde edilmiştir. Toplam 7 adet sensör kullanılarak *mak-MAC* değerinin 0.2167 değerine ulaştığı görülmüştür. 4 katlı çerçeve sistemin optimum sensör sayısı 7 olarak belirlendikten sonra sensörlerin en uygun konumlarının belirlenmesinde optimizasyon sürecinde üç farklı amaç fonksiyonu (*mak-MAC*, *ort-MAC*, *rms-MAC*) kullanılmıştır.

Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonunun *mak-MAC* yönteminin kullanılmasıyla elde edilen yakınsama grafiği Şekil 25(a)'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 10 koşum arasından Koşum-1, Koşum-5 ve Koşum-7'nin amaç fonksiyonu değerinin 0.2167'ye ulaştığı görülmüştür. Koşum-7, en iyi sonuca 36. iterasyonda ulaşarak en hızlı yakınsayan koşum olduğu görülmüştür. En iyi koşum (Koşum-7), en kötü koşum (Koşum-3) ve tüm koşumların ortalaması Şekil 25(b)'de verilmiştir.



Şekil 24. 4 katlı çerçeve sistemin sensör sayısının belirlenmesi



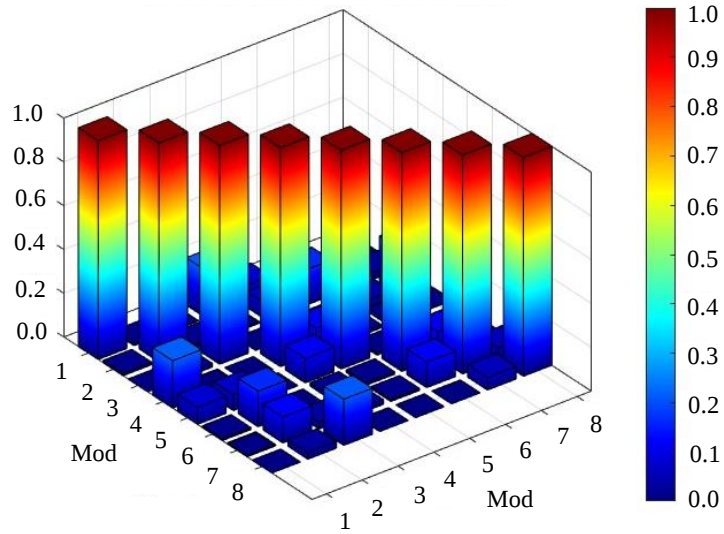
Şekil 25. 4 katlı çerçeve sistemin *mak-MAC* değerinin yakınsama grafiği

4 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek 7 adet sensör konumunun, *mak-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu kullanılarak Koşum-7'den elde edilen en iyi *MAC* matrisi,

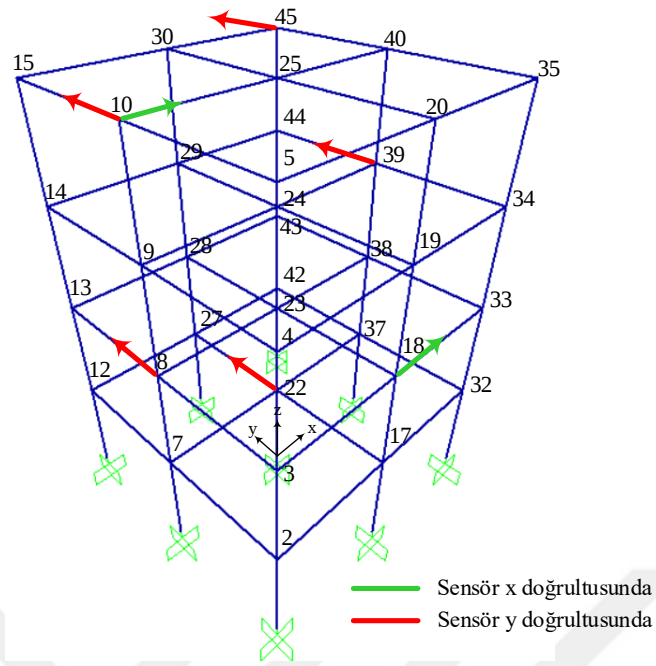
$$MAC = \begin{bmatrix} 1 & 0.0111 & 1.26 \cdot 10^{-26} & \mathbf{0.2167} & 0.0783 & 0.0091 & 0.0050 & 6.65 \cdot 10^{-24} \\ & 1 & 0.0167 & 0.0062 & 0.0725 & 0.1622 & 0.1185 & 0.0297 \\ & & 1 & 1.20 \cdot 10^{-23} & 1.35 \cdot 10^{-26} & 2.43 \cdot 10^{-25} & 0.0322 & 0.2108 \\ & & & 1 & 0.1116 & 0.0164 & 0.0210 & 3.81 \cdot 10^{-23} \\ & & & & 1 & 0.0116 & 0.0093 & 1.11 \cdot 10^{-22} \\ & & & & & 1 & 0.1162 & 2.15 \cdot 10^{-23} \\ & & & & & & 1 & 0.0573 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

simetrik

şeklindedir. Buradan da görüleceği üzere köşegen dışı en büyük değer 0.2167'dir. *mak-MAC* matrisinin üç boyutlu grafiği Şekil 26'da verilmiştir. Koşum-7'den elde edilen optimum sensör konumları çerçeve sistemin 8y, 10x, 10y, 18x, 22y, 39y, 45y serbestlik dereceleri olarak belirlenmiştir (Şekil 27). Her koşumda elde edilen *mak-MAC* değerleri, bu değerlerin iterasyon sayısı ve analiz sayısı Tablo 3'te verilmiştir. Analiz sayısı, en iyi değer kaç analiz sonucunda elde edildiğini belirten bir terimdir. Popülasyon sayısı ile en iyi çözümün iterasyon sayısının çarpımının, popülasyon sayısına eklenmesi ile bulunmaktadır. Tablo 3'te, Koşum-7'nin analiz sayısı, $100+100 \times 36=3700$ olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 26. 4 katlı çerçeve sistemde optimum *mak-MAC* değeri



Şekil 27. 4 katlı çerçeve sistemde *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

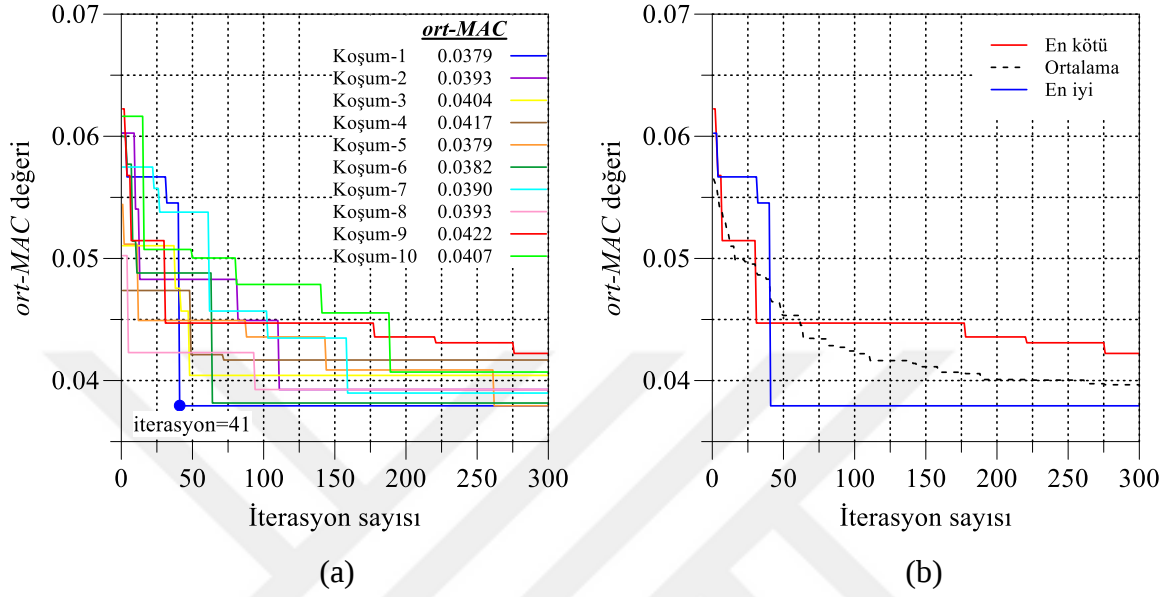
Tablo 3. 4 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen *mak-MAC* değerleri

Koşum no	<i>mak-MAC</i> değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.2167*	79	8000
2	0.2510	150	15100
3	0.3014	73	7400
4	0.2431	105	10600
5	0.2167*	138	13900
6	0.2782	2	300
7	0.2167*	36	3700
8	0.2517	42	4300
9	0.2229	109	11000
10	0.2229	23	2400

*En iyi *mak-MAC* değerleri

4 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek 7 adet sensörün en uygun konumlarını bulmak amacıyla optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu olarak diğer bir yöntem olan *ort-MAC* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin optimizasyonu için popülasyon ve iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 300 olarak belirlenmiştir. Farklı popülasyon sayılarında denemeler yapılarak 200 popülasyon sayısının yeterli olduğuna karar verilmiş olup toplam koşum sayısı da 10 olarak dikkate alınmıştır. Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonunun *ort-MAC* yönteminin kullanılmasıyla elde edilen yakınsama grafiği Şekil 28(a)'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 10 koşum arasından Koşum-1 ve Koşum-5'in amaç fonksiyonu

değerinin 0.0379'a ulaştığı görülmüştür. Koşum-1, 41. iterasyonda en iyi çözüme ulaşarak en hızlı yakınsayan koşum olduğu belirlenmiştir. En iyi koşum (Koşum-1), en kötü koşum (Koşum-9) ve tüm koşumların ortalaması Şekil 28(b)'de verilmiştir.



