T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞAL FREKANS SINIRLAYICILARI ALTINDA ADAPTİF JAYA ALGORİTMASIYLA OPTİMUM TASARIMI

Gülay YALÇİN BAYAR

DOKTORA TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

TEMMUZ 2021

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Gülay YALÇİN BAYAR tarafından yapılan, "Yapı Sistemlerinin Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Adaptif JAYA Algoritmasıyla Optimum Tasarımı" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan: Prof. Dr. Oğuzhan HASANÇEBİ

Üye : Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN

Üye : Prof. Dr. Arif GÜREL

Üye : Prof. Dr. Halil GÖRGÜN

Üye : Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 05.07.2021

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

……2021

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

TEŞEKKÜR

Uzun, yorucu ve yoğun çalışmalar gerektiren doktora tezinin tamamlanması elbette ki tek bir kişinin emeği ile mümkün olmadı. Bu çalışmanın gerçekleşmesinde sabrı, bilgisi, tecrübesi ve yüksek motivasyon yeteneğiyle bana rehberlik eden, bilimsel çalışmayı sevdiren çok değerli hocam ve büyüğüm Sayın Prof. Dr. Sadık Özgür DEĞERTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmasına verdikleri katkıdan dolayı Prof. Dr. Halil GÖRGÜN (Dicle Üniversitesi), Prof. Dr. Arif Gürel (Harran Üniversitesi), Prof. Dr. Mehmet Sedat HAYALİOĞLU (Dicle Üniversitesi), Prof. Dr. Luciano Lamberti (Bari Teknik Üniversitesi, İtalya), Prof. Dr. Siamak TALATAHARİ (Tebriz Üniversitesi, İran) ve Dr. Pooya ZAKİAN (Arak Üniversitesi, İran)'a teşekkür ederim. Bununla birlikte bu uzun ve zorlu süreçte manevi destekleri ile yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler.

Ayrıca bu tez çalışması Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: Mühendislik 18.002.201

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
TEŞEKKÜR……..		I
İÇİNDEKİLER……..		II
ÖZET……..		VII
ABSTRACT……...		VIII
ÇİZELGE LİSTESİ……..		IX
ŞEKİLLER LİSTESİ……		XI
KISALTMA VE SİMGELER……..		XIX
1.	**GİRİŞ**……..	1
2.	**ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR**…….	7
2.1.	Kafes Yapıların Doğal Frekans Sınırlaayıcıları Altında Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar……...……	7
2.2.	Çerçeve Yapıların Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Optimmum Tasrımı Konusunda Yapılan Çalışmalar…….……..	13
2.3.	Jaya Algoritması (JA) Kullanılarak Yapıların Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar……..	14
3.	**MATERYAL ve METOT……**	17
3.1.	Optimizasyon Nedir…….	17
3.2.	Mühendislikte Optimizasyonun Yeri……...	18
3.3.	Yapı Mühendisliğinde Optimizasyon……..	19
3.4.	Yapısal Optimizasyonda Temel Kavramlar……	20
3.5.	Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri…….	21
3.6.	Jaya Algoritması (JA)……..	22
3.7.	Doğal Titreşim Hesabıyla İlgili Temel Kavramlar...……....	25
3.7.1.	Frekans, Doğal Frekans ve Açısal Frekans……..…....	25

3.7.2.	Periyot ve Doğal Periyot……...…...	25
3.7.3.	Modal Analiz……..	26
3.7.4.	Serbestlik Derecesi……..……	26
3.8.	Titreşen Sistemler……...	26
3.8.1.	Sönümsüz Serbest Titreşimler..……..	29
3.8.2.	Sönümlü Serbest Titreşimler……...…..	30
3.8.2.1.	Düzlem Kafes Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisi…….	36
3.8.2.2.	Uzay Kafes Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisi ..……..	38
3.8.2.3.	Düzlem Çerçeve Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisi ……	40
3.8.2.4.	Uzay Çerçeve Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisi ..……..…….	42
3.9.	Yapı Sistemlerinin Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Optimum Tasarım Probleminin Formülasyonu…..……...	47
3.10.	Yapı Sistemlerinin Modifiye Edilmiş JAYA Algoritmasıyla (MJA) Optimum Tasarım Algoritması……	48
3.11.	Yapı Sistemlerinin Adaptif JAYA Algoritmasıyla (AJA) lle Optimum Tasarım Algoritması……	52
4.	**BULGULAR VE TARTIŞMA……**	57
4.1.	Kafes Yapılar……..	57
4.1.1.	37 Elemanlı Düzlem Kafes Yapı…….	58
4.1.2.	52 Elemanlı Uzay Kubbe Kafes Yapı ……	68
4.1.3.	72 Elemanlı Uzay Kafes Yapı…….....	77
4.1.4.	200 Elemanlı Düzlem Kafes Yapı…….	86
4.1.5.	600 Elemanlı Kubbe Kafes Yapı…….....	95
4.1.6.	1180 Elemanlı Kubbe Kafes Yapı..…….....	104
4.1.7.	1410 Elemanlı Kubbe Kafes Yapı…….....	114
4.2.	Çerçeve Yapılar…….	123

4.2.1. 6 Elemanlı Düzlem Çelik Çerçeve……..... 125

4.2.2. 21 Elemanlı Düzlem Çelik Çerçeve ……..…… 131

4.2.3. 70 Elemanlı Düzlem Çelik Çerçeve ……...……... 137

4.2.4. 8 Elemanlı Uzay Çelik Çerçeve (Sürekli Tasarım Değişkenli)……..…..... 144

4.2.5. 180 Elemanlı Uzay Çelik Çerçeve (Sürekli Tasarım Değişkenli)……..….. 149

4.2.6. 180 Elemanlı Uzay Çelik Çerçeve (Ayrık Tasarım Değişkenli)……..…..... 157

5. SONUÇ VE ÖNERİLER…….. 165

6. KAYNAKLAR…….. 167

ÖZGEÇMİŞ…… 177

ÖZET

YAPI SİSTEMLERİNİN DOĞAL FREKANS SINIRLAYICILARI ALTINDA ADAPTİF JAYA ALGORİTMASIYLA OPTİMUM TASARIMI

DOKTORA TEZİ

Gülay YALÇİN BAYAR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2021

"Evrenin sırlarını bulmak istiyorsanız enerji, frekans ve titreşim açısından düşünün." Nikola TESLA'nın sözünden yola çıkarak bu tez çalışmasında düzlem/uzay kafes yapılar ve düzlem/uzay çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında modifiye JAYA (MJA) ve Adaptif Jaya (AJA) algoritmaları kullanılarak minimum ağırlıklı tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Sezgisel optimizasyon yöntemleri, son kırk yılda karmaşık optimizasyon problemlerini çözmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Jaya algoritması (JA) son yıllarda öne sürülen en popüler sezgisel optimizasyon yöntemleri arasındadır. Jaya, Sanskritçe'de "Zafer" anlamına gelmektedir. Jaya algoritması (JA), optimum tasarımın bulunması için en iyi çözüme yaklaşmayı ve en kötü çözümden uzaklaşmayı esas almaktadır. Bu doktora tezinde sunulan MJA ile standart JA'ya göre daha hızlı bir algoritma elde edilmeye çalışılmıştır. AJA ile ise herhangi bir optimizasyon parametresi kullanmadan kendini otomatik geliştiren bir algoritma oluşturulmuştur. Öne sürülen MJA ve AJA algoritmaları düzlem/uzay kafes ve düzlem/uzay çerçeve sistem tasarım örneklerinde MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. Optimum tasarım sonunda elde edilen yapı sistemleri ayrıca SAP 2000 V23 (2021) yapı analiz programında modellenmiş ve MATLAB'ta kodlanan optimizasyon algoritmalarının icrası ile bulunan sonuçlarla birebir aynı değerler elde edilmiştir. Bu şekilde tezde geliştirilen algoritmaların doğrulanması yapılmıştır. MJA ve AJA'nın performansı daha önce farklı sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak optimum tasarımı yapılmış olan 7 adet düzlem ve uzay kafes yapı ile 5 adet düzlem ve uzay çelik çerçeve üzerinde test edilmiştir. Önerilen yöntemlerden elde edilen sonuçlar, birbiriyle ve diğer optimizasyon yöntemleriyle optimum ağırlık ve optimum ağırlığı bulmak için gereken yapı analiz sayısı bakımından karşılaştırılmıştır. Ayrıca optimizasyon yöntemlerinin farklı başlangıç tasarımları için yapılan icraları sonucu bulunan tasarımlara ait

ortalama ağırlık, en kötü ağırlık ve standart sapma gibi istatistiksel parametreler açısından da kıyaslamaları yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar AJA'nın, MJA, standart JA ve literatürdeki diğer yöntemlerden daha hafif tasarımları daha kısa sürede bulabildiğini kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Doğal Frekans sınırlayıcıları, optimum tasarım; düzlem ve uzay kafes yapılar, düzlem ve uzay çelik çerçeveler, Jaya algoritması, Adaptif JAYA algoritması.

ABSTRACT

OPTIMUM DESIGN OF STRUCTURAL SYSTEMS USING ADAPTIVE JAYA ALGORITHM UNDER NATURAL FREQUENCY CONSTRAINTS

PhD THESIS

Gülay YALÇİN BAYAR

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2021

"If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration." based on the words of Nikola TESLA, this thesis aims to obtain minimum weight of planar/space trusses and planar/space frames using modified JAYA (MJA) and adaptive JAYA algorithms (AJA) under natural frequency constraints. Metaheuristic optimization methods have been implemented as efficient tools for solving complicated optimization problems over the last four decades. JA algorithm (JA) is among the most popular metaheuristic methods which have been developed recently. Jaya means "Victory" in Sanskrit. The algorithm is based on the concept that the solution obtained for a given optimization problem which should move toward the best solution and must avoid the worst solution. The proposed MJA and AJA algorithms for planar/space truss and planar/space frame structures. The optimum designs are also analyzed by SAP2000 V23 (2021) structural analyses software and hence, the results found by propoced algorithms are verified by a reliable software. The performance of MJA and AJA is tested on seven truss structures and five steel frame structures, which have previously been optimized by using different metaheuristic optimization methods. The results obtained by the proposed methods are compared to each other and other optimization methods in terms of optimum weight and number of structural analyses. Several statistical parameters such as average weight, worst weight and standard deviation are also reported in the design examples. The comparisons prove that AJA could find lighter designs with less computational effort than MJA, standard JA and other optimization methods in the literature.

Keywords: Natural frequency constraints, optimum design; planar/truss structures, planar/space steel frames, Jaya algorithm, Adaptive JAYA algorithm.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 2.1.	Kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar	12
Çizelge 2.2.	Literatürde çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar	14
Çizelge 4.1.	Kafes yapıların malzeme özellikleri, kesit alanlarının alt-üst sınır değerleri ve doğal frekans sınır değerleri	58
Çizelge 4.2.	MJA yöntemi kullanılarak farklı popülasyon büyüklükleri için gereken yapılan analiz sayısı (NSA) ve en hafif yapı ağırlık sonuçları	58
Çizelge 4.3.	37 elemanlı kafes yapının optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	60
Çizelge 4.4.	37 elemanlı kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	60
Çizelge 4.5.	52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	69
Çizelge 4.6.	52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	70
Çizelge 4.7.	72 elemanlı uzay kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması.	79
Çizelge 4.8.	72 elemanlı uzay kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	80
Çizelge 4.9.	200 elemanlı düzlem kafes yapının optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	86
Çizelge 4.10.	200 elemanlı düzlem kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	88
Çizelge 4.11.	200 elemanlı düzlem kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	89
Çizelge 4.12.	600 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	97
Çizelge 4.13.	600 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	98
Çizelge 4.14.	1180 elemanlı kubbe kafes yapının bir alt yapısının düğüm noktası koordinatları	106
Çizelge 4.15.	1180 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	106
Çizelge 4.16.	1180 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	108
Çizelge 4.17.	1410 elemanlı kubbe kafes yapının bir alt yapısının düğüm noktası koordinatları	116
Çizelge 4.18.	1410 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması	116
Çizelge 4.19.	1410 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması	117

Çizelge 4.20. Çerçeve yapıların malzeme özellikleri, kesit alanlarının alt-üst sınır değerleri ve doğal frekans sınır değerleri 124
Çizelge 4.21. 6 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 126
Çizelge 4.22. 6 elemanlı düzlem çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması 127
Çizelge 4.23. 21 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 133
Çizelge 4.24. 21 elemanlı düzlem çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması 133
Çizelge 4.25. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 140
Çizelge 4.26. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması 141
Çizelge 4.27. 8 elemanlı uzay çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması 145
Çizelge 4.28. 8 elemanlı uzay çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması 146
Çizelge 4.29. 180 elemanlı uzay çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (Sürekli tasarım değişkenli) 152
Çizelge 4.30. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması (Sürekli tasarım değişkenli) 153
Çizelge 4.31. 180 elemanlı uzay çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (Ayrık tasarım değişkenli) 158
Çizelge 4.32. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması (Ayrık tasarım değişkenli) 159

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1.	Standart JA algoritmasının akış diyagramı	23
Şekil 3.2.	Farklı tek serbestlik dereceli sistemler	26
Şekil 3.3.	Dış dinamik yük p(t)'ye maruz kalan sönümlü TSD sistem	27
Şekil 3.4.	Sönümsüz titreşim	29
Şekil 3.5.	Sönümlü titreşim	30
Şekil 3.6.	Çok serbestlik dereceli yapı modelleri	31
Şekil 3.7.	Dinamik yüklemeye maruz çok serbestlik dereceli sistemin mod şekilleri	32
Şekil 3.8.	Düzlem kafes elemanının (a) lokal ve (b) global koordinatlardaki gösterimi	36
Şekil 3.9.	İki düğümlü prizmatik bar eleman için direk kütle toplanması	37
Şekil 3.10.	Uzay kafes elemanının (a) lokal ve (b) global koordinatlardaki gösterimi	39
Şekil 3.11.	Düzlem çerçeve elemanının gösterimi	41
Şekil 3.12.	Düzlem çerçeve elemanının gösterimi Burada; XYZ yapının tanımlanması için kullanılan eksen takımı – genel eksen takımı xyz elemanın tanımlanması için kullanılan eksen takımı eleman eksen takımı.	41
Şekil 3.13.	Uzay çerçeve elemanının gösterimi	43
Şekil 3.14.	Uzay çerçeve çubuğu için rijitlik katsayıları (Özberk 2006)	44
Şekil 3.15.	Uzay çerçeve çubuğu eksen takımları	46
Şekil 3.16.	MJA algoritmasının akış diyagramı	51
Şekil 3.17.	AJA algoritmasının akış diyagramı	55
Şekil 4.1.	37 elemanlı düzlem kafes yapının başlangıç halinin yan görünüşü (Lieu 2018)	59
Şekil 4.2.	37 elemanlı düzlem kafes yapının başlangıç (kesikli çizgi) ve AJA ile optimize edilmiş halinin yan görünüşü	61

Şekil 4.3.	(a). SAP2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının, 5. Modu	62
Şekil 4.4.	37 elemanlı düzlem kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması	67
Şekil 4.5.	52 elemanlı kubbe kafes yapının ilk yerleşim planının üstten ve yandan şematik görünüşleri (Lieu 2018)	68
Şekil 4.6.	AJA ile optimize edilmiş 52 elemanlı kubbe kafesin son görünüşü	71
Şekil 4.7.	(a). SAP2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının, 5. Modu	72
Şekil 4.8.	52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması	76
Şekil 4.9.	72 elemanlı uzay kafes yapı şekli (Lieu 2018)	78
Şekil 4.10.	(a). SAP2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının, 5. Modu	81
Şekil 4.11.	72 elemanlı uzay kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması	86
Şekil 4.12.	200 elemanlı düzlem kafes yapının görünüşü (Lieu 2018)	87
Şekil 4.13.	(a). SAP2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı	90

düzlem kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının, 5. Modu

Şekil 4.14. 200 elemanlı düzlem kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 95

Şekil 4.15. 600 elemanlı kubbe kafes yapının şekli (a) Yapının üç boyutlu görünüşü (b) Kubbe yapının bir alt yapısının detay görünüşü (Kaveh ve Ghazaan 2018) 96

Şekil 4.16. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının, 5. Modu 99

Şekil 4.17. 600 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 104

Şekil 4.18. 1180 elemanlı kubbe kafes yapının şekli (a) Yapının üç boyutlu görünüşü (b) Kubbe yapının bir alt yapısının detay görünüşü (Kaveh ve Ghazaan 2018) 105

Şekil 4.19. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen1180 elemanlı kubbe kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının, 5. Modu 109

Şekil 4.20. 1180 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 114

Şekil 4.21. 1410 elemanlı kubbe kafes yapının şekli (a) Yapının üç boyutlu görünüşü (b) Kubbe yapının bir alt yapısının detay görünüşü (Kaveh ve Ghazaan 2018) 115

Şekil 4.22. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının, 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının, 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen1410 elemanlı kubbe kafes yapının, 3. Modu (d). SAP2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının, 4. Modu (e). SAP2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının, 5 118

Şekil 4.23. 1410 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 123

Şekil 4.24. 6 elemanlı düzlem çerçeve (Zakian 2019) 126

Şekil 4.25. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 6 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 6 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 6 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 3. Modu 128

Şekil 4.26. 6 elemanlı düzlem çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 131

Şekil 4.27. 21 elemanlı düzlem çerçeve (Zakian 2019) 132

Şekil 4.28. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 21 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 21 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 21 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 3. Modu 134

Şekil 4.29. 21 elemanlı düzlem çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 137

Şekil 4.30. 70 elemanlı düzlem çerçeve (Zakian 2019) 138

Şekil 4.31. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 70 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 70 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 70 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 3. Modu 141

Şekil 4.32. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 144

Şekil 4.33. 8 elemanlı uzay çerçeve (Zakian 2019) 145

Şekil 4.34. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının 3. Modu 146

Şekil 4.35. 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 149

Şekil 4.36. 180 elemanlı uzay çerçeve (Zakian 2019) 150

Şekil 4.37. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 3. Modu 154

Şekil 4.38. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının (sürekli tasarım değişkenli) yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 157

Şekil 4.39. (a). SAP2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (ayrık tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 1. Modu (b). SAP2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (ayrık tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 2. Modu (c). SAP2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (ayrık tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 3. Modu 160

Şekil 4.40. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının (ayrık tasarım değişkenli) yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması 163

KISALTMA VE SİMGELER

A	: Enkesit alanı
ABC	: Yapay arı koloni algoritması
ACO	: Karınca koloni optimizasyonu
AHEFA	: Adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması
AJA	: Adaptif Jaya algoritması
ALO	: Karınca aslanı optimizasyonu
ANDE	: Adaptif diferansiyel evrim
BBBC	: Büyük patlama-büyük çöküş optimizasyonu
c	: Viskoz sönümleme katsayılı sönümleyici
CBO	: Çarpışan cisimler optimizasyonu
CBBO	: Kaotik biyocoğrafya optimizasyonu
CGFA	: Kaotik ateşböceği algoritması
CPA	: Döngüsel kendiliğinden türeme algoritması
CRPSO	: Değişken parçacık sürü optimizasyonu
CSA	: Karga arama algoritması
CSS	: Yüklenmiş sistem araması
CSS-BBBC	: Yüklü sistem araması-büyük patlama büyük çöküş
CSS-MBLS	: Göç esaslı lokal arama mekanizmalı hibrid optimizasyon
DAJA	: Gelişmiş Jaya algoritması
DE	: Yunus ekolasyon yöntemi
DPSO	: Demokratik parçacık sürü optimizasyonu
E	: Elastisite modülü
EACCS	: Zenginleştirilmiş yapay koroner damar devridaim optimizasyonu
EBBO	: Zenginleştirilmiş biyocoğrafya esaslı opimizasyon
ECBO	: Zenginleştirilmiş çarpışan cisimler optimizasyonu
EM-MS	: Hibrid elektromanyetizma ve göç stratejisi
f	: Frekans
f_D	: Viskoz sönümleme kuvveti
f_I	: Atalet kuvveti
f_S	: Elastik yay kuvveti
f_n	: Doğal frekans
FA	: Ateşböceği algoritması
FOA	: Meyve sineği optimizasyonu

FPA : Çiçek tozlaşma algoritması
G : Kayma modülü
GA : Genetik algoritma
GA-OC : Hibrid genetik algoritma ve optimumluk kriteri yöntemi
GSA : Yerçekimsel arama aloritması
GWO : Gri kurt optimizasyonu
HALC-PSO : Parçacık küme optimizasyonu esaslı armoni arama
HRPSO : Zenginleştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu için hibrid armoni arama ve ışın optimizasyonu
HS : Armoni arama aloritması
HSPO : Hipotrokoid spiral optimizasyonu
HUS : Av arama algoritması
I : Atalet momenti
ICA : Rekabete dayalı yayılma algoritması
IDE : Gelişmiş diferansiyel evrim
IGWO : Geliştirilmiş gri kurt optimizasyonu
ISOS : Gelişmiş simbiyotik organizma arama
itmaks : Maksimum iterasyon sayısı
j : Düğüm noktası koordinatı
JA : Jaya algoritması
K : Sistem rijitlik matrisi
k : Eleman rijitlik matrisi
KH : Yarasa algoritması
L : Eleman uzunluğu
L_k : Alttan sınırlandırılmış doğal frekans sınırlayıcı sayısı
M : Sistem kütle matrisi
m : Eleman kütle matrisi
MBA : Maden patlatma algoritması
MC-TLBO : Çok sınıflı öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon
MCSS : Magnetik yüklenmiş sistem araması
MDVC-UVPS : Çoklu tasarım değişkeni ve üst sınır stratejisini içeren hibrid algoritma
MJA : Modifiye Jaya algoritması
MS-DE : Göç arama stratejili diferansiyel evrim
MS-TLBO : Modifiye edilmiş öğretme öğrenme esaslı optimizasyon
NHPGA : Hibrid paralel genetik algoritma

nm : Toplam eleman sayısı

nk : Üstten sınırlandırılmış doğal frekans sınırlayıcı sayısı

NN : Sinir ağları yöntemi

NSA : Yapı analiz sayısı

OC : Optimumluk kriteri yöntemi

OC-GA : Hibrid optimum kriteri ve genetik algoritma

OMGSA : Ortogontal çoklu yerçekimsel arama

OPENSEES : The Open System for Earthquake Engineering Simulation

p(t) : Dış yük

PGA : Paralel genetik algoritma

ps : Popülasyon sayısı

PSO : Parçacık küme optimizasyonu

QN-BBBC : Quasi-Newton büyük patlama büyük çöküş optimizasyonu

ReDE : Rulet seçimli diferansiyel evrim

RO : Işın optimizasyonu

SA : Tavlama benzeşimi algoritması

SAP2000-OAPI: SAP2000 Open Application Programming Interface

SBO : Okul esaslı optimizasyon

SGA : Araştırma grubu algoritması

SHS : Ardışık armoni arama

SOS : Simbiyotik organizma arama

SQP : Sıralı ikinci dereceden programlama

T : Periyot

t : Zaman

T_n : Doğal titreşim periyodu

TEO : Isı değişimi optimizasyonu

TLBO : Öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon

TS : Tabu arama algoritması

VPS : Titreşen parçacıklar sistemi

WCA : Su döngüsü algoritması

WEO : Su buharlaşması optimizasyonu

A_i^{min} : *i*'inci eleman grubunun alabileceği en küçük enkesit alanı

A_i^{maks} : *i*'inci eleman grubunun alabileceği en büyük enkesit alanı

$(A, x)_{i,l,it}$: *l*'inci tasarım için *i*'inci tasarım değişkeninin enkesit alanı

$(A,x)_{i,l,it}^{yeni}$: *l*'inci tasarımın *i*'inci değişkeni için yeni üretilen enkesit alanı

$(A,x)_{i,eniyi,it}$: *it*'inci iterasyondaki eniyi tasarımın *i*'inci tasarım değişkeni

$(A,x)_{i,enkötü,it}$: *it*'inci iterasyondaki enkötü tasarımın *i*'inci tasarım değişkeni

C_1 : Sabit değer

C_2 : Sabit değer

c_{cr} : Kritik sönümleme katsayısı

d_1 : x ekseni doğrultusundaki serbestlik derecesi

d_2 : y ekseni doğrultusundaki serbestlik derecesi

d_3 : Dönme serbestlik derecesi

d_4 : x ekseni doğrultusundaki serbestlik derecesi

d_5 : y ekseni doğrultusundaki serbestlik derecesi

d_6 : Dönme serbestlik derecesi

f_{ix} : *i* ucuna ait x ekseni doğrultusundaki uç kuvvet

f_{iy} : *i* ucuna ait y ekseni doğrultusundaki uç kuvvet

f_{jx} : *j* ucuna ait x ekseni doğrultusundaki uç kuvvet

f_{jy} : *j* ucuna ait y ekseni doğrultusundaki uç kuvvet

$iter_{maks}$: Maksimum iterasyon sayısı

m_{iz} : *i* ucuna ait uç momenti

m_{jz} : *j* ucuna ait uç momenti

$r_{1,i,it}$: *it*'inci iterasyondaki *i*'inci tasarım için [0,1] aralığında rastgele üretilen birinci reel sayı