Şekil 28. 4 katlı çerçeve sistemin *ort-MAC* değerinin yakınsama grafiği

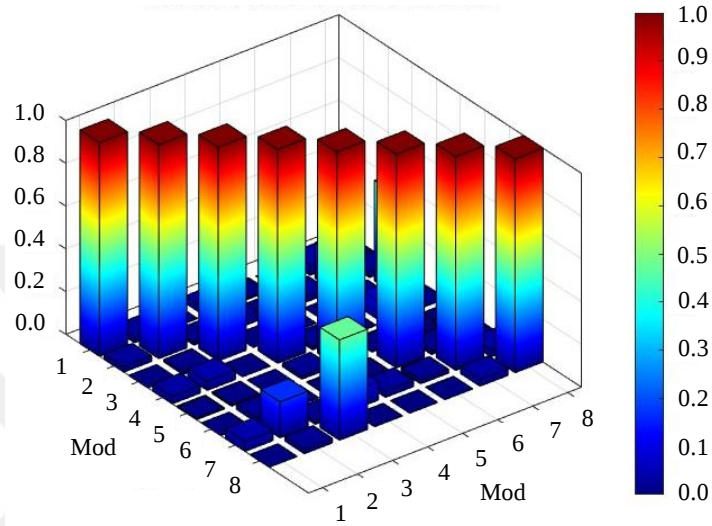
4 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek 7 adet sensör konumunun, *ort-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu kullanılarak Koşum-1'den elde edilen en iyi MAC matrisi,

$$\text{MAC} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0255 & 5.71 \cdot 10^{-27} & 0.0345 & 0.0054 & 0.0002 & 0.0467 & 1.37 \cdot 10^{-23} \\ & 1 & 0.0113 & 0.0432 & 0.0077 & 0.0233 & 0.1679 & 0.0220 \\ & & 1 & 4.41 \cdot 10^{-23} & 2.09 \cdot 10^{-26} & 7.37 \cdot 10^{-25} & 0.0171 & \mathbf{0.4692} \\ & & & 1 & 0.0160 & 0.0022 & 0.0870 & 1.19 \cdot 10^{-22} \\ & & & & 1 & 0.0028 & 0.0287 & 5.39 \cdot 10^{-23} \\ & & & & & 1 & 0.0181 & 1.15 \cdot 10^{-24} \\ & & & & & & 1 & 0.0332 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

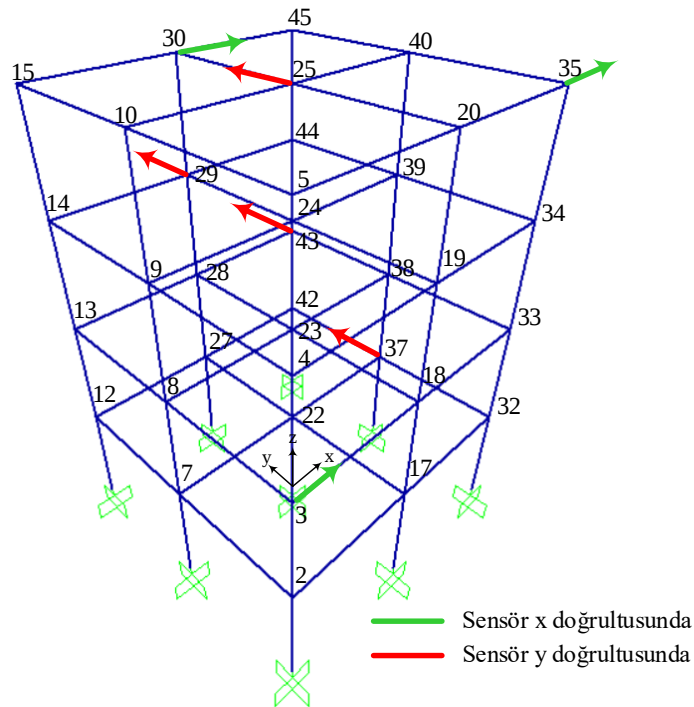
simetrik

şeklinde. MAC matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasının en küçük olduğu *ort-MAC* matrisi incelendiğinde, köşegen dışı en büyük değerin 0.4692 olduğu görülmüştür. Bu değerin, *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını, *mak-MAC* yöntemi kadar iyi

sağlayamadığı sonucuna ulaşılmıştır. Koşum-1'den elde edilen optimum sensör konumları çerçeve sistemin 3x, 25y, 29y, 30x, 35x, 37y, 43y serbestlik dereceleri olarak belirlenmiştir. *ort-MAC* matrisinin üç boyutlu grafiği Şekil 29'da, optimum sensör konumları ise Şekil 30'da gösterilmiştir. Her koşumda elde edilen *ort-MAC* değerleri, bu değerlerin hangi iterasyonda bulunduğu ve analiz sayısı Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 29. 4 katlı çerçeve sistemde optimum *ort-MAC* değeri



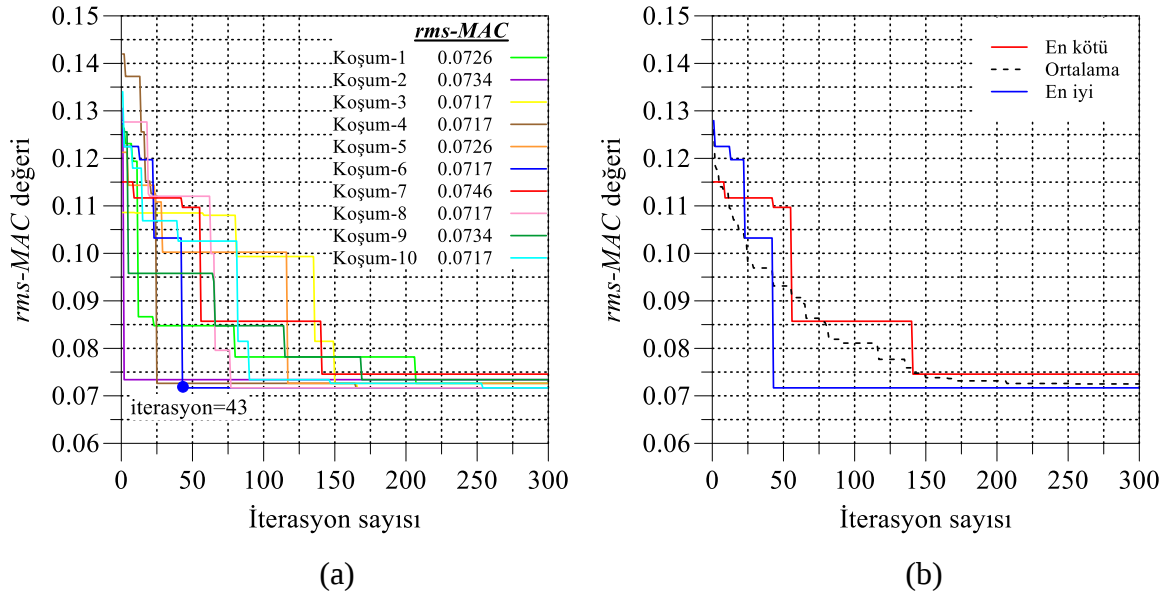
Şekil 30. 4 katlı çerçeve sistemde *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

Tablo 4. 4 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen *ort-MAC* değerleri

Koşum no	<i>ort-MAC</i> değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0379*	41	8400
2	0.0393	11	2400
3	0.0404	48	9800
4	0.0417	72	14600
5	0.0379*	262	52600
6	0.0382	64	13200
7	0.0390	159	32000
8	0.0393	94	19000
9	0.0422	276	54400
10	0.0407	189	38000

*En iyi *ort-MAC* değerleri

Son olarak 4 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek en uygun sensör konumlarını bulmak amacıyla amaç fonksiyonu olarak *rms-MAC* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde popülasyon, iterasyon ve koşum sayısı sırasıyla, 200, 300 ve 10 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonunun *rms-MAC* yönteminin kullanılmasıyla elde edilen yakınsama grafiği Şekil 31(a)'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 10 koşum arasından Koşum-3, Koşum-4, Koşum-6, Koşum-8 ve Koşum-10'un amaç fonksiyonu değerinin 0.0717'ye ulaştığı görülmüştür. Koşum-6, 43. iterasyonda en iyi çözümü elde ederek en hızlı yakınsayan koşum olduğu belirlenmiştir. En iyi koşum (Koşum-6), en kötü koşum (Koşum-7) ve tüm koşumların ortalaması Şekil 31(b)'de verilmiştir.

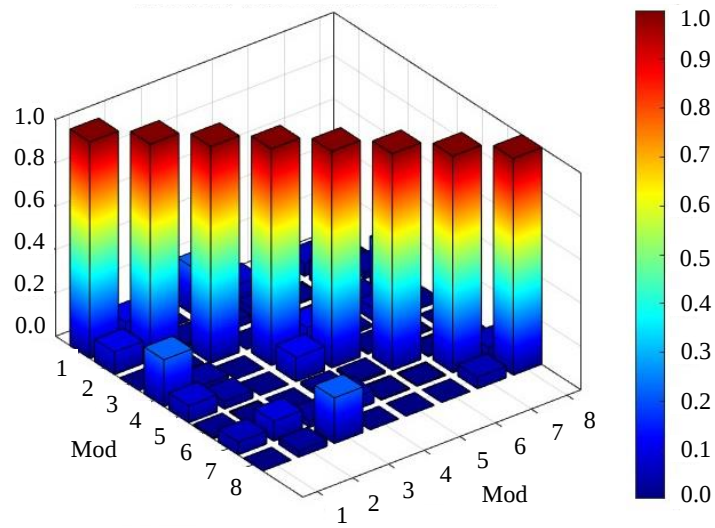
Şekil 31. 4 katlı çerçeve sistemin *rms-MAC* değerinin yakınsama grafiği

4 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek 7 adet sensör konumunun, *rms-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu kullanılarak Koşum-6'dan elde edilen en iyi *MAC* matrisi,

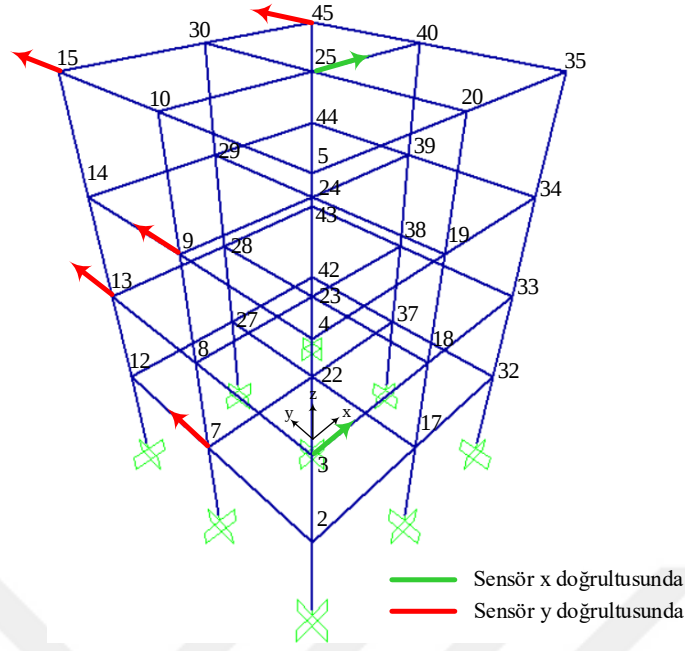
$$MAC = \begin{bmatrix} 1 & 0.1038 & 1.26 \cdot 10^{-26} & \mathbf{0.2167} & 0.0783 & 0.0091 & 0.0585 & 3.13 \cdot 10^{-24} \\ & 1 & 0.0165 & 0.0330 & 0.0353 & 0.0048 & 0.0916 & 0.0293 \\ & & 1 & 1.17 \cdot 10^{-23} & 3.91 \cdot 10^{-29} & 1.91 \cdot 10^{-25} & 0.0301 & 0.2108 \\ & & & 1 & 0.1116 & 0.0164 & 0.0587 & 3.61 \cdot 10^{-23} \\ & & & & 1 & 0.0116 & 0.0050 & 1.54 \cdot 10^{-22} \\ & & & & & 1 & 0.0044 & 2.58 \cdot 10^{-23} \\ & & & & & & 1 & 0.0537 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

simetrik

şeklindedir. *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin karelerinin ortalamasının en küçük olduğu *rms-MAC* matrisi incelendiğinde, köşegen dışı en büyük değerin 0.2167 olduğu ve *mak-MAC* yöntemi ile aynı köşegen dışı en büyük değere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu örnek için, *rms-MAC* ve *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını aynı derecede sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Koşum-6'dan elde edilen optimum sensör konumları çerçeve sistemin 3x, 7y, 9y, 13y, 15y, 25x, 45y serbestlik dereceleri olarak belirlenmiştir. *rms-MAC* matrisinin üç boyutlu grafiği Şekil 32'de, optimum sensör konumları ise Şekil 33'te gösterilmiştir. Her koşumda elde edilen *rms-MAC* değerleri, iterasyon sayısı ve analiz sayısı Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 32. 4 katlı çerçeve sistemde optimum *rms-MAC* değeri



Şekil 33. 4 katlı çerçeve sistemde *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

Tablo 5. 4 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen *rms-MAC* değerleri

Koşum no	<i>rms-MAC</i> değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0726	207	41600
2	0.0734	2	600
3	0.0717*	166	33400
4	0.0717*	165	33200
5	0.0726	117	23600
6	0.0717*	43	8800
7	0.0746	141	28400
8	0.0717*	77	15600
9	0.0734	169	34000
10	0.0717*	254	51000

*En iyi *rms-MAC* değerleri

4 katlı çerçeve sistem için ilgili mod sayısı, optimum sensör sayısı, kullanılan yöntem, en iyi koşum ve optimum sensör konumları Tablo 6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, *mak-MAC* yönteminde Koşum-1, Koşum-5 ve Koşum-7; *ort-MAC* yönteminde Koşum-1 ve Koşum-5; *rms-MAC* yönteminde ise Koşum-3, Koşum-4, Koşum-6, Koşum-8 ve Koşum-10'un aynı sonuca ulaştığı görülmüştür. 4 katlı çerçeve sistemden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında 10 koşumda en iyi sonuca en çok ulaşan amaç fonksiyonunun *rms-MAC* olduğu belirlenmiştir. Her bir amaç fonksiyonunda en iyi sonuca ulaşan koşumlar incelendiğinde ise farklı optimum sensör konumlarının elde edildiği tespit

edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında en iyi amaç fonksiyonunu veren birden fazla optimum sensör konumunun olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 6. 4 katlı çerçeve sistem için elde edilen optimum sensör konumları

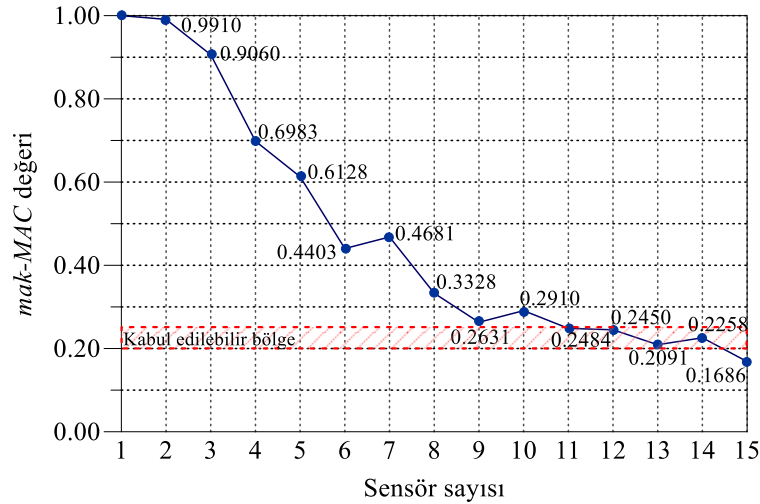
İlgili mod sayısı	Sensör sayısı	Yöntem	En iyi Koşum	Optimum sensör konumları
8	7	<i>mak-MAC</i>	Koşum-1	8y-10x-10y-13x-34y-37y-40y
			Koşum-5	2y-10x-15y-18x-39y-40y-43y
			Koşum-7	8y-10x-10y-18x-22y-39y-45y
8	7	<i>ort-MAC</i>	Koşum-1	3x-25y-29y-30x-35x-37y-43y
			Koşum-5	2y-13x-13y-20x-24y-25y-45x
8	7	<i>rms-MAC</i>	Koşum-3	3y-9y-10x-10y-12y-43x-45y
			Koşum-4	7y-8y-10x-10y-14y-43x-45y
			Koşum-6	3x-7y-9y-13y-15y-25x-45y
			Koşum-8	2y-3y-4y-10x-13x-15y-45y
			Koşum-10	3x-10y-37y-38y-40x-44y-45y