$r_{2,i,it}$: *it*'inci iterasyondaki *i*'inci tasarım için [0,1] aralığında rastgele üretilen ikinci reel sayı

ρ : Özgül ağırlık

ξ : Sönümleme oranı

ε_{conv} : Yakınsama katsayısı

ϕ : Yerdeğiştirme genliği

θ : Faz açısı

Θ_{iz} : *i* ucuna ait dönme

Θ_{jz} : *j* ucuna ait dönme

u	: Yerdeğiştirme
ú	: Hız
ű	: İvme
u_{ix}	: *i* ucuna ait x ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme
u_{iy}	: *i* ucuna ait y ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme
u_{jx}	: *j* ucuna ait x ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme
u_{jy}	: *j* ucuna ait y ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme
v_{ω}^{k}	: *k*'ıncı doğal frekans için ceza değeri
v_{ω}^{l}	: *l*'inci doğal frekans için ceza değeri
{x}	: Eleman grubuna ait düğüm noktası koordinatları
$\varphi(A,x)$	: Cezalandırılmış amaç fonksiyonu
ω	: Açısal frekans
ω_k	: Yapının *k*'inci doğal frekans değeri
ω_k^u	: Yapının *k*'inci doğal frekans değerinin alabileceği üst sınır değeri
ω_n	: Açısal doğal frekans
ω_l	: Yapının *l*'inci doğal frekans değeri
ω_l^l	: Yapının *l*'inci doğal frekans değerinin alabileceği alt sınır değeri
$W(\{A,x\})$	: Yapının ağırlığı

1. GİRİŞ

Mühendislik, ekonomi, tıp ve diğer tüm bilim alanlarındaki optimizasyon probleminin çözümü oldukça karmaşıktır. Bu problemlerin standard hesap yöntemleriyle makul bir sürede ve kesin olarak çözümü mümkün değildir. Bu tip karmaşık problemlerin çözümünde optimizasyon yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Optimizasyon yöntemleri özellikle 1950'li yıllardan sonra farklı disiplinlerdeki problemlerin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Başlangıçta optimizasyon problemlerinin çözümünde gradyan, türev vb. matematik operatörleri kullanılan optimumluk kriterleri, dinamik programlama gibi matematiksel optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerin ayrık tasarım değişkenli problemler için uygun olmaması ve karmaşık matematiksel hesaplamalar gerektirmesi optimizasyon konusunda çalışan bilim insanlarını farklı tarzda yöntemler geliştirmeye zorlamıştır. Bu arayışlar karmaşık matematiksel hesaplamalar kullanmayan ve her türlü optimizasyon problemine uygulanabilen sezgisel optimizasyon yöntemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Sezgisel yöntemler doğadaki doğal olay ve süreçleri taklit ederek optimizasyon problemlerini çözmeyi hedefleyen yöntemlerdir. Son 40 yılda çok sayıda sezgisel optimizasyon yöntemi tüm bilim dallarında olduğu gibi İnşaat Mühendisliği'ndeki optimizasyon problemlerinin çözümünde de kullanılmıştır.

Sezgisel Optimizasyon yöntemleri; evrimsel gelişimi, canlıların sürü davranışını, insan davranışını ve fiziksel kanunları taklit etmelerine göre 4 grupta incelenebilirler.

Evrimsel programlama (Fogel ve ark. 1966), genetik algoritmalar (Holland 1975 ve Goldberg 1985), evrim stratejileri (Beyer ve Schnefel 2002), yapay bağışıklık algoritması (Farmer ve ark. 1986) ve biyocoğrafya esaslı optimizasyon (Simon 2008) yöntemleri canlı organizmaların doğal evrimini taklit eden sezgisel optimizasyon yöntemleridir.

Parçacık küre optimizasyonu (PSO) (Eberhart ve Kennedy 1995; Cler 2006), karınca koloni optimizasyonu (ACO) (Karaboğa ve Baştürk, 2007), ateşböceği algoritması (FA) (Yang 2010), av arama (HUS) (Qftadeh ve ark. 2010), yarasa algoritması (KH) (Gandomi ve ark. 2013), yunus ekolasyon yöntemi (DE) (Kaveh ve Farhondi 2013), karınca aslanı optimizasyonu (ALO) (Mirjalili 2015), karga arama (CSA) (Askarzadeh 2016), meyve sineği optimizasyonu (FOA) (Kanarachos ve ark.

2017), mikro organizma ve hayvanların koloni/sürü davranışlarını taklit eden sezgisel optimizasyon yöntemleridir.

Üçüncü grupta yer alan ve insan davranışını taklit eden yöntemler olarak; tabu arama (TS) (Glover ve Laguna 1997), armoni arama (HS) (Geem ve ark. 2001) rekabete dayalı yayılma algoritması (ICA) (Kaveh ve Talatahari 2010), öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon (TLBO) (Rao ve ark. 2011), maden patlatma algoritması (MBA) (Sadollah ve ark. 2012) ve araştırma grubu aloritması (SGA) (Gonçalves ve ark. 2015) yöntemleri yer almaktadır.

Son grupta yer alan fizik kanunlarından esinlenerek öne sürülen sezgisel yöntemlerden bazıları şunlardır; tavlama benzeşimi (SA) (Kirkpatrick ve ark. 1983), büyük patlama-büyük çöküş (BBBC) (Erol ve Eksin 2006), yerçekimsel arama (GSA) (Rashedi ve ark. 2009), yüklenmiş sistem araması (CSS) (Kaveh ve Talathari 2010), magnetik yüklenmiş sistem araması (MCSS) (Kaveh ve ark. 2013), ışın optimizasyonu (RO) (Kaveh ve Khayatazad 2012), çarpışan cisimler optimizasyonu (CBO) (Kaveh ve Mahdavi 2014), su döngüsü algoritması (WCA) (Eskandar ve ark. 2012), çiçek tozlaşma algoritması (FPA) (Bekdas ve ark., 2015) su buharlaşması optimizasyonu (WEO) (Kaveh ve Bakhshpoori, 2016), ısı değişimi optimizasyonu (TEO) (Kaveh ve Dadras, 2017) ve çevrimsel partenogenez algoritmasıdır (CPA) (Kaveh ve Zolghadr 2017).

Yapı sistemlerinin ekonomik tasarımı nüfusun hızla artması buna karşın hammadde kaynaklarının sınırlı olmasından dolayı daha da önem kazanmıştır. Bu durum yapı sistemlerinin tasarımında optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Yapıların optimum tasarımı ile yeterli dayanıma sahip yapılar arasında en ekonomik olanın elde edilmesi amaçlanmaktadır. Öte yandan, bu amaç doğrultusunda projelendirilen yapının etki eden yükler altında belli tasarım sınırlayıcılarını sağlaması gerekmektedir. Böylece, tasarım sınırlayıcılarını sağlayan ve ağırlığı minimum olan yapının belirlenmesi, optimum tasarım problemini oluşturmaktadır. Yapı sistemlerinin optimum tasarımı konusunda farklı optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, tasarım sınırlayıcıları olarak genellikle gerilme, dayanım, deplasman ve katlar arası göreli ötelenme gibi sınırlayıcılar kullanılırken, nispeten oldukça azında doğal frekans sınırlayıcıları kullanılmıştır.

Her yapı sistemi yerdeğiştirme, dönme ve titreşim olmak üzere üç farklı türde hareket yapabilmektedir. Dışarıdan herhangi bir kuvvetin (deprem, rüzgar vs.) etki etmesi ile meydana gelen titreşim hareketi zorlanmış titreşim olarak adlandırılır. Bununla birlikte, yapı sistemi hiçbir kuvvet etki etmese bile titreşim hareketi yapmaktadır. Bu titreşim serbest titreşim (doğal) olarak tanımlanmaktadır. Titreşim hareketinin temel karekteristik özelliklerinden biri de frekansıdır.

Yapı sistemlerinin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyon süreci oldukça karmaşık olduğundan yüksek performans gösteren optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla yeni ileri sürülen optimizasyon yöntemlerinin gücünü görmek açısından doğal frekans sınırlayıcıları altında yapı sistemlerinin optimizasyonu oldukça kullanışlı bir test problemi olarak görülmektedir. Son 20 yılda kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında enkesit ve şekil optimizasyonu konusunda kullanılan sezgisel optimizasyon yöntemleri şu şekilde sıralanabilir; genetik algoritmalar (GA) (Wei ve ark. 2005), parallel genetik algoritmalar (PGA) (Wei ve ark. 2011), yeniden analiz edilen genetik algoritmalar (Zuo ve ark. 2011), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Gomes 2011), demokratik parçacık sürü optimizasyonu (DPSO) (Kaveh ve Zolghadr 2014), değişken esaslı parçacık sürü optimizasyonu (CRPSO) (Carvalho ve ark. 2018), öğretme öğrenme esaslı optimizasyon (TLBO) (Baghlani ve Makiabadi 2013), çok sınıflı öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon (MC-TLBO) (Farshchin ve ark. 2016), modifiye edilmiş alt popülasyonlu öğretme öğrenme esaslı optimizasyon (MS-TLBO) (Tejani ve ark. 2016), okul esaslı optimizasyon (SBO) (Farshchin ve ark. 2016), gelişmiş diferansiyel evrim (IDE) (Ho-Huu ve ark. 2016), adaptif yönlü mutasyon ve en yakın komşu kıyaslamalı diferansiyel evrim (ANDE) (Pham 2016), rulet seçimli diferansiyel evrim (ReDE) (Ho-Huu ve ark. 2018), kaotik biyocoğrafya esaslı optimizasyon (CBBO) (Jalili ve ark. 2014), zenginleştirilmiş biyocoğrafya esaslı opimizasyon (EBBO) (Taheri ve Jalili 2016), çarpışan cisimler optimizasyonu (CBO) (Kaveh ve Mahdavi 2015), simbiyotik organizma arama (SOS) (Tejani ve ark. 2016), gelişmiş simbiyotik organizma arama (ISOS) (Tejani ve ark. 2016), ardaşık armoni arama (SHS) (Gholizadeh ve Barzegar 2013), ortogontal çoklu yerçekimsel arama (OMGSA) (Khatibibnia ve Naseralavi 2014), titreşen parçacıklar sistemi (VPS) (Kaveh ve Ghazaan 2017), çevrimsel partenogeniz algoritması (CPA) (Kaveh ve Zolghadr 2017), zenginleştirilmiş yapay koroner damar devridaim

optimizasyonu (EACCS) (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019), hipotrokoid spiral optimizasyonu (HSPO) (Kaveh ve Mahjoubi 2019), PSO, HS ve BBBC (Kaveh ve Zolghadr 2014) Kaveh ve Zolghadr (2017), kafes yapıların sezgisel optimizasyon yötemleri kullanarak doğal frekans sınırlayıcıları altında enkesit ve şekil optimizasyonunun yapıldığı çalışmaları içeren kapsamlı bir literatür taraması sunmuşlardır.

Yukarıda verilen çalışmaların yanısıra iki veya daha fazla sezgisel optimizasyon yönteminin bir araya getirilmesiyle elde edilen hibrid yöntemlerde kafes yapıların doğal frekans sınırlarıyıcıları altında enkesit ve şekil optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu çalışmalarda hibrid yüklü sistem araması-büyük patlama büyük çöküş (CSS-BBBC) (Kaveh ve Zolghadr 2018), büyük patlama büyük çöküşlü quasi-Newton (QN-BBBC) (Kaveh ve Mahdavi 2013), hibrid optimum kriteri ve genetik algoritma (OC-GA) (Zuo ve ark. 2014), zenginleştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu için hibrid armoni arama ve ışın optimizasyonu (HRPSO) (Kaveh ve Javadi 2014), parçacık küme optimizasyonu esaslı armoni arama (HALC-PSO) (Kaveh ve Ghazaan 20015), hibrid elektromanyetizma mekanizması ve göç stratejisi (EM-MS) (Hosseinzadeh ve ark. 2016), adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması (AHEFA) (Lieuve ark. 2018), göç esaslı local arama mekanizmalı hibrid yüklü sistem araması (CSS-MBLS) (Jalili ve Talatahari 2018), göç arama stratejili diferansiyel evrim (MS-DE) (Jalili ve Hosseinzadeh 2019) yöntemleri kullanılmıştır.