3.3. 20 Katlı Çerçeve Sistem

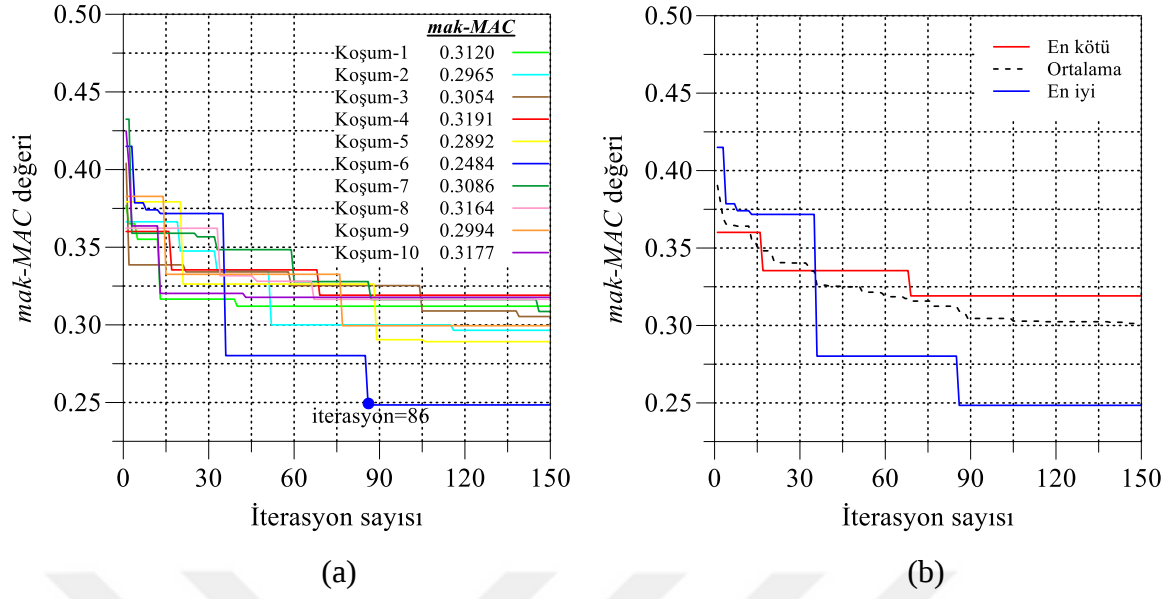
20 katlı çerçeve sistemin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuş ve modal parametreleri (mod sayısı, periyot, modal yer değiştirmeler, modal kütle katılım) belirlenmiştir. 20 katlı çerçeve sistemin OSY probleminde dikkate alınacak ilgili mod sayısı, her bir mod için hesaplanan modal kütle katılım oranının, yapının toplam kütlelerinin %90'ına ulaştığı mod tespit edilerek belirlenmiştir. 20 katlı çerçeve sistemin modal kütle katılım oranı 14. modda %90'a ulaştığından ilk 14 mod ilgili mod olarak seçilmiştir. İlgili mod sayısı, modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranına göre belirlendikten sonra seçilen ilgili modu en iyi şekilde temsil edecek tek eksenli sensör sayısı belirlenmiştir. Eşitlik (27)'de verilen ve *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değerini küçültmeye çalışan amaç fonksiyonu, farklı sensör sayılarında optimize edilerek 0.20 ile 0.25 aralığına ilk ulaşan sensör sayısı, optimum sensör sayısı olarak belirlenmiştir.

Sensör sayısı belirlenirken optimizasyon parametrelerinden popülasyon ve iterasyon sayısı sırasıyla 100 ve 150 olarak belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken farklı popülasyon sayılarında denemeler yapılmış olup ilgili optimizasyon parametrelerinin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Toplam koşum sayısı da 10 olarak dikkate alınmıştır. Farklı sensör sayılarında *mak-MAC* değerlerinin değişimi Şekil 34'te gösterilmektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere kabul edilebilir aralığa ilk ulaşan sensör sayısı 11 olarak elde edilmiştir. Toplam 11 adet sensör kullanılarak *mak-MAC* değerinin 0.2484 değerine ulaştığı görülmüştür. 20 katlı çerçeve sistemin optimum sensör sayısı 11 olarak belirlendikten sonra sensörlerin en uygun konumlarının belirlenmesinde optimizasyon sürecinde üç farklı amaç fonksiyonu (*mak-MAC*, *ort-MAC*, *rms-MAC*) kullanılmıştır.

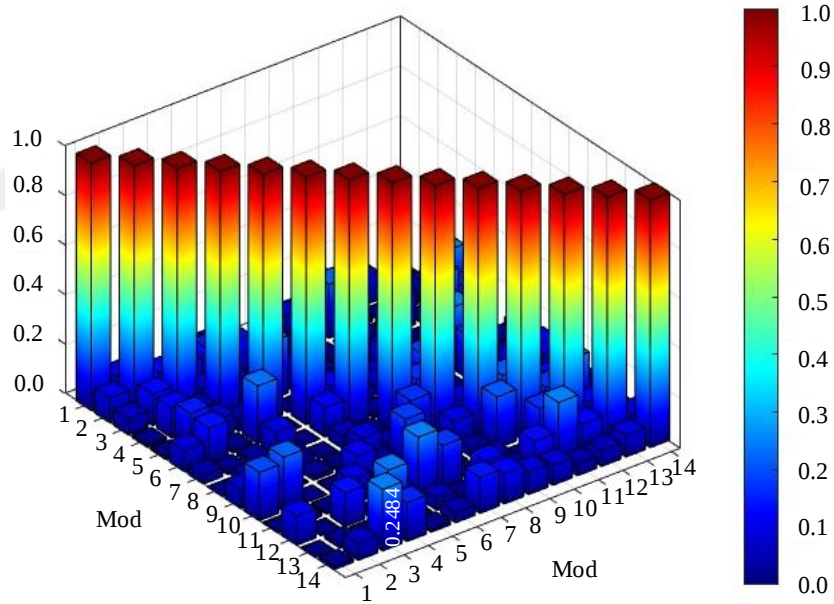
Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonunun *mak-MAC* yönteminin kullanılmasıyla elde edilen yakınsama grafiği Şekil 35(a)'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 10 koşum arasından Koşum-6, en iyi sonuca 86. iterasyonda ulaşarak en hızlı yakınsayan koşum olduğu görülmüştür. En iyi koşum (Koşum-6), en kötü koşum (Koşum-4) ve tüm koşumların ortalaması ise Şekil 35(b)'de verilmiştir. Koşum-6'dan elde edilen en iyi *MAC* matrisinin üç boyutlu grafiği Şekil 36'da verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere 3. mod şekil vektörü ile 14. mod şekil vektörünün doğrusal bağımsızlığını temsil eden köşegen dışı en büyük değer 0.2484'tür. Koşum-6'dan elde edilen optimum sensör konumları çerçeve sistemin 11x, 29y, 35x, 54y, 63x, 95x, 106y, 130y, 156y, 171x, 194y serbestlik dereceleri olarak belirlenmiştir (Şekil 37). Her koşumda elde edilen *mak-MAC* değerleri, bu değerlerin iterasyon sayısı ve analiz sayısı Tablo 7'de verilmiştir.



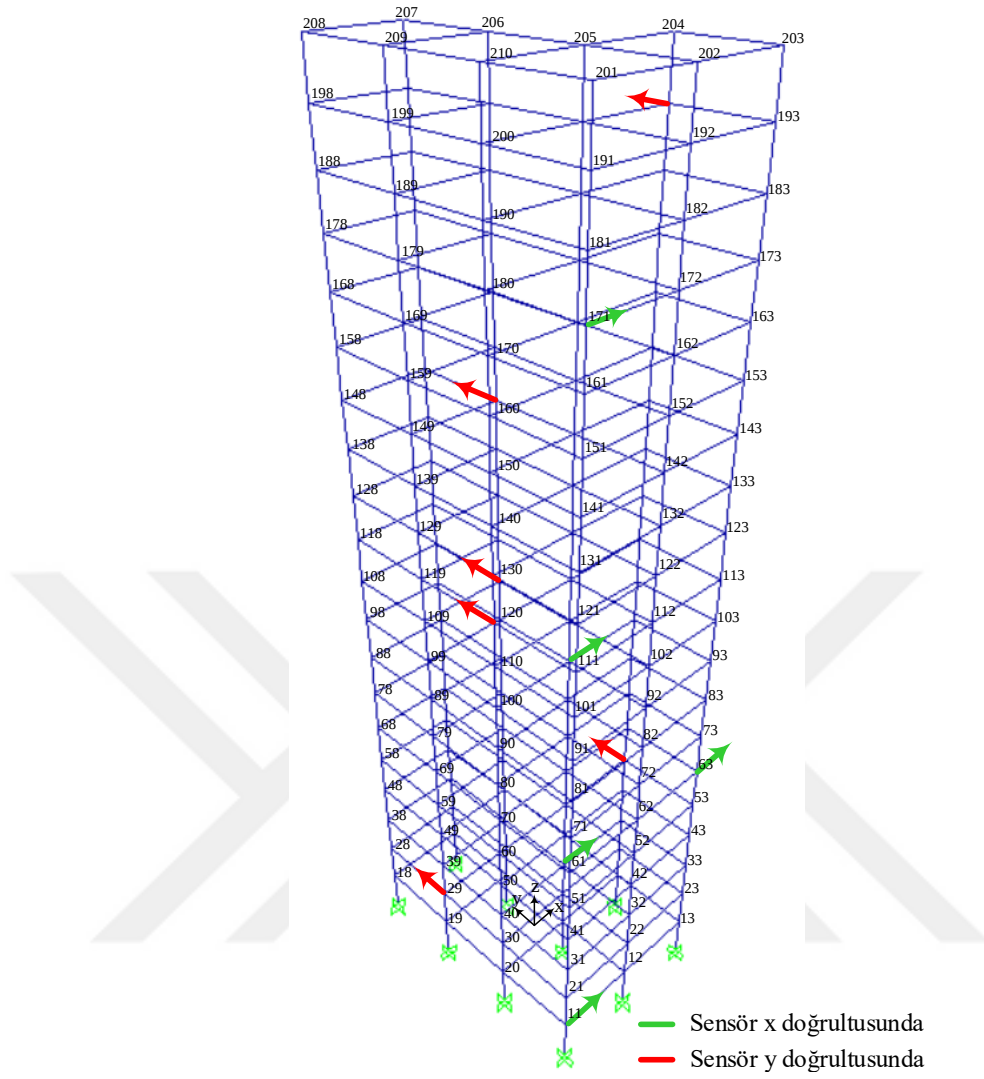
Şekil 34. 20 katlı çerçeve sistemin sensör sayısının belirlenmesi