Sezgisel optimizasyon yöntemleri büyük ölçekli kubbe yapıların doğal frekans Sınırlayıcıları altında optimum tasarımında da kullanılmıştır. Zenginleştirilmiş çarpışan cisimler optimizasyonu ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), titreşen cisimler sistemi DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016), çoklu tasarım değişkeni yapılanması ve üst sınır stratejisini içeren hibrid algoritma MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018), çevrimsel partenogez algoritması CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018), standard Jaya algoritması JA (Grzywinski ve ark. 2019), ve kaotik ateşböceği algoritması esaslı Gaussian haritalaması CGFA (Kaveh ve Javadi 2019) bu konuda yapılan başlıca çalışmalardır.

Frekans sınırlayıcıları altında yapıların optimizasyonu konusunda kafes ve kubbe yapılar dışında optimize edilen bir diğer yapı sistemleri de çerçeve yapılar olup, bu konuda yapılan çalışmalar daha kısıtlıdır. Düzlem ve uzay çelik çerçeve sistemlerin doğal

frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu konusunda optimumluk kriteri (McGee ve Phan 1992), rayleigh yaklaşımı ile (Salajegheh 2000), döngüsel programlama (Sedagahati 2005) yöntemleri ile çalışmalar yapılmıştır. Bu konuda sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak Zakian (2019) tarafından yapılan sadece bir çalışma mevcuttur.

Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan nispeten yeni olan bir diğer sezgisel optimizasyon yöntemi ise JAYA algoritmasıdır (JA). Jaya kelime olarak Sanskritçede 'zafer' anlamında olup, arama işleminde en iyi çözüme yaklaşmayı en kötü çözümden uzaklaşmayı esas almaktadır. JA ilk olarak Rao (2016) tarafından sınırlayıcılı ve sınırlayıcısız fonksiyonların optimizasyonu için önerilmiştir. JA, popülasyon büyüklüğü ve maksimum iterasyon sayısı gibi sadece iki kontrol parametresi içerdiğinden uygulanması oldukça basit bir optimizasyon yöntemidir. Bu uygulama kolaylığı JA'nın kısa bir sürede çok farklı alanlarda uygulanmasına sebep olmuştur. Kaynak işlemi optimizasyonu (Rao ve Rai 2017), gövde borulu ısı değiştiricisinin ekonomik optimizasyonu (Rao ve Saroj 2017), ısı değiştiricilerinin çok amaçlı optimizasyonu (Rao ve Saroj 2018), kablosuz ağlarda en uygun yol seçimi (Sudhakar ve Inbarani 2018), aşındırıcılı su jeti ile talaşlı imalat optimizasyonu (Rao ve ark. 2018), beton barajların yapısal sağlığının izlenmesi (Kang ve ark. 2019), bağımsız güneş pili rüzgar türbini ve batarya sistemlerin optimizasyonu (Khan ve Javaid 2020), otomatik konjektörlerin optimizasyonu (Jumani ve ark. 2020), yaprak hastalıklarının sınıflandırılması ve tanımlanmasın (Ramesh ve Vydeki 2020), rüzgar enerjisi sistemlerin online yük kontrolü (Pradhan ve Bhende 2020), hibrid yenilenebilir sistemin optimizasyonu (Alshummari ve Asumadu 2020), ikili değer optimizasyonu (Aslan ve ark. 2020), manyetik bitirme işlemi optimizasyonu (Anjeneyuk ve Venkatesh 2020), adaptif kart konum kontrolü (Mohamed ve ark. 2020).

Farklı alanlardaki uygulamalarının yanında JA yapı mühendisliğinde de kullanılmıştır. Sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların gelişmiş JA ile enkesit, şekil ve topoloji optimizasyonu (Değertekin ve ark. 2018), çelik kubbe yapıların JA ile optimizasyonu (Grzywinski ve ark. 2019), ızgara yapıların JA ile optimizasyonu (Dede 2018), ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların ileri JA ile enkesit, şekil ve topoloji optimizasyonu (Değertekin ve ark. 2019) ve kafes yapıların frekans sınırlayıcıları altında modifiye edilmiş JA ile optimizasyonu (Değertekin ve ark. 2019).

Bu doktora tez çalışmasının ana amacı, düzlem/uzay kafes ve çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında modifiye edilmiş Jaya (MJA) ve adaptif Jaya (AJA) algoritmaları ile enkesit ve şekil optimizasyonunu yapmaktır. Tezde sunulan MJA ile standart JA'ya göre daha hızlı bir Jaya algoritması elde edilmeye çalışılmıştır. AJA ile ise herhangi bir optimizasyon parametresi kullanmadan kendini otomatik geliştiren bir Jaya algoritması sunulmuştur.

Öne sürülen MJA ve AJA algoritmaları MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. Optimum tasarım sonunda elde edilen yapı sistemleri ayrıca SAP 2000 V23 (2021) yapı analiz programında modellenmiş ve MATLAB'ta kodlanan optimizasyon algoritmalarının icrası ile bulunan sonuçlarla birebir aynı değerler elde edilmiştir. Bu şekilde tezde geliştirilen algoritmaların doğrulanması yapılmıştır. MJA ve AJA'nın performansı daha önce farklı sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak optimum tasarımı yapılmış olan 7 adet düzlem ve uzay kafes yapı ile 5 adet düzlem ve uzay çelik çerçeve üzerinde test edilmiştir. MJA ve AJA'nın performansı, optimum ağırlık ve optimum ağırlığın elde edilmesi için gerekli yapı analiz sayısı ve bazı istatiksel parametreler bakımından literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar, AJA'nın MJA, JA ve literatürdeki diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar elde edebildiğini göstermektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Konu ile ilgili yapılmış önceki çalışmalar üç kısımda ele alınmıştır. İlk kısımda kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimmum tasarımı, ikinci kısımda çelik çerçevelerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimmum tasarımı ve üçüncü kısımda JA konusunda yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2.1.1. Kafes Yapıların Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar

Grandhi ve Venkayya (1988), doğal frekans sınırlayıcıları altında kafes yapıların optimum tasarımını optimumluk kriteri (OC) yöntemiyle yapmışlardır. OC'nin az sayıdaki iterasyonla büyük yapılar tasarlamada çok etkili bir yöntem olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada düzlem kafes sistemlerin ilk ve son frekans değerleri elde edilmiştir.

Golizadeh ve ark. (2008), ayrık tasarım değişkenli düzlem ve uzay kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu için genetik algoritma (GA) ve sinir ağlarının (NN) beraber kullanılmasıyla elde edilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemle GA yöntemine kıyasla daha hafif yapılar daha kısa hesaplama süresinde elde edilmiştir.

Gomes (2011), kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunda parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemini kullanmıştır. Yöntemin geçerliliği düzlem ve uzay kafes yapılar üzerinde test edilmiştir. Önerilen yöntemin sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırarak daha hafif yapılar elde edildiği belirlenmiştir.

Wei ve ark. (2011), hibrid paralel genetik algoritma adını verdikleri (NHPGA) bir sezgisel optimizasyon yöntemini kafes yapıların şekil ve enkesit optimizasyonunda kullanmışlardır. Önerilen yöntem standart genetik algoritma (GA) yöntemine göre gerek optimum tasarımı bulmak için gerekli yapı analiz sayısı bakımından ve gerekse optimum ağırlık bakımından daha etkili sonuçlar vermiştir.

Kaveh ve Zolghadr (2011), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonu için charged system search (standart CSS) ve geliştirilmiş CSS (Enhanced CSS) algoritma yöntemlerini önermişlerdir. CSS elektrostatik ve

Newton mekaniğindeki kanunları esas alarak üretilen bir optimizasyon yöntemidir. Dikkate alınan dört örnekten üçünde bu yöntemin literatürde bulunan diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini ve dördüncü örnekteki sonucun ise literatürdeki en hafif sonuca oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Wenjie Zuo ve ark. (2011), doğal frekans sınırlayıcıları altında kafes yapıların optimum tasarımını yeniden analiz-temelli genetik algoritma (GA) adı verilen bir yöntem kullanarak yapmışlardır. Önerilen yöntemin verimliliğini ortaya koymak düzlem kafes ve uzay kafes yapı tasarım örnekleri için yapılan optimum tasarım sonunda elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve en hafif yapı sistemlerinin bulunduğu görülmüştür.

Kaveh ve Zolghadr (2012), doğal frekans sınırlayıcılı kafes yapı optimizasyonu probleminde charged system search (CSS) ve big bang- big crunch (BB-BC) adı verilen iki sezgisel optimizasyon yönteminin bir arada kullanıldığı hibrid bir yöntem öne sürmüşlerdir. Burada CSS elektrostatik ve Newton mekaniğindeki kanunları esas alarak üretilen bir optimizasyon yöntemidir. BB-BC ise evrenin oluşumu ve evrimini taklit eden bir yöntemdir. Öne sürdükleri hibrid CSS-BBBC yöntemi ile standart CSS ve diğer bazı sezgisel optimizasyon yöntemlerinden daha hafif kafes yapılar elde edildiğini göstermişlerdir.

Miguel F. ve Miguel F. Leonardo (2012), iki güçlü sezgisel optimizasyon yöntemi olan harmonik arama (HS) ve ateş böceği algoritması (FA) yöntemlerini kullanarak kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu yapmışlardır. Her iki algoritmanın da uygulanabilirliğini ve etkinliğini göstermek için düzlem ve uzay kafes yapı örnekleri kullanmışlardır. Göz önüne alınan 4 örnekten üçünde literatüre göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Kaveh ve Mahdavi (2013), QN-BBBC olarak adlandırılan bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma, lokal arama için matematiksel bir yöntem olan Quasi-Newton (QN) ve global arama için ise Big Bang-Big Crunch (BBBC) optimizasyon yöntemini kullanan hibrid bir yöntemdir. QN-BBBC yöntemi kullanılarak kafes ve çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımını icra etmişlerdir. Literatürdeki çalışmalarla yapılan kıyaslamalar önerilen hibrid yöntemin oldukça güçlü olduğunu kanıtlamıştır.

Baghlani ve Makıabadi (2013), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu öğrenme öğretme esaslı optimizasyon (TLBO) yöntemini kullanmışlardır. TLBO herhangi bir sınıfta öğretmenin öğrencilerle ve aynı zamanda öğrencilerin birbiriyle olan etkileşimini taklit eden bir yöntemdir. Çalışmada sunulan tasarım örneklerinden elde edilen sonuçlar TLBO yönteminin literatürdeki diğer yöntemler kadar başarılı olduğunu göstermiştir.

Wenjie Zuo ve ark. (2014), kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonunda genetik algoritma (GA) ve optimumluk kriteri (OC) yöntemlerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen hibrid GA-OC yöntemini önermişlerdir. Çalışmalarında sundukları düzlem kafes yapı örnekleriyle GA-OC'nin standart GA yöntemine göre daha hafif kafes yapıları daha kısa hesaplama süresinde elde ettiği tespit etmişlerdir.

Kaveh ve Zolghadr (2014), doğal frekans sınırlayıcılı şekil ve enkesit optimizasyonunda demokratik parçacık sürü optimizasyonu (DPSO) adını verdikleri bir yöntem geliştirmişlerdir. DPSO ile standart parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yönteminde görülebilen optimum tasarıma erken yakınsama problemini gidermeyi amaçlamışlardır. Tasarım örnekleri önerilen yöntemin standart PSO'ya göre daha hafif kafes yapılar ürettiği tespit edilmiştir.

Farshchin ve ark. (2016) kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu üzerinde çalışmışlardır. Yöntem olarak öğrenme öğretme esaslı algoritma (TLBO) yönteminin modifiye edilmiş hali olan okul esaslı optimizasyon (SBO) yöntemini kullanmışlardır. SBO standart TLBO yönteminin özelliklerini önemli ölçüde geliştiren etkili bir mekanizmaya sahiptir. SBO ile optimize edilen düzlem ve uzay kafes sistem örneklerinden elde edilen sonuçlar TLBO ve literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan kıyaslamalar SBO ile daha hafif tasarımlar üretildiğini ve istatistiksel parametreler bakımından (ortalama ağırlık, standart sapma gibi) literatürdeki diğer yöntemlerden daha güçlü değerler bulunmuştur.

Kaveh ve Ghazaan (2016), kubbe yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu için zenginleştirilmiş çarpışan cisimler optimizasyonu (ECBO) adını verdikleri bir yöntem kullanmışlardır. Çalışmada optimize edilen kubbe yapı örneklerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla kıyaslanmıştır. Önerilen yöntem ile sadece daha hafif tasarımlar elde edilmemiş aynı zamanda hesaplama

süresinde önemli ölçüde tasarruf sağlanmıştır. Bu sonuçlarla ECBO'nun kubbe yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımı için oldukça güçlü bir yöntem olduğunu tespit etmişlerdir.