Şekil 35. 20 katlı çerçeve sistemin *mak-MAC* değerinin yakınsama grafiği



Şekil 36. 20 katlı çerçeve sistemde optimum *mak-MAC* değeri



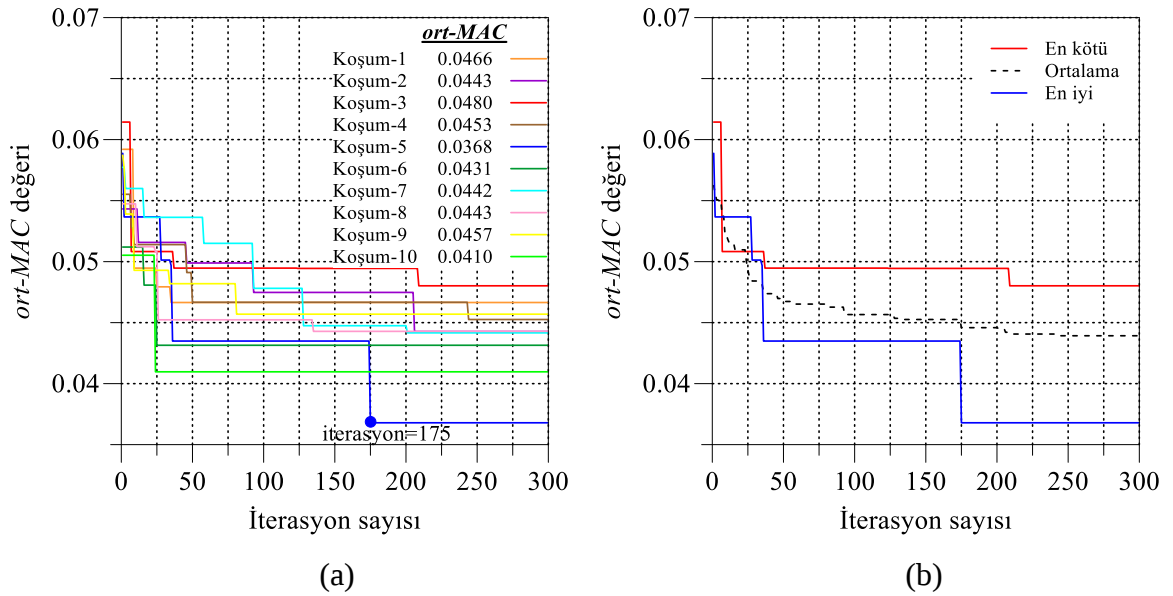
Şekil 37. 20 katlı çerçeve sistemde *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

Tablo 7. 20 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen *mak-MAC* değerleri

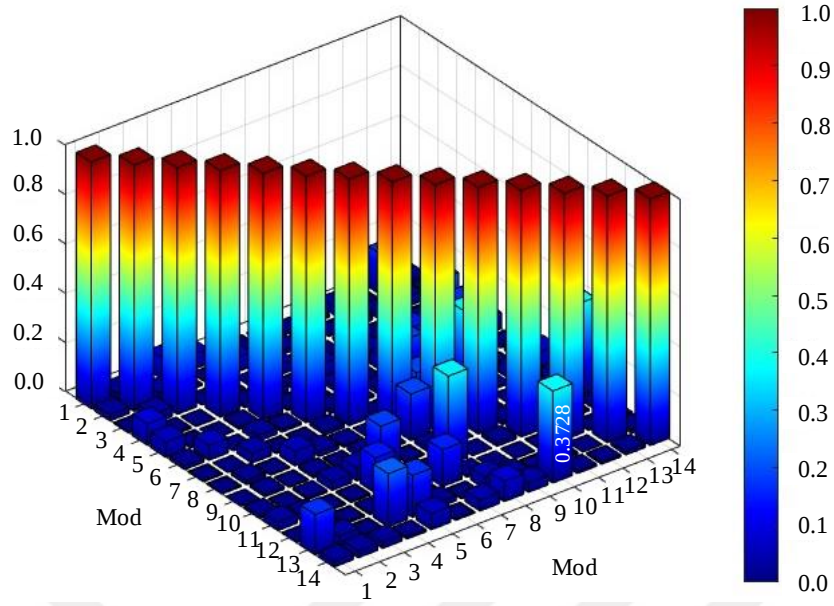
Koşum no	<i>mak-MAC</i> değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.3120	40	4100
2	0.2965	116	11700
3	0.3054	139	14000
4	0.3191	69	7000
5	0.2892	106	10700
6	0.2484*	86	8700
7	0.3086	146	14700
8	0.3164	67	6800
9	0.2994	77	7800
10	0.3177	43	4400

*En iyi *mak-MAC* değerleri

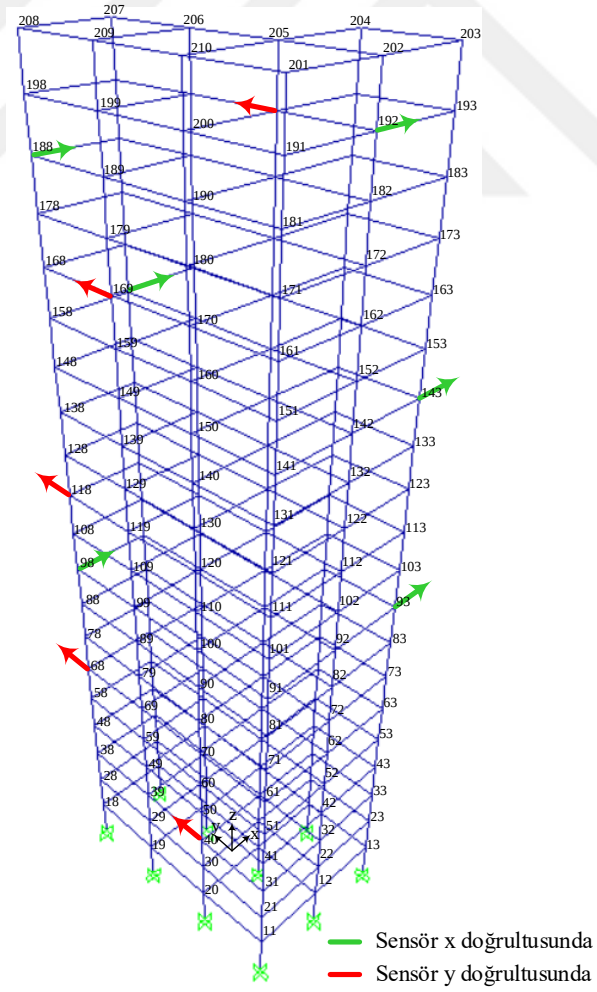
20 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek 11 adet sensörün en uygun konumlarını bulmak amacıyla optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu olarak diğer bir yöntem olan *ort-MAC* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin optimizasyonu için popülasyon ve iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 300 olarak belirlenmiştir. Farklı popülasyon sayılarında denemeler yapılarak 200 popülasyon sayısının yeterli olduğuna karar verilmiş olup toplam koşum sayısı 10 olarak dikkate alınmıştır. Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonunun *ort-MAC* yönteminin kullanılmasıyla elde edilen yakınsama grafiği Şekil 38(a)'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 10 koşum arasından Koşum-5, 175. iterasyonda en iyi çözüme ulaşarak en hızlı yakınsayan koşum olduğu belirlenmiştir. En iyi koşum (Koşum-5), en kötü koşum (Koşum-3) ve tüm koşumların ortalaması Şekil 38(b)'de verilmiştir. Koşum-5'ten elde edilen ve *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin ortalamasının en küçük olduğu *MAC* matrisinin üç boyutlu grafiği Şekil 39'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, köşegen dışı en büyük değerin 0.3728 olduğu görülmüştür. Bu değer, *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını, *mak-MAC* yöntemi kadar iyi sağlayamadığı sonucuna ulaşılmıştır. Koşum-5'ten elde edilen optimum sensör konumları çerçeve sistemin 40y, 68y, 93x, 98x, 118y, 143x, 157x, 169y, 188x, 192x, 195y serbestlik dereceleri olarak belirlenmiştir (Şekil 40). Her koşumun *ort-MAC* değerleri, iterasyon ve analiz sayısı Tablo 8'de verilmiştir.



Şekil 38. 20 katlı çerçeve sistemin *ort-MAC* değerinin yakınsama grafiği



Şekil 39. 20 katlı çerçeve sistemde optimum *ort-MAC* değeri



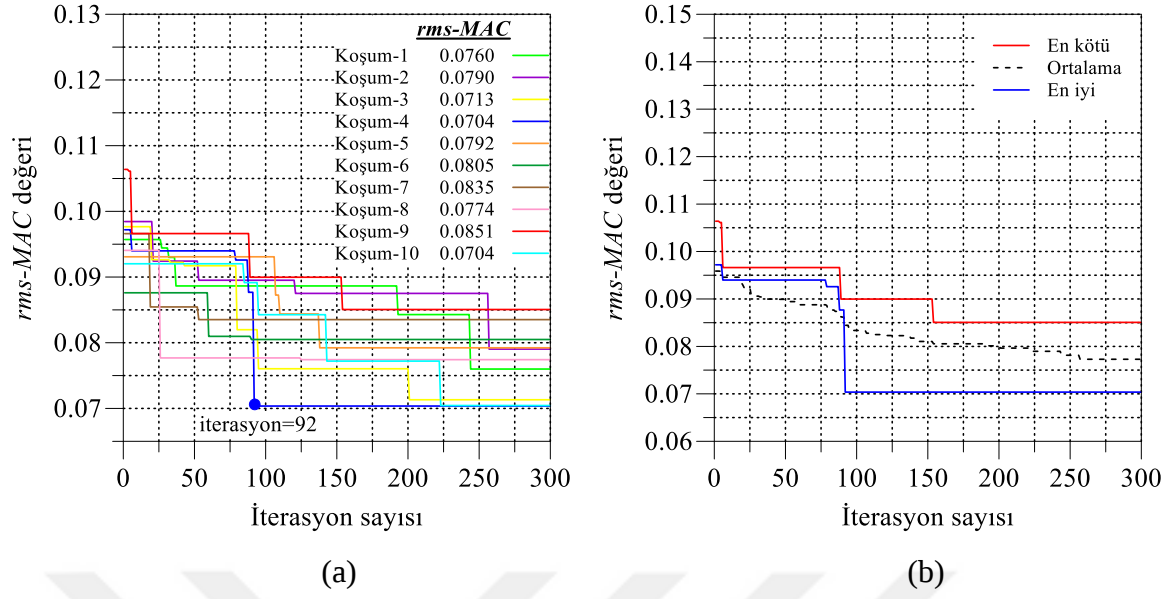
Şekil 40. 20 katlı çerçeve sistemde *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

Tablo 8. 20 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen *ort-MAC* değerleri

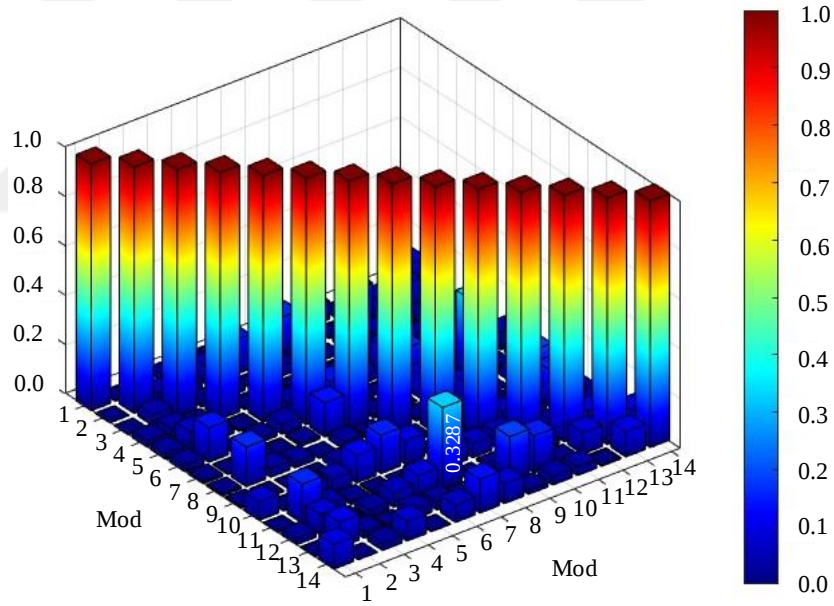
Koşum no	<i>ort-MAC</i> değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0466	35	7200
2	0.0443	206	41400
3	0.0480	209	42000
4	0.0453	244	49000
5	0.0368*	175	35200
6	0.0431	25	5200
7	0.0442	201	40400
8	0.0443	135	27200
9	0.0457	81	16400
10	0.0410	24	5000

*En iyi *ort-MAC* değerleri

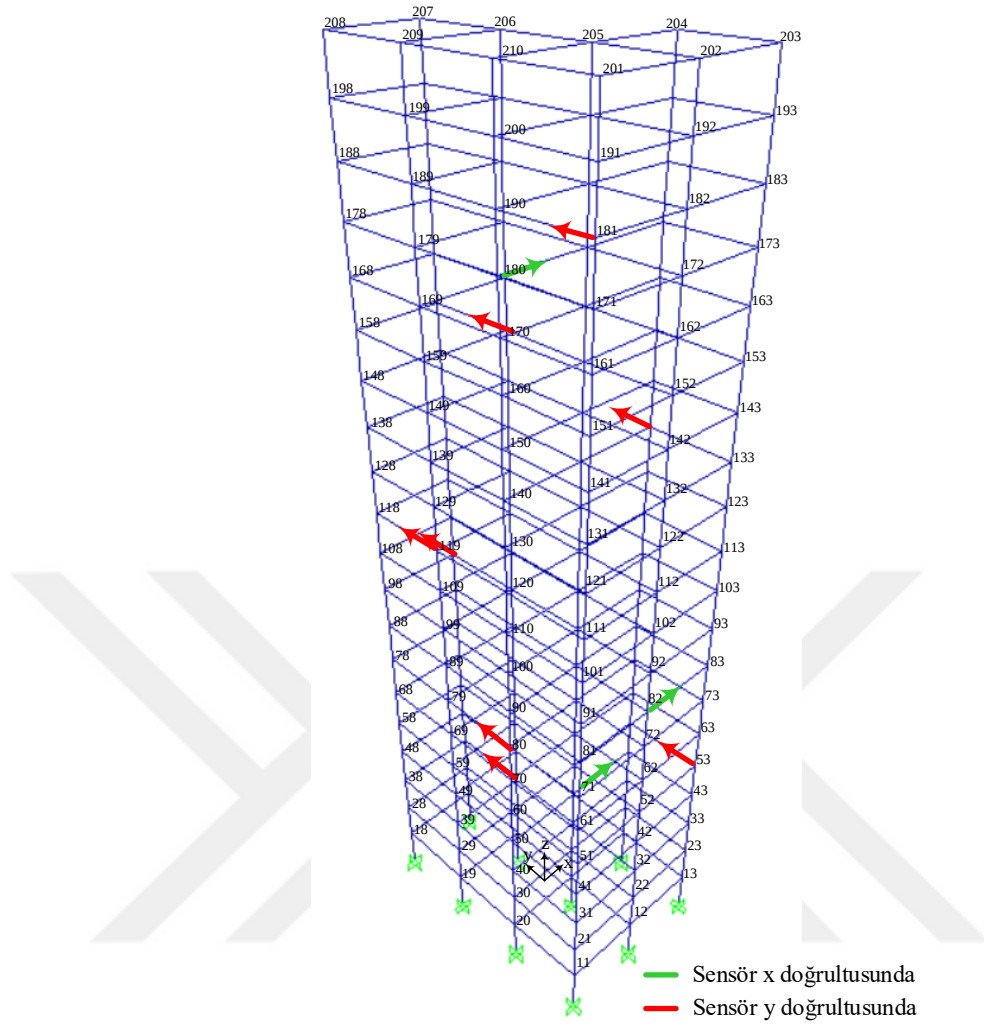
Son olarak 20 katlı çerçeve sisteme yerleştirilecek en uygun sensör konumlarını bulmak amacıyla amaç fonksiyonu olarak *rms-MAC* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde popülasyon, iterasyon ve koşum sayısı sırasıyla, 200, 300 ve 10 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde, amaç fonksiyonunun *rms-MAC* yönteminin kullanılmasıyla elde edilen yakınsama grafiği Şekil 41(a)'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, 10 koşum arasından Koşum-4 ve Koşum-10'un amaç fonksiyonu değerinin 0.0704'e ulaştığı görülmüştür. Koşum-4, 92. iterasyonda en iyi çözümü elde ederek en hızlı yakınsayan koşum olduğu belirlenmiştir. En iyi koşum (Koşum-4), en kötü koşum (Koşum-9) ve tüm koşumların ortalaması Şekil 41(b)'de verilmiştir. Koşum-4'ten elde edilen ve *MAC* matrisinin köşegen dışı değerlerinin karelerinin ortalamasının en küçük olduğu *MAC* matrisi incelendiğinde, köşegen dışı en büyük değer 0.3287 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 42). Bu değer, *mak-MAC* yönteminden elde edilen en büyük köşegen dışı değerden daha büyük, *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen en büyük köşegen dışı değerden daha küçük olduğu görülmüştür. Bu örnek için, *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı, *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumlarına göre daha iyi sağladığı fakat *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumlarının ise mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı en iyi şekilde sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Koşum-4'ten elde edilen optimum sensör konumları çerçeve sistemin 36y, 45x, 53y, 80y, 82x, 97y, 119y, 134y, 156y, 180x, 181y serbestlik dereceleri olarak belirlenmiştir (Şekil 43). Her koşumda elde edilen *rms-MAC* değerleri, iterasyon sayısı ve analiz sayısı Tablo 9'da verilmiştir.