Kaveh ve Ghazaan (2017), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonunu titreşen parçacık sistemi algoritması (VPS) yöntemi ile yapmışlardır. VPS ile bulunan sonuçları, literatürdeki çalışmalara ait sonuçlar ile kıyaslandığında optimum tasarımı bulmak için gerekli yapı analiz sayısı ve yapı ağırlığı açısından önerilen yöntemin en iyi değerleri elde ettiği ortaya konulmuştur.

Kaveh ve Zolghadr (2017), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonunu döngüsel kendiliğinden türeme algoritması (CPA) adı verilen yeni geliştirilmiş bir meta-sezgisel yöntem ile yapmışlardır. CPA'nın etkinliği düzlem ve kafes sistem örnekleri kullanılarak tespit edilmiştir.

Kaveh ve Ghazaan (2018), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonunu titreşen parçacık sistemi algoritması (VPS) yöntemini modifiye ederek geliştirilen titreşen cisimler sistemi, çoklu tasarım değişkeni yapılanması ve üst sınır stratejisini içeren hibrid algoritma MDVC-UVPS yöntemi ile yapmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için kubbe yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile optimum tasarımı elde etme hızı, standart sapma ve yapı ağırlığı açısından karşılaştırılmış önerilen yöntemin en iyi değerleri elde ettiği ortaya konulmuştur.

V. Ho-Huu ve ark. (2018), kafes sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu çözmek için yeni geliştirilen rulet seçimli diferansiyel evrim ReDE algoritması yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için kubbe yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve diğer birçok optimizasyon yönteminden daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Qui X. Lieu ve ark. (2018), kafes sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu çözmek için adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması AHEFA yöntemini kullanmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için düzlem ve uzay yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve yüksek yakınsama oranı gösterdiği tespit edilmiştir.

Tejani ve ark. (2018), kafes sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu çözmek için yeni geliştirilen simbiyotik organizma arama SOS ve modifiye edilmiş versiyonu olan gelişmiş simbiyotik organizma arama ISOS algoritması yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için düzlem ve uzay yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve diğer birçok optimizasyon yönteminden daha güvenilir ve verimli olduğu tespit edilmiştir.

Jalili ve Talatahari (2018), frekans sınırlayıcılı kafes yapı optimizasyonu probleminde hibrid yüklü sistem araması CSS ve büyük patlama büyük çöküş MBLS adı verilen iki sezgisel optimizasyon yönteminin bir arada kullanıldığı hibrid bir yöntem CSS-MBLS öne sürmüşlerdir. Önerilen yöntemi test etmek için düzlem ve uzay yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve diğer yöntemlerden daha başarılı ve verimli olduğu tespit edilmiştir.

Jalili ve Hosseinzadeh (2019), frekans sınırlayıcılı kafes yapı optimizasyonu probleminde göç stratejisi (MS) ve farklı evrim stratejisi (DE) adı verilen iki sezgisel optimizasyon yönteminin bir arada kullanıldığı hibrid bir yöntem (MS-DE) öne sürmüşlerdir. Önerilen yöntemi test etmek için düzlem ve uzay yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve diğer yöntemlerden daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Kaveh ve Kooshkbaghi (2019), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonunu zenginleştirilmiş yapay koroner damar devridaim optimizasyonu (EACCS) adını verdikleri yöntem ile yapmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için kubbe yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış önerilen yöntemin en iyi değerleri elde ettiği ortaya konulmuştur.

Kaveh ve Mahjoubi (2019), kafes sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonunu spiral optimizasyon algoritması SPO'nun geliştirilmiş hali olan hipotrokoid spiral optimizasyonu (HSPO) adını verdikleri yöntem ile yapmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için kubbe yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım

örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış önerilen yöntemin en iyi değerleri elde ettiği ortaya konulmuştur.

Grzywiński ve ark. (2019), kafes sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında şekil ve enkesit optimizasyonunu çözmek için Jaya (JA) algoritmasını kullanmışlardır. Önerilen yöntemi test etmek için kubbe yapı örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları, literatürdeki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin kubbe yapıların optimizasyonu için en iyi yöntemlerden biri olduğu ispatlanmıştır.

Kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu konusunda yapılan çalışmalar Çizelge 2.1.'de ayrıca sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar

Yazarlar	Yayın Tarihi	Yöntem Adı	Yayınlanan Dergi Adı	Optimize Edilen Kafes Yapılar
Golizadeh ve ark.	2008	GA-NC	Journal of Sound and Vibration	10 ve 200 Elemanlı Düzlem
Gomes	2011	PSO	Expert Systems with Applications	10 ve 37 Elemanlı Düzlem, 52 ve 72 Elemanlı Uzay
Wei ve ark.	2011	NHPGA	Struct Multidisc Optim	10 ve 37 Elemanlı Düzlem, 52 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Zolghadr	2011	CSS-ENHANCED CSS	Asian Journal	10 ve 37 Elemanlı Düzlem, 52 ve 72 Elemanlı Uzay
Zuo ve ark.	2011	GA	Struct Multidisc Optim	10 ve 200 Elemanlı Düzlem, 72 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Zolghadr	2012	CSS-BBBC	Computers and Structures	10 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 72 ve 120 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Mahdavi	2013	QN-BBBC	Periodica Polytechnica	10 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52 ve 120 Elemanlı Uzay
Baghlani ve Makiabadi	2013	TLBO	IJST	10 ve 37 Elemanlı Düzlem, 52 ve 72 Elemanlı Uzay
Zuo ve ark.	2014	OC-GA	Applied Soft Computing	10 ve 200 Elemanlı Düzlem
Kaveh ve Zolghadr	2014	DPSO, PSO	Computers and Structures	10 ve 200 Elemanlı Düzlem, 72 ve 120 Elemanlı Uzay
Farschin ve ark.	2016	SBO, TLBO	Expert Systems with Applications	10, 37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 72 ve 120 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Ghazaan	2016	ECBO	Struct Multidisc Optim	120, 600, 1180 ve 1410 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Ghazaan	2017	VPS	Acta Mech	10 ve 37 Elemanlı Düzlem, 52, 72, 120 ve 600 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Ghazaan	2018	MDVC-UVPS	Engineering Optimization	120, 600, 1180 ve 1410 Elemanlı Uzay
Hoo-Huu ve ark.	2018	ReDE	Neural Comput& Applic	10 ve 37 Elemanlı Düzlem, 52, 72 ve 120 Elemanlı Uzay
Lieu ve ark.	2018	AHEFA	Computers and Structures	10, 37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 72 ve 120 Elemanlı Uzay

Çizelge 2.1. Kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar (devamı)

Tejani ve ark.	2018	ISOS	Knowledge-Based Systems	10, 37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 72 ve 120 Elemanlı Uzay
Jalili ve Talatahari	2018	CSS-MBLS	KSCE Journal of Civil Engineering	37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 120 ve 942 Elemanlı Uzay
Jalili ve Hosseinzadeh	2018	MS-DE	Iran J Sci Technol Trans Civ Eng	10, 37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 120 ve 942 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Koosshkbahhi	2019	EACCS	Periodica Polytechnica	10, 37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52, 72 ve 120 Elemanlı Uzay
Kaveh ve Mahjoubi	2019	HSPO	Engineering with Computers	10, 37 ve 200 Elemanlı Düzlem, 52 ve 72 Elemanlı Uzay
Grzywiski ve ark.	2019	JA	Steel and Composite Structures	52, 120 ve 600 Elemanlı Uzay

2.2. Çelik Çerçeve Yapıların Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar

McGee ve Phan (1992), uzay çelik çerçeve sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimumluk kriteri (OC) yöntemi ile optimum tasarımını yapmışlardır. Çalışmada uzay çelik çerçeve örnekleri kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırarak yöntemin etkinliğini tespit etmişlerdir.

Salajegheh (2000), uzay çelik çerçeve sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında Rayleigh yaklaşımı adını verdiği bir yöntemle optimum tasarımını yapmıştır. Optimizasyon sürecinde gerekli frekans analizi sayısını azaltmak için frekanslar her tasarım döngüsünde yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Frekans sınırlayıcılarına tabi tutulan yapıların optimum tasarımı için etkin bir yöntem sunmuştur. Çalışmada 3 uzay çerçeve örneği kullanılmıştır. Tasarım örneklerinin frekans değerleri elde edilmiştir ve bu değerleri literatürdeki sonuçlarla karşılaştırarak yöntemin etkinliğini ispatlamıştır.

Sedaghati (2005), düzlem- uzay kafes ve düzlem çelik çerçeve sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında SQP adını verdiği bir yöntemle optimum tasarımını yapmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırarak yöntemin etkinliğini ortaya konulmuştur.

Zakian (2019), düzlem ve uzay çelik çerçeve sistemlerin frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımını meta-sezgisel yöntemlerden PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO yöntemleri ile yapmıştır. Tasarım örneklerinin sonuçlarını sunmuştur.

Çelik çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarım konusunda yapılan çalışmalar çizelge 2.2.'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Literatürde çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu ile ilgili yapılmış olan çalışmalar

Yazarlar	Yayın Tarihi	Yöntem Adı	Yayınlanan Dergi Adı	Optimize Edilen Çerçeve Yapılar
McGee ve Phan	1992	OC	Structural Optimization	8, 180 ve 805 Elemanlı Uzay
Salajagheh	2000	Rayleigh Yaklaşımı	Journal of Constructional Steel Research	8 ve 180 Elemanlı Uzay
Sedaghati	2005	SQP	Solids and Structures	6 Elemanlı Düzlem
Zakian	2019	PSO, CSS, TLBO, GWO, IGWO	Advances in Engineering Software	6, 21 ve 70 Elemanlı Düzlem, 8, 180 ve 805 Elemanlı Uzay

2.3. Jaya Algoritması (JA) Kullanılarak Yapıların Optimum Tasarımı Konusunda Yapılan Çalışmalar

Degertekin ve ark. (2018) kafes yapıların enkesit, şekil ve topoloji optimizasyonunda JA'yı kullanmışlardır. Çalışmada standart JA formülasyonu, hesaplama süresini kısaltmak için modifiye edilmiştir. JA'nın kafes yapılarının optimizasyonu için uygunluğunun araştırılmasına yönelik altı adet kafes yapı örneği kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda JA'nın optimum ağırlık, standart sapma ve talep edilen yapı analiz sayısı açısından diğer sezgisel optimizasyon yöntemlerinden daha iyi tasarımlar elde edebildiğini saptamışlardır.

Dede (2018) JA'yı çelik ızgara yapılarının optimum tasarımında kullanmıştır. Çalışmada; dayanım, yerdeğiştirme sınırlayıcıları altında minimum ağırlıklı ızgara yapıların elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçları kıyaslamak için daha önce farklı yöntemlerle optimize edilmiş ızgara yapılar kullanılmıştır. Sonuç olarak, sunulan yöntemin ızgara yapıların optimum tasarımında etkin bir şekilde kullanılabileceğini belirlenmiştir.

Degertekin ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların enkesit, şekil ve topoloji optimizasyonu için gelişmiş JA (DAJA) yöntemini sunmuşlardır. Yöntem yedi adet kafes yapı üzerinde farklı optimizasyon yöntemleriyle

kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar DAJA'nın hemen hemen tüm örneklerde daha hafif sonuçları daha kısa hesaplama süresinde bulabildiğini göstermiştir.

Grzywinski ve ark. (2019) doğal frekans sınırlayıcıları altında kubbe kafes yapıların enkesit ve şekil optimizasyonu için JA yöntemini sunmuşlardır. JA algoritmasının etkinliğini göstermek için daha önce farklı sezgisel optimizasyon yöntemleriyle optimize edilmiş üç kubbe kafes yapı seçilmiş ve yöntemin geçerliliği gösterilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Optimizasyon Nedir

Optimizasyon, bir sistemin belirli sınırlayıcılar gözönüne alınarak en ekonomik halde olması için uygulanması gereken, işlem ve metotların tümüdür. Kısaca, bir problemi en uygun şekilde çözmek veya bir sistemi mümkün olan en iyi duruma getirme işlemidir. Optimizasyon denince karar vermede matematiksel yöntemlerin kullanılması anlaşılmaktadır. Bu matematiksel yöntemlere literatürde sayısal optimizasyon veya matematiksel programlama metotları denmektedir. Etkili bir karar verme için tasarım problemlerinin uygun bir matematiksel formatta ifade edilmesi gerekmektedir. Bir tasarım problemini optimizasyon yöntemiyle etkili bir şekilde çözmek için aşağıdaki faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir:

• Alternatif kararlar nelerdir?

• Karar hangi sınırlayıcılar altında verilmiştir?