Şekil 41. 20 katlı çerçeve sistemin *rms-MAC* değerinin yakınsama grafiği



Şekil 42. 20 katlı çerçeve sistemde optimum *rms-MAC* değeri



Şekil 43. 20 katlı çerçeve sistemde *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları

Tablo 9. 20 katlı çerçeve sistemde analiz sonucunda elde edilen *rms-MAC* değerleri

Koşum no	<i>rms-MAC</i> değeri	İterasyon sayısı	Analiz Sayısı
1	0.0760	244	49000
2	0.0790	257	51600
3	0.0713	201	40400
4	0.0704*	92	18600
5	0.0792	138	37400
6	0.0805	90	18200
7	0.0835	53	10800
8	0.0774	125	25200
9	0.0851	154	31000
10	0.0704*	223	44800

*En iyi *rms-MAC* değerleri

20 katlı çerçeve sistem için ilgili mod sayısı, optimum sensör sayısı, kullanılan yöntem, en iyi koşum ve optimum sensör konumları Tablo 10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, *mak-MAC* yönteminde Koşum-6; *ort-MAC* yönteminde Koşum-5; *rms-MAC* yönteminde ise Koşum-4 ve Koşum-10'un en iyi sonuca ulaştığı görülmüştür. 20 katlı çerçeve sistemden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında 10 koşumda en iyi sonuca en çok ulaşan amaç fonksiyonunun *rms-MAC* yöntemi olduğu belirlenmiştir. Her bir amaç fonksiyonunda en iyi sonuca ulaşan koşumlar incelendiğinde, *rms-MAC* yöntemi ile farklı optimum sensör konumlarının elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında en iyi amaç fonksiyonunu veren birden fazla optimum sensör konumunun olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 10. 20 katlı çerçeve sistem için elde edilen optimum sensör konumları

İlgili mod sayısı	Sensör sayısı	Yöntem	En iyi Koşum	Yön	Optimum sensör konumları
14	11	<i>mak-MAC</i>	Koşum-6	x	11-35-63-95-171
				y	29-54-106-130-156-194
14	11	<i>ort-MAC</i>	Koşum-5	x	93-98-143-157-188-192
				y	40-68-118-169-195
14	11	<i>rms-MAC</i>	Koşum-4	x	45-82-180
				y	36-53-80-97-119-134-156-181
			Koşum-10	x	60-140-181
				y	59-64-86-105-123-152-178-195

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapı sağlığı izleme (YSİ) sistemlerinin ilk aşaması olan sensör sayısı ve yerleşimi, yapıların güvenliği ve sistemin verimliliği açısından kritik bir önem taşımaktadır. Az sayıda sensör kullanılması yeterli doğrulukta veri elde edilememesine ve YSİ sisteminin güvenilirliğinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Fazla sayıda sensör kullanımı ise maliyet açısından ekonomik olmamakla birlikte işlenecek veri miktarının artmasına ve verilerin değerlendirme süresinin uzamasına neden olmaktadır. Ayrıca YSİ sisteminde, yapısal değişikliklerin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için önemli modlar belirlenip bu modları temsil edecek şekilde sensör yerleşimi yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ilk olarak optimum sensör yerleşimi problemi için ele alınacak yapının ilgili mod sayısı, modal kütle katılım oranı ile belirlenmiş ve seçilen ilgili mod sayısına göre farklı sensör sayıları optimize edilerek optimum sensör sayısı belirlenmiştir. Daha sonra bu sensörlerin optimum konumunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, MATLAB programlama dili, Rao-1 algoritması ve SAP2000 OAPI özelliklerinin etkin bir şekilde çalıştığı bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Bu program kullanılarak SAP2000 programında sonlu elemanlar modeli oluşturulan iki veya üç boyutlu bina türü yapıların optimum sensör yerleşimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez kapsamında, oluşturulan program ile 10 katlı iki boyutlu toplu kütleli sistem, 4 katlı ve 20 katlı üç boyutlu çerçeve sistemin optimum sensör yerleşimi belirlenmiştir. Optimum sensör yerleşimi için modal güvence kriterinden türetilen *mak-MAC*, *ort-MAC* ve *rms-MAC* yöntemleri optimizasyon sürecinde amaç fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Geliştirilen bilgisayar programı ile üç boyutlu gerçek yapıların YSİ süreçlerinde kullanılabilecek en az sensör sayısı ve yerleşimi elde edilebilmektedir.
- Özellikle yapı elemanının fazla olduğu yüksek vb. yapılarda sensör yerleştirilecek olan serbestlikleri tespit etmek için zaman kaybı ve gereksiz sensör kullanımını önleyerek maliyet kayıpları önlenebilmektedir.
- Yapı tipi ve boyutu fark etmeksizin uygulanabilen bu yazılım ile kullanıcı tecrübesine gerek kalmaksızın sensör sayısı ve yerleşimi elde edilebilmektedir.

- Arazi çalışmalarında, yapı üzerinde sensör yerleştirmede zorluklar yaşanabilmesi durumunda farklı yerleşim kombinasyonları sağlayabildiği için etkin bir yazılımdır.
- 10 katlı toplu kütleli sisteme, *mak-MAC*, *ort-MAC* ve *rms-MAC* yöntemleri kullanılarak farklı sayıda sensör yerleşimi gerçekleştirildiğinde, sensör sayısının artmasıyla her bir yöntemin amaç fonksiyonu değerinin azaldığı görülmüştür.
- 10 katlı toplu kütleli sistemin herhangi bir noktasına 1 adet sensör yerleştirilmesi sonucu *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değeri her zaman 1 olmuştur. Dolayısıyla sisteme 1 adet sensör yerleştirilmesi ile mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığının sağlanmadığı tespit edilmiştir.
- Aynı sayıda sensör, üç farklı yöntemle toplu kütleli sisteme yerleştirildiğinde genellikle farklı konumlar elde edildiği, ancak sensör sayısının artmasıyla daha fazla ortak noktaya yerleştiği tespit edilmiştir. Kullanılan üç yöntem de ilgili mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı arttırmaya çalışsa da her bir yöntemin farklı bir yaklaşımı olduğundan elde edilen sensör konumlarının farklı olabildiği görülmüştür. Ancak, elde edilen bu farklı sensör konumları YSİ için kullanılabilir ideal konumlardır.
- 4 katlı çerçeve sistemin modal kütle katılım oranı 8. modda %90'a ulaştığından ilk 8 mod ilgili mod olarak seçilmiştir. *MAC* matrisinin köşegen dışı en büyük değerinin 0.20 ile 0.25 arasında olması mod şekil vektörleri arasındaki bağımsızlığı sağlamakta ve ilgili modu iyi bir şekilde temsil edecek sensör sayısına ulaştığı anlamına gelmektedir. İlgili modu en iyi şekilde temsil edecek sensör sayısı *mak-MAC* yönteminin optimizasyonu ile belirlendiğinde, optimum sensör sayısı 7 olarak elde edilmiştir.
- 4 katlı çerçeve sistemde 10 koşulda her bir amaç fonksiyonundan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, *mak-MAC* yönteminde üç koşul; *ort-MAC* yönteminde iki koşul; *rms-MAC* yönteminde ise beş koşulun kendi aralarında aynı sonuca ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alındığında 10 koşulda en iyi sonuca en çok ulaşan amaç fonksiyonunun *rms-MAC* olduğu belirlenmiştir.
- 4 katlı çerçeve sistemde, *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerin, *rms-MAC* yöntemiyle aynı değere ulaştığı; *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen köşegen dışı en büyük değerin ise *mak-MAC* ve *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen değerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. 4 katlı çerçeve sistem örneği

için, *mak-MAC* ve *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörlerinin doğrusal bağımsızlığını aynı derecede ve *ort-MAC* yönteminden daha iyi sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak *mak-MAC* yönteminin amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı optimizasyon sürecinde popülasyon ve iterasyon sayısı sırasıyla, 100 ve 150; *rms-MAC* yönteminde bu değerler sırasıyla 200 ve 300 olarak alınmıştır. Bu durum da *mak-MAC* yönteminin daha az analiz sayısı ile iyi değere ulaştığını göstermektedir.

- 4 katlı çerçeve sistem için her bir amaç fonksiyonunda en iyi sonuca ulaşan koşumlar incelendiğinde, farklı optimum sensör konumlarının elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında en iyi amaç fonksiyonunu veren birden fazla optimum sensör konumunun olabileceği anlaşılmıştır.
- 20 katlı çerçeve sistemin modal kütle katılım oranı 14. modda %90'a ulaştığından ilk 14 mod ilgili mod olarak seçilmiştir. İlgili modu en iyi şekilde temsil edecek sensör sayısı *mak-MAC* yönteminin optimizasyonu ile belirlendiğinde, optimum sensör sayısı 11 olarak elde edilmiştir
- 20 katlı çerçeve sistem için 10 koşumda her bir amaç fonksiyonundan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, *mak-MAC* yönteminde bir koşum; *ort-MAC* yönteminde bir koşum; *rms-MAC* yönteminde ise iki koşumun en iyi sonuca ulaştığı görülmüştür. 20 katlı çerçeve sistemden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında 10 koşumda en iyi sonuca en çok ulaşan amaç fonksiyonunun *rms-MAC* olduğu belirlenmiştir.
- 20 katlı çerçeve sistem için *mak-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı en iyi şekilde sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. *rms-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumları, mod şekil vektörleri arasındaki doğrusal bağımsızlığı, *ort-MAC* yöntemi ile elde edilen sensör konumlarına göre daha iyi sağladığı belirlenmiştir.
- 20 katlı çerçeve sistemde *rms-MAC* yöntemi ile farklı optimum sensör konumlarının elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuç dikkate alındığında en iyi amaç fonksiyonunu veren birden fazla optimum sensör konumunun olduğu anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar doğrultusunda, aşağıdaki önerilerin değerlendirilmesi ve bu konu üzerine araştırmaların geliştirilmesi önerilmektedir:

- Bu tez çalışmasında tek eksenli sensör kullanılmış olup çok eksenli sensörler için de benzer çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.
- Bu tez çalışmasında çerçeve sistemler örnek olarak seçilmiş olup kafes, yığma vb. sistemler içinde optimum sensör yerleşimi gerçekleştirilebilir.
- Farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak optimum sensör yerleşim probleminin çözümünde etkin olan algoritma belirlenebilir.
- Optimum sensör yerleşimi için modal güvence kriterinden türetilen *mak-MAC*, *ort-MAC* ve *rms-MAC* yöntemlerinden hangisinin en iyi olduğu deneysel olarak belirlenmesi incelenebilir.

5. KAYNAKLAR

- Beck, J. L., & Katafygiotis, L. S. (1992). Probabilistic System Identification and Health Monitoring of Structures. *Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engineering*, s. 3721-3726. New York.
- Beygzadeh, S., Salajegheh, E., Torkzadeh, P., Salajegheh, J. & Naseralavi, S. S. (2014). An Improved Genetic Algorithm for Optimal Sensor Placement in Space Structures Damage Detection. *International Journal of Space Structures*, 29(3), 121–136.
- Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 589-622.
- Cao, X., Chen, J., Xu, Q., & Li, J. (2021). A distance coefficient-multi objective information fusion algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring. *Advances in Structural Engineering*, 24(4), 718–732.
- Carne, T. G., & Dohrmann, C. F. (1994). A Modal Test Design Strategy for Model Correlation. *Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM*, s. 927-933. US.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Computers and Structures Inc. (2010). *SAP2000: Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures*. Berkeley, CA, USA.
- Cruz, A., Vélez, W., & Thomson, P. (2010). Optimal Sensor Placement for Modal Identification of Structures using Genetic Algorithms-A Case Study: The Olympic Stadium in Cali, Colombia. *Annals of Operations Research*, 181(1), 769–781.
- Daloglu, A. T., Artar, M., Özgan, K., & Karakas, A. (2016). Optimum Design of Steel Space Frames Including Soil-Structure Interaction. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(1), 117–131.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., & Prime, M. B. (1998). A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *Shock and Vibration Digest*, 30(2), 91–105.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An Introduction to Structural Health Monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315.

- Guo, H. Y., Zhang, L., Zhang, L. L., & Zhou, J. X. (2004). Optimal Placement of Sensors for Structural Health Monitoring Using Improved Genetic Algorithms. *Smart Materials and Structures*, 13(3), 528–534.
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement. *Sensors*, 23(6), 3293.
- Kammer, D. C. (1991). Sensor Placement for on-Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 14(2), 251–259.
- Kaveh, A., 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.
- Lee, E. T., & Eun, H. C. (2022). Optimal Sensor Placement in Reduced-Order Models using Modal Constraint Conditions. *Sensors*, 22(2), 1–11.
- Li, D. (2011). *Sensor Placement Methods and Evaluation Criteria in Structural Health Monitoring*. Siegen University, Institute of Mechanics and Control Engineering, Siegen.
- Lian, J., He, L., Ma, B., Li, H., & Peng, W. (2013). Optimal Sensor Placement for Large Structures using the Nearest Neighbour Index and a Hybrid Swarm Intelligence Algorithm. *Smart Materials and Structures*, 22(9), 095015.
- Lin, T. Y., Tao, J., & Huang, H. H. (2020). A Multiobjective Perspective to Optimal Sensor Placement by using a Decomposition-Based Evolutionary Algorithm in Structural Health Monitoring. *Applied Sciences*, 10(21), 1–17.
- Liu, K., Yan, R. J., & Soares, C. G. (2018). Optimal Sensor Placement and Assessment for Modal Identification. *Ocean Engineering*, 165(June), 209–220.
- Liu, W., Gao, W. C., Sun, Y., & Xu, M. J. (2008). Optimal Sensor Placement for Spatial Lattice Structure Based on Genetic Algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 317(1–2), 175–189.
- MATLAB (2022). MathWorks, Inc. USA.
- 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.
- Modares, M., & Waksanski, N. (2013). Overview of Structural Health Monitoring for Steel Bridges. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 18(3), 187–191.

- Moussas, V. C., & Pnevmatikos, N. (2019). Sensor Placement Selection for SHM of Buildings. *COMPdyn Proceedings*, 2, 2186–2195.
- Ostachowicz, W., Soman, R., & Malinowski, P. (2019). Optimization of Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Review. *Structural Health Monitoring*, 18(3), 963–988.
- Papadimitriou, C. (2004). Optimal Sensor Placement Methodology for Parametric Identification of Structural Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 278(4–5), 923–947.
- Papadopoulos, M., & Garcia, E. (1998). Sensor Placement Methodologies for Dynamic Testing. *AIAA Journal*, 36(2), 256–263.
- Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal Assurance Criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548.
- Rao, R. (2020). Rao Algorithms: Three Metaphor-Less Simple Algorithms for Solving Optimization Problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(1), 107–130.
- Rao, A. R. M., & Anandakumar, G. (2007). Optimal Placement of Sensors for Structural System Identification and Health Monitoring using a Hybrid Swarm Intelligence Technique. *Smart Materials and Structures*, 16(6), 2658–2672.
- Gharehbaghi, V. R., Farsangi, E. N., Noori, M., Yang, T. Y., Li, S., Nguyen, A., Chuquitaype, C. M., Gardoni, P., & Mirjalili, S. (2022). A Critical Review on Structural Health Monitoring: Definitions, Methods, and Perspectives. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(4), 2209–2235.
- Martin, G. S., & Droguett, E. L. (2024). Quantum-Based Combinatorial Optimization for Optimal Sensor Placement in Civil Structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 2024.
- Sextos, A. G., & Balafas, G. K. (2011). Using the New SAP2000 Open Application Programming Interface to Develop an Interactive Front-End for the Modal Pushover Analysis of Bridges. *3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPdyn*, 2011(May), 25–28.
- Sun, H., & Büyüköztürk, O. (2015). Optimal Sensor Placement in Structural Health Monitoring using Discrete Optimization. *Smart Materials and Structures*, 24(12), 125034.
- Sun, X., Ilanko, S., Mochida, Y., & Tighe, R. C. (2023). A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures. *Vibration*, 6(4), 843–875.
- Tan, Y., & Zhang, L. (2020). Computational Methodologies for Optimal Sensor Placement in Structural Health Monitoring: A Review. *Structural Health Monitoring*, 19(4), 1287–1308.

- Tong, K. H., Bakhary, N., Kueh, A. B. H., & Yassin, A. Y. (2014). Optimal Sensor Placement for Mode Shapes using Improved Simulated Annealing. *Smart Structures and Systems*, 13(3), 389–406.
- Türer, A. (2011). *Önleyici Yapısal Sağlık İzleme Metodları, Araç ve Stratejilerinin Araştırılması, Geliştirilmesi ve Uygulanması*. Proje No: 104I108.
- Webb, G. T., Vardanega, P. J., & Middleton, C. R. (2015). Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities. *Journal of Bridge Engineering*, 20(11), 04014118.
- Wilson, E. L. (2002). *3D Static And Dynamic Analysis Of Structures*. California: University Avenue, Computers and Structures.
- Xu, Y. L., & Chen, B. (2008). Integrated Vibration Control and Health Monitoring of Building Structures using Semi-Active Friction Dampers: Part I-Methodology. *Engineering Structures*, 30(7), 1789–1801.
- Yi, T. H., Li, H. N., & Gu, M. (2011). Optimal Sensor Placement for Health Monitoring of High-Rise Structure Based on Genetic Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2011.
- 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.
- Yi, T. H., Li, H. N., Song, G., & Zhang, X. D. (2015). Optimal Sensor Placement for Health Monitoring of High-Rise Structure using Adaptive Monkey Algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(4), 667-681.
- Yi, T. H., Li, H. N., & Zhang, X. D. (2015). Health Monitoring Sensor Placement Optimization for Canton Tower using Immune Monkey Algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(1), 123-138.
- Yin, H., Dong, K., Pan, A., Peng, Z., Jiang, Z., & Li, S. (2019). Optimal Sensor Placement Based on Relaxation Sequential Algorithm. *Neurocomputing*, 344, 28–36.
- Zhan, J. Z., & Yu, L. (2014). Optimal Sensor Placement Based on Tabu Search Algorithms. *Applied Mechanics and Materials*, 578, 1069–1072.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Büşra YAKAK, ilköğrenimini Atatürk İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini Atatürk Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2016-2017 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında bu bölümden fakülte ve bölüm ikinciliği derecesiyle mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı.