• Bu alternatifleri değerlendirmede kullanılacak uygun bir amaç fonksiyonu nasıl olmalıdır?

Bu soruların cevaplarını bulabilmek için ise

• Tasarım değişkenlerini,

• Amaç fonksiyonlarını,

• Tasarım sınırlayıcılarını, tanımlamak gerekmektedir.

İlk olarak sistemi tanımlamak için, tasarım değişkenleri olarak isimlendirilen bir değişken seti belirlenir. Daha sonra, bu değişkenlere tahmini sayısal değerler atanarak sistem oluşturulur. Tasarım değişkenleri, hakkında alınacak kararları temsil eden değişkenlerdir. Tasarım değişkenleri genellikle x, y gibi sembolik olarak tanımlanır. Tasarım değişkenleri, sürekli ve ayrık olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonu, minimum veya maksimum şekilde tasarım değişkenlerine bağlı olarak hesaplanan fonksiyonlardır.

Sınırlayıcıların, tasarımın hangi sınırlar arasında alınması gerektiğini gösterir. Mühendislik problemlerinin hemen hepsinde sınırlayıcılar mevcuttur. Burada amaç, sınırlayıcıları olan bir tasarımı en uygun (ekonomik) biçimde elde etmektedir.

Sınırlayıcılı bir optimizasyon probleminin optimizasyon yöntemleriyle çözülebilmesi için genellikle aşağıdaki şekilde matematiksel olarak formüle edilir:

Amaç fonksiyonu : Maksimum veya minimum $f(x)$

Sınırlayıcılar : $g_i(x) \leq 0 \; ; \; i=1,...,m$

$h_j(x) = 0 \; ; \; j=1,...,l$

Burada $f(x)$ amaç fonksiyonu, $g_i(x)$ eşitsizlik sınırlayıcısı, $h_j(x)$ ise eşitlik sınırlandırcısıdır. $x = (x_1, x_2,...,x_n)$, n gerçek değişkenli tasarım değişkeninin sayısıdır. Bütün sistemler; malzeme dayanımı, sistemin tepkisi, sistem elemanlarının boyutları vb. bazı tasarım sınırlayıcılarını sağlayacak şekilde tasarlanırlar. Bu sınırlayıcılar tasarım (tasarım) değişkenlerine bağımlı olarak tanımlanır. Eğer bir tasarım tüm sınırlamaları sağlıyorsa, sistem uygun veya yapılabilirdir. Eğer belirtilen sınırlamaları sağlamıyorsa sistem uygun değil veya yapılabilir değil olarak isimlendirilir. Bulunan uygun tasarımlar arasında en uygununu bulmak gerekir. Bir tasarımın bir başka tasarımdan daha iyi olup olmadığını tespit etmek için bir kritere ihtiyaç vardır. İşte bu kritere amaç fonksiyonu denir. Amaç fonksiyonu tasarım değişkenlerine bağlı olarak tanımlanır. Optimizasyonda sınırlayıcıları sağlayan çözümler arasında amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize eden çözüm optimum çözüm olarak bulunur.

3.2. Mühendislikte Optimizasyonun Yeri

Optimizasyon, mühendisliğin en temel gerekliliklerinin belki de en başında gelir. Mühendisler, bir yapının veya bir sistemin çeşitli yönlerden daha az maliyetle daha verimli çalışmasından veya sistemi minimum maliyet ve maksimum verimlilikte dizayn edilmesinden sorumludurlar. Mühendislik kapsamında optimum tasarım, fiziksel modellerin matematiksel problemler olarak ifadesinde en iyi çözümü belirleme işlemi olarak tanımlanır. Optimizasyon için kullanılan ve kullanılabilecek tekniklerin çeşitli problemler için çözüm algoritmalarının oluşturulması, bu tekniklerin yapısal olarak irdelenmesi ve bilgisayar ortamında derlenmesi yer almaktadır. Mühendislik optimizasyonunda karşılaşılan yaygın problemler; yapıların statik ve dinamik davranışlarına göre optimum boyutlandırılması, mekanik ve yapısal sistemlerin optimum şekil ve geometrik tasarımı olarak sıralanabilir. Yapısal optimizasyon 1960'lı yıllardan günümüze kadar gelişmekte olan bir araştırma konusudur. Bilgisayar kullanımının ve

teknolojisinin gelişip etkinleşmesinin yanı sıra çok yeni optimizasyon tekniklerinin de kullanılmaya başlanması, teoriden uygulamaya geçişi kolaylaştırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Herhangi bir optimum tasarım probleminde üç temel kavramın tanımlanması gerekmektedir. Bunlar amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılardır. Amaç fonksiyonu problemin tipine ve ihtiyaçlara göre tanımlanır ve tasarım değişkenlerinin fonksiyonudur. Tasarım değişkenleri, optimum çözüme ulaşmak için optimizasyon işlemi boyunca değiştirilen sistem parametreleridir. Sınırlayıcılar ise tasarım ve optimizasyon probleminde yapılabilir olmayan çözümleri elemek için kullanılırlar. Optimizasyon probleminde en iyi sonuca en kısa zamanda ulaşabilmek açısından, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların belirlenmesi ve tasarım değişkenlerinin seçimi son derece önemlidir.

Çelik yapılarda genellikle tasarım değişkenleri; enkesitler, açıklıklar ve malzemeler olabilir. Ayrıca tasarım değişkenler sürekli ve süreksiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Eğer tasarım değişkenlerine belli bir aralıktaki her değer atanabiliyorsa sürekli tasarım değişkeni olarak kabul edilir. Ancak mevcut bir listede hazır olan değerler kullanılıyorsa bu durumda ayrık tasarım değişkenleri ayrık olarak kabul edilir. Genellikle çelik yapı tasarımında hazır çelik profil listelerindeki enkesitler kullanıldığından çelik yapıların optimum tasarımı ayrık tasarım değişkenli bir optimizasyon problemi olmaktadır. Optimum tasarım süresince üretilmesi mümkün olan olası tasarımların hepsi tasarım uzayını oluşturmaktadır.

3.3. Yapı Mühendisliğinde Optimizasyon

Yapı mühendisliğinde optimum tasarım adımları aşağıda verilmiştir:

i. Amaç fonksiyonunun belirlenmesi

ii. İhtiyaçların belirlenmesi.

iii. Ön tasarımın rastgele oluşturulması ve yapı analizinin gerçekleştirilmesi

iv. Optimum tasarımın elde edilmesi

v. Yapının sınırlayıcılarının kontrolü ve ceza fonksiyonları sonuçlarının incelenmesi.

Optimum tasarımda birinci adımda amaç fonksiyonu kesin olarak ortaya konmalıdır. Yapı mühendisliğinde yapı ağırlığının minimize edilmesi en yaygın kullanılan amaç fonksiyonudur. İhtiyaçlar, tasarımı yapılacak olan yapının talep edilecek amaçları sağlayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Optimum tasarımın ikinci aşamasında kullanım ihtiyaçlarına göre yapıda kullanılacak malzeme türü ve özellikleri belirlenir. Taşıyıcı elemanların ön boyutlandırılması rastgele olarak üretilir. Tasarlanan yapının yüklemeleri yapının kullanım amacına uygun olarak belirlenir. Yüklemeler yapıldıktan sonra tasarım analiz edilir. Elde edilen sonuçların yönetmeliklerde belirlenen veya tasarımcı tarafından konulan sınırlayıcıları sağlayıp sağlanmadığı kontrol edilir. Tasarımın sonuçlarının sınır değerleri aşması durumunda optimizasyona tabi tutulan değişkenler değiştirilerek yeniden analiz edilir. Bu işlemler en uygun tasarım bulunana kadar tekrarlanır. Elde edilen amaç fonksiyonları içerisinde en uygun değerler optimum değer ve bu sonuca götüren tasarım değişkenleri takımına optimum tasarım değişkenleri grubu adı verilmektedir. Bu tasarım gruplarının oluşturduğu yapıya optimum tasarım denir. Yapı mühendisliğinde amaç fonksiyonu minimum ağırlıklı yapı tasarımının elde edilmesidir. Tasarım sınırlayıcıları olarak ise enkesit-boyut, gerilme, dayanım, deplasman katlar arası göreli ötelenme oranı ve doğal titreşim değerleri gözönüne alınabilir.

3.4. Yapısal Optimizasyonda Temel Kavramlar

Genel olarak yapısal optimizasyon problemi, enkesit, şekil ve topoloji optimizasyonu olmak üzere üç başlıkta incelenebilmektedir. Literatürdeki ilk uygulamalar kolay olduğu için enkesit optimizasyonu konusundadır. Bilgisayar işlemci teknolojisinin gelişmesi ve güçlü programlama dillerinin ortaya çıkmasıyla beraber şekil ve topoloji optimizasyonu konusundaki çalışmalar da hız kazanmıştır.

Yapısal optimizasyon belirli tasarım sınırlayıcıları altında optimum tasarım probleminde tanımlanan amaç fonksiyonunun en iyi (en ekonomik) değerini bulmak amaçlanmaktadır.

1. Enkesit Optimizasyonu

Konfigürasyonu önceden tanımlanmış bir yapı üzerinde uygulanmaktadır. Örneğin, çelik yapılarda enkesit optimizasyonunda ilgili yönetmeliklerde verilen

dayanım ve deplasman sınırlayıcılarını sağlayan tasarımlar arasında en hafif çelik profillerden oluşan tasarımı bulunur.

2. Şekil Optimizasyonu

Şekil optimizasyonu yapının dış sınırlarını ve düğüm noktalarının geometrisini yani şeklini değiştirmektedir. Yüzeyler üzerinde ve eğri hatlar üzerinde tanımlanabildiğinden boyut optimizasyonunun kapasitesinin genişletilmiş halidir. Bununla birlikte, boyut optimizasyonu gibi konfigürasyonu önceden belirlenmiş yapıları esas almaktadır.

3. Topoloji Optimizasyonu

Bir yapının topolojisi düğüm noktalarının sayısı, çubukların bağlantıları ve kirişlerin sayısı ile tanımlanmaktadır. Topoloji optimizasyonunda eleman düğüm noktalarının koordinatları değişirken aynı zamanda bazı elemanlarda sistemden çıkartılabilmektedir.

3.5. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri klasik ve sezgisel olmak üzere ikiye ayrılır. Klasik optimizasyon yöntemlerinde türev, gradyan, kısmi türev vb. matematiksel operatörleri kullanarak optimum çözümün bulunması amaçlanmaktadır. Sezgisel optimizasyon doğal olaylar veya doğada yaşayan canlıların davranışlarıyla optimizasyon problemleri arasında analoji kurarak optimum çözüme ulaşmayı hedefleyen yöntemlerdir.

Doğadaki olayları taklit eden sezgisel optimizasyon yöntemleri 40 yılı aşkın süredir klasik optimizasyon yöntemlerine alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başlıcaları arasında genetik algoritma (Genetic Algorithm, GA), tavlama benzeşimi (Simulated Annealing, SA), parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO), armoni arama metodu (Harmony Search, HS), yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC), öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization, TLBO), Jaya algoritması (Jaya, JA) sayılabilir.

Genetik algoritma (GA) ilk kez Holland (1975) tarafından öne sürülmüştür. GA en iyinin hayatta kalması ve adaptasyonu esasına dayanır. Tavlama benzeşimi Kirkpatrice (1983) tarafından geliştirilmiştir. Yöntemin esası metal atomlarının serbestçe birinden

diğerine hareket edebilecek düzeye kadar ısıtılıp daha sonra bu ısısal serbestliğin kaybolunca kadar soğutulması işlemiyle optimizasyon problemleri arasında benzerlik kurmaya dayanır. Parçacık sürü optimizasyonu PSO (Eberhart ve Kennedy 1995), hayvan sürüleri veya yaşam kolonilerinin yiyecek bulmak için kullandıkları stratejilerden sürünün esinlenerek geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Karınca koloni optimizasyonu ACO (Dorigo 2004). Yuvalarından yiyecek kaynağına en kısa yolu bulabilen gerçek karınca kolonilerinin davranışlarını temel alır. Armoni arama HS (Geem 2001). Müzisyenlerin daha iyi bir armoni bulmak için kullandıkları stratejileri taklit eder. Yapay arı koloni algoritması ABC (Karaboğa 2007). Arıların en iyi nektarı bulmak için kullandıkları taktiklerden esinlenerek geliştirilen bir yöntemdir. Öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon yöntemi TLBO (Rao ve ark. 2011); herhangi bir sınıftaki öğretmen ve öğrenci ilişkisi ve öğrencilerin birbirleriyle etkileşimleri ile optimizasyon problemleri arasında benzerlik kurmaktadır.

Burada adı geçen sezgisel optimizasyon yöntemleri dışında çok sayıda yöntem geliştirilmiş olup literatürde mevcuttur.

3.6. Jaya Algoritması

JA yönteminde popülasyon sayısı (ps) ve maksimum döngü sayısı (itmax) gibi genel kontrol parametreleri kullanılmaktadır. Yöntem aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

i: *JA algoritmasının başlatılması:* Optimizasyondaki popülasyonu oluşturan rastgele çözümlerin üretilmesi. Popülasyon sayısı (*ps),* maksimum iterasyon sayısının (it_{max}) atanması. İterasyon sayıcını *(it)* başlat it=0.

ii: İterasyon sayıcını arttır, $it=it+1$.

iii: Optimizasyon probleminin özelliğine bağlı olarak popülasyondaki en iyi ve en kötü çözümleri tespit et. En iyi ve en kötü çözümler vasıtasıyla ve JA'ya özgü formülasyon kullanarak yeni çözüm üret.

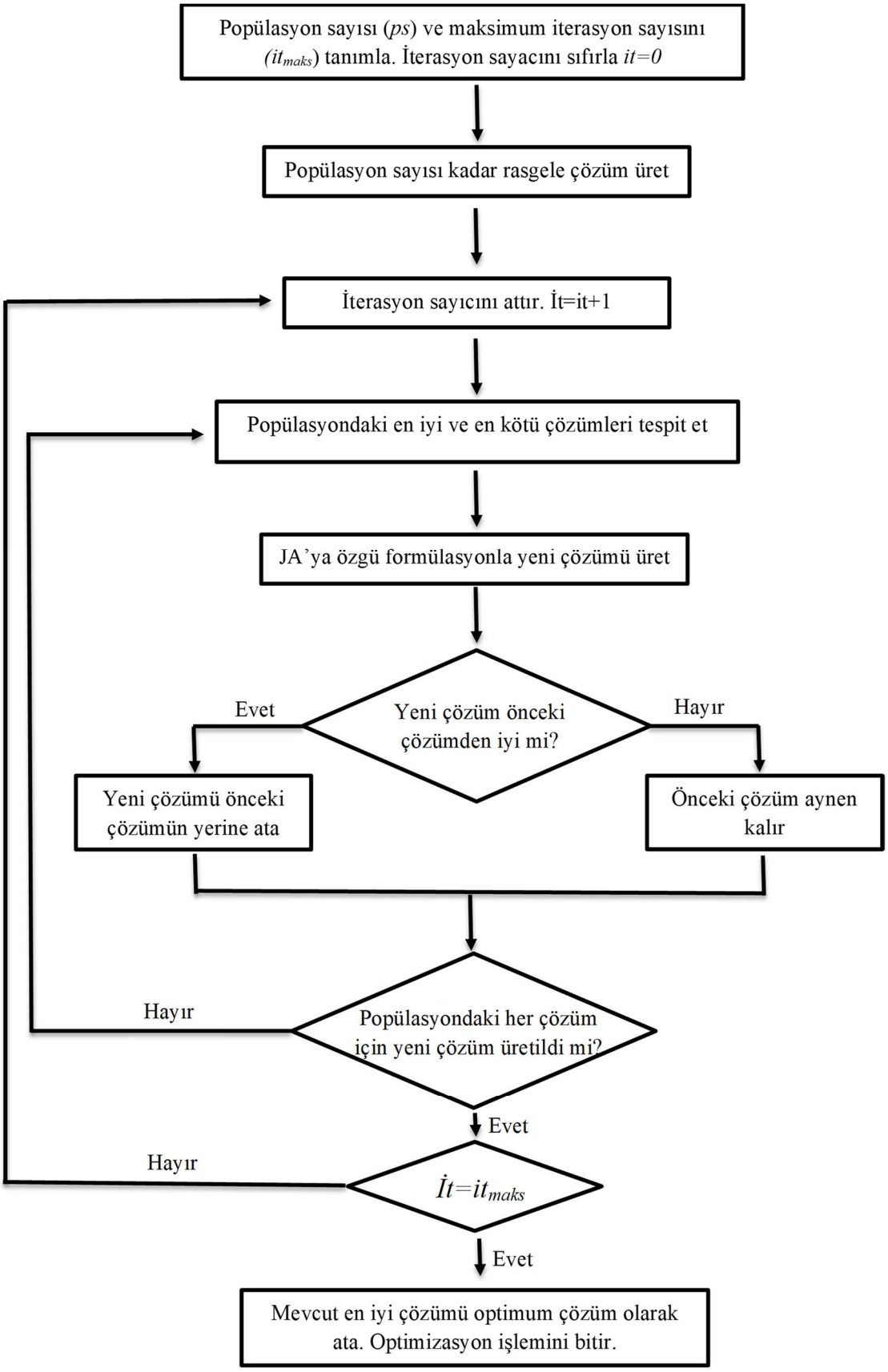
iv: Yeni çözümü önceki çözümle kıyasla. Eğer yeni çözüm önceki çözümden daha iyi ise önceki çözümün yerine ata. Aksi halde önceki çözümü olduğu gibi bırak.

v: Popülasyondaki her çözüm için *iii* ve *iv.* adımları tekrarla.

vi: Eğer $it = it_{max}$, ise *vii.* adıma git, aksi halde *ii.* adıma git.

vii: En iyi çözümü optimum çözüm olarak tanımla ve optimizasyon işlemini bitir.

Yukarıda adım adım açıklanan JA algoritmasının Şekil 3.1.'de akış diyagramı olarak verilmiştir.



Şekil 3.1. Standart JA algoritması için akış diyagramı

3.7. Doğal Titreşim Hesabıyla İlgili Temel Kavramlar

3.7.1. Frekans (*f*), Doğal Frekans ve Açısal Frekans (ω)

Birim zamandaki (1 saniyedeki) salınım sayısına frekans (*f*) denir. Birimi 1/s veya Hertzdir (Hz). Bir salınım hareketinin tamamlanması için geçen süre olan periyodun (*T*) tersi olarak ifade edilir.

$$f = \frac{1}{T} \tag{3.1}$$

Her yapı sistemi doğal frekans adı verilen, kendi kütle ve rijitliğine bağlı olan belirli bir frekansla titreşir. Yapının bu titreşimine "serbest titreşim" denir. Her yapının serbestlik derecesi kadar doğal frekansı vardır. Buna göre, tek serbestlik dereceli olarak kabul edilen bir yapının tek bir doğal frekansı varken, çubuk gibi yayılı kütleye ve sonsuz sayıda serbestliğe sahip yapıların sonsuz sayıda doğal frekansı vardır. Ancak, basit uygulamalar için bu doğal frekansların ilk birkaç tanesi önem taşır.

Basit cisimlerin doğal frekans ve şekillerini analitik olarak hesaplamak mümkündür. Ancak karmaşık şekillerin hesabı nümerik yöntemlerle mümkündür. Sonlu elemanlar yöntemi ve bilgisayar işlemci kapasitelerindeki gelişmeler, idealleştirme yapılarak hesaplanabilen karmaşık yapıların, doğal frekans ve şekillerini daha doğru hesaplanabilmesine imkân tanımıştır.

Periyodik harekette birim zaman içinde kaç radyan olduğunun ölçüsüne açısal frekans (ω) denir. Birimi rad/s ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{3.2}$$

Bu denklemde : *K* yapı sisteminin rijitliğini ve *M* ise yapının kütlesini gösterir.

3.7.2. Periyot (*T*) ve Doğal Periyot (T_n)

Titreşim hareketinin bir tam salınımını tamamlaması periyot *(T)* olarak tanımlanır ve aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır. Birimi saniyedir.

$$T_i = \frac{1}{f_i} = \frac{2\pi}{\omega_i} \tag{3.3}$$

Sönümsüz sistemin bir titreşim döngüsünün tamamlaması için gereken süreye sistemin doğal titreşim periyodu (T_n) denir. Burada T_n ile gösterilen bu periyodun birimi saniyedir. Periyot: rijitlikle ters, kütle ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile frekans rijitlikle doğru, kütle ile ters orantılıdır.

3.7.3. Modal Analiz

Titreşen bir sistemin dinamik davranışını gösteren matematik modeli oluşturmak için ihtiyaç duyulan parametrelerin (doğal frekans, titreşim biçimi, iç sönüm gibi) belirlenmesi için gerekli analizler modal analiz olarak adlandırılır.

Titreşim hareketi sırasında enerji kaybına neden olan malzeme özelliğine sönüm denir. Sönüm, sistemin doğal frekansı üzerinde de etkilidir. Küçük sönüm değerleri için, "sönümlü doğal frekans" "doğal frekansa" eşit kabul edilebilir. Dinamik bir kuvvet (zamanla değişen kuvvet) etkisinde zorlanmış titreşimler yapan bir yapının doğal frekansı ile zorlamanın frekansının eşit olması durumu "rezonans" olarak adlandırılır. Bu durumda yapının titreşim genliği artma eğilimine girer. Bu genlik artışı sistemin düzgün çalışmasını engellediği için hasara neden olur. Bir yapının doğal frekansında titreşirken aldığı şekle mod şekli veya titreşim biçmi denir.

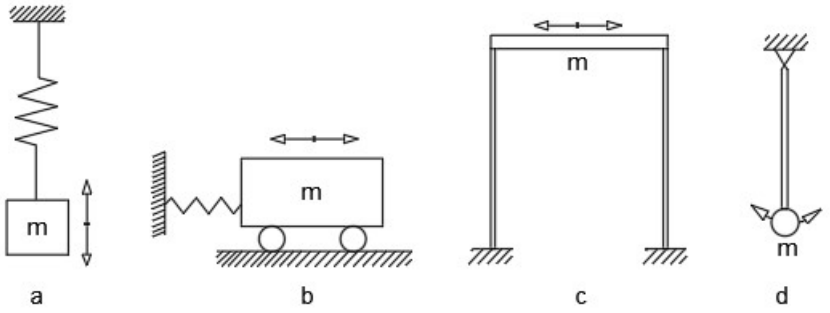
3.7.4. Serbestlik Derecesi

Bir çerçeve sisteminde kiriş ile kolonun birleşim noktası ve kolonların temele bağlandığı noktalar düğüm noktası olarak ele alınır. Belirlenmiş düğüm noktalarındaki tutulmamış deplasmanların toplam sayısına serbestlik derecesi denir.

3.8. Titreşen Sistemler

Titreşim; denge konumundan ayrılan bir cismin veya bağlı cisimler sisteminin periyodik bir hareketidir. Genellikle, serbest ve zorlanmış olmak üzere iki tip titreşim vardır. Serbest titreşim, bir sarkacın salınım hareketi veya elastik bir çubuğun titreşimi gibi, hareket yerçekimi veya elastik geri getirici kuvvetler tarafından sürdürüldüğü zaman oluşur. Zorlanmış titreşime sisteme uygulanan periyodik veya kesikli dış kuvvetler neden olur. Her iki tip titreşim sönümlü veya sönümsüz olabilir. Sönümsüz titreşimler, analizde sürtünme etkileri ihmal edildiğinden, süresiz olarak devam edebilir (Hibbeler 2004).

Kütleleri sonlu sayıdaki noktalarda yoğunlaşmış olarak ele alınabilen sistemler ayrık sistemler olarak tanımlanmaktadır. Sürekli sistemlerde ise kütle tüm sisteme dağılmıştır. Bir sistemin kütlelerinin pozisyonunu tanımlamak için gerekli bağımsız değişkenlerin sayısı, sistemin dinamik serbestlik derecesinin sayısıdır. (Erdik ve Yüzügüllü 1980)



Şekil 3.2. Farklı tek serbestlik dereceli sistemler (a-c). Tek serbestlik dereceli sistem doğrusal yer değiştirme, (d). Tek serbestlik dereceli sistem dönmeli yer değiştirme

Konumu bir değişken ile tam anlamıyla tanımlanabilen ayrık sistemler tek serbestlik dereceli (TSD) sistem olarak adlandırılmaktadır. Tipik tek serbestlik dereceli sistemler Şekil 3.2'de gösterilmiştir. TSD sistem rijit bir kütle *m*, rijitlik yayı *k* ve viskoz sönümleme katsayılı sönümleyiciden *c* oluşur. Kütle; yaya ve sönümleyiciye paralel bağlanmıştır ve *p(t)* dış yüküne maruz kalmıştır. Yay ve sönümleyicinin kütlesiz olduğu ve yer değiştirme orjininin, statik denge pozisyonu ile aynı olduğu varsayılır (Erdik ve Yüzügüllü 1980) (Umudum 2014).

1. Sönümsüz serbest titreşimler: $c = 0$ $p(t) = 0$ (Dış zorlama yok, sönüm yok)

Sönümsüz titreşimin hareketin nedeni kalktığı andan itibaren devam eden kısmıdır.

2. Sönümlü serbest titreşimler: $c > 0$ $p(t) = 0$ (Dış zorlama yok, sönüm var)

Başlamış bir titreşimin, sebep ortadan kalktığı hâlde, pratik olarak sönümleyinceye kadar sürmesi gereken hareketidir.

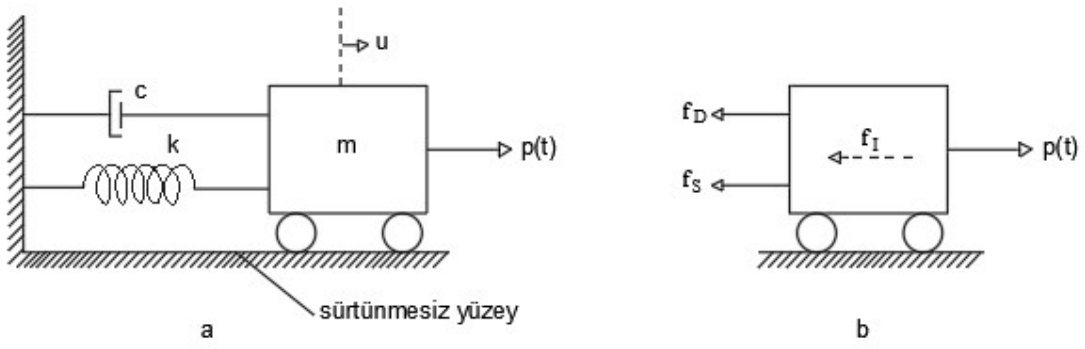
3. Sönümsüz zorlanmış titreşimler: $c = 0$ $p(t) \neq 0$ (Dış zorlama var, sönüm yok)

Yapıların dinamik özelliklerinin hesabında, sönümün ihmâli, sonucu pratik olarak pek etkilemez; bu yüzden, bu gibi durumlarda basitlik sağlamak amacıyla sönüm terimleri terk edilir; gerçekte doğada bulunmadığı hâlde sönümsüz sistemler böylece söz konusu olur.

4. Sönümlü zorlanmış titreşimler: $c > 0$ $p(t) \neq 0$ (Dış zorlama var, sönüm var)

Titreşim probleminde en genel durumdur. (Polat 2009)

Tek serbestlik dereceli sistemlerin çoğu dışarıdan uygulanan yüklerin etkisi altındadır. Şekil 3.3'teki gibi bir tek serbestlik dereceli sistemin dinamik tepkisi bir hareket denklemi tarafından kontrol edilir. Hareket denklemi çok değişik şekillerde elde edilebilir. Burada; basit, kuvvet denge yaklaşımı kullanılmaktadır (Erdik ve Yüzügüllü 1980) (Umudum 2014).



Şekil 3.3. Dış dinamik yük p(t)'ye maruz kalan sönümlü TSD sistem (a). Sistem şekli, (b). Yükleme sonrası gelişen kuvvetler

Şekil 3.3.a.'daki gibi tek serbestlik dereceli sistemin kütlesine dinamik yükleme yapıldığı zaman hareket etme eğilimi kütlenin ataleti ile yay ve sönümleyici içinde gelişen kuvvetler tarafından kısıtlanır. Bu nedenle, pozitif yönünde etkiyen *p(t)* dış kuvvetine negatif *x* yönünde karşı koyan üç kuvvet vardır: f_I atalet kuvveti, f_D viskoz sönümleme kuvveti ve elastik yay kuvveti f_S (Şekil 3.3.b.). Hareket denklemi, bu kuvvetlerin dinamik dengesi cinsinden ifade edilebilirler (Erdik ve Yüzügüllü 1980):

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \qquad \textbf{(3.4)}$$

Bu kuvvetler kütlenin hareketi cinsinden de ifade edilebilir. Newton'un ikinci yasasına göre, bir kütle üzerine etkiyen atalet kuvveti o kütlenin momentum değişim

hızına eşittir. Kütlesi sabit olan sistemde şu şekilde ifade edilebilir(Erdik ve Yüzügüllü 1980):

$$f_I(t) = \frac{d}{dt}\left(m\ \frac{du(t)}{dt}\right) = m\frac{d^2\,u(t)}{dt^2} = m\ \ddot{u}(t) \quad \textbf{(3.5)}$$

burada *t*: zamanı, *u*: yerdeğiştirmeyi ve *ü*: ivmeyi ifade etmektedir.

Viskoz bir sönümleyici için ise sönümleme kuvveti kütlenin hızı ile orantılıdır:

$$f_D(t) = c\ \frac{du(t)}{dt} = c\dot{u}(t) \quad \textbf{(3.6)}$$

Yay ile sağlanan kuvvet de, yay rijitliği ile yer değiştirme miktarının çarpımına eşittir:

$$f_S\ (t) = k\ u(t) \quad \textbf{(3.7)}$$

(3.5), (3.6) ve (3.7) eşitliklerini (3.4)'te yerlerine koyarak, tek serbestlik dereceli sistem için hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$m\ \ddot{u}(t) + c\ \dot{u}(t) + k\ u(t) = p(t) \quad \textbf{(3.8)}$$

3.8.1. Sönümsüz Serbest Titreşimler

Tek serbestlik dereceli sistem dış yükler etkisi altında salınmadığı zaman serbest titreşime maruz kalır. Sönümleme olmadığı (c=0) zaman hareket denklemi (sönümsüz serbest titreşim için) aşağıdaki gibi olur (Erdik ve Yüzügüllü 1980):

$$m\ \ddot{u} + k\ u = 0 \quad \textbf{(3.9)}$$

$$\ddot{u} + \frac{k}{m}\ u = 0 \quad \textbf{(3.10)}$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü şu şekildedir:

$$u = C_1 \sin\sqrt{\frac{k}{m}t}\ + C_2 \cos\sqrt{\frac{k}{m}t} \quad \textbf{(3.11)}$$

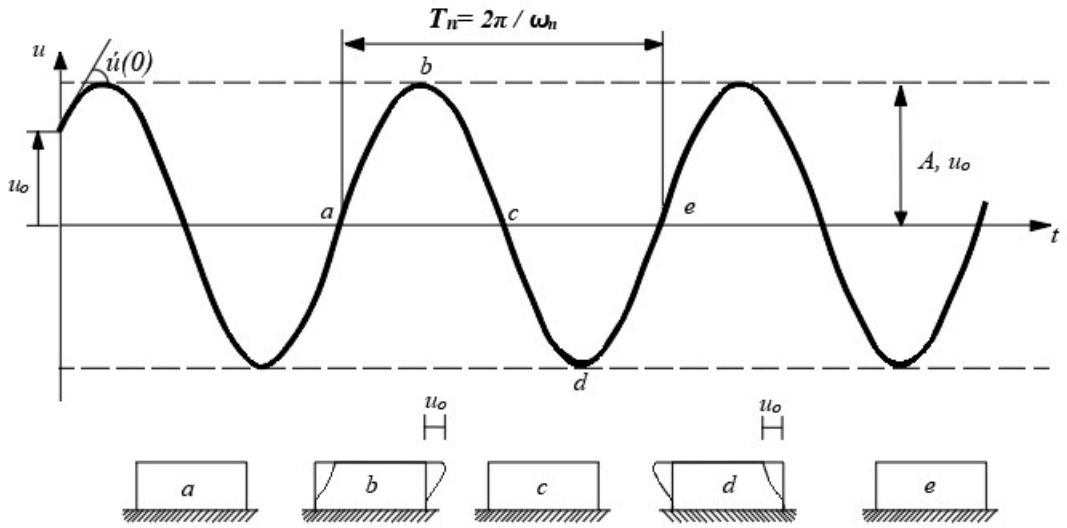
burada C_1ve C_2 sabitlerinin değeri, sistemin başlangıç şartlarına bağlıdır. $\sqrt{k/m}$ ise sistemin sönümsüz açısal doğal frekansını göstermektedi (Erdik ve Yüzügüllü 1980)r:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \textbf{(3.12)}$$

Doğal frekans f_n ve T_n doğal periyot aşağıdaki gibi yazılabilir (Erdik ve Yüzügüllü 1980):

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \textbf{(3.13)}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \textbf{(3.14)}$$



Şekil 3.4. Sönümsüz serbest titreşim yer değiştirmesinin zamana bağlı değişimi (a). statik denge, (b). + işaretli en büyük yer değişim değeri (u_0), (c). statik denge, - işaretli en büyük yer değişim değeri ($-u_0$), (e). statik denge

Şekil 3.4.'te sönümsüz serbest titreşen bir sistem titreşim hareketi gösterilmektedir. Burada u_0 genliği, $u(0)$ başlangıç genliğini ifade etmektedir. Bu sistemlerde enerji kaybı olmadığından (Genlik zaman içinde sabit kalır.) sonsuza dek salınır.

3.8.2. Sönümlü Serbest Titreşimler

Titreşen sistemlerde enerjinin kaybolması sürtünme, ısı oluşumu, hava direnci veya diğer fiziksel mekanizmalardan ileri gelebilir. Bu nedenle, sönümlü tek serbestlik dereceli sistemin serbest titreşim tepkisi zamanla azalacaktır. Sönümlü serbest titreşimler için hareket denklemi aşağıdaki gibidir (Erdik ve Yüzügüllü 1980):

$$m\,\ddot{u} + c\,\dot{u} + k\,u = 0 \quad \textbf{(3.15)}$$

bu denklemin her iki tarafı m ile bölünüp k yerine $m\,\omega_n^2$ yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\ddot{u} + 2\,\frac{c}{2\sqrt{k\,m}}\;\omega_n\dot{u} + \;\omega_n^2\,u = 0 \qquad \textbf{(3.16)}$$

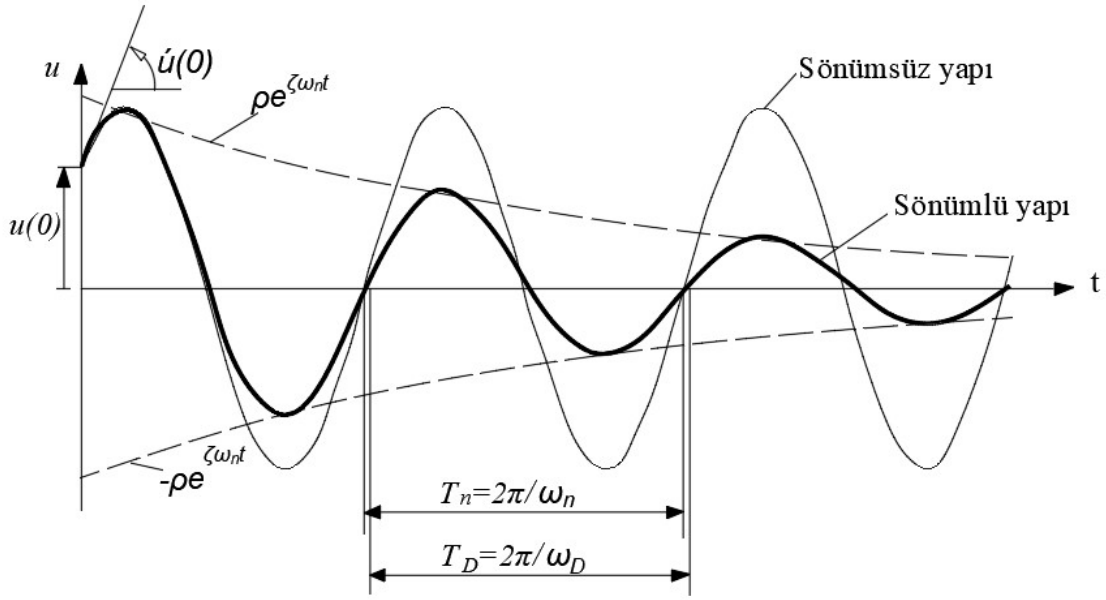
burada $2\sqrt{k\,m}$ kritik sönümleme katsayısı olup c_{cr} ile gösterilir. Sönümleme katsayısının c kritik sönümleme katsayısına c_{cr} oranı olarak tanımlanan sönümleme oranı ξ ise şu şekilde elde edilir:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{k\,m}} = \frac{c}{2m\,\omega_n} = \frac{c\,\omega_n}{2k} \qquad \textbf{(3.17)}$$

Sönümleme oranı cinsinden hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\ddot{u} + 2\,\xi\,\omega_n\dot{u} + \;\omega_n^2\,u = 0 \qquad \textbf{(3.18)}$$

Sönümlü titreşim hareketi Şekil 3.5.'te gösterildiği gibidir.

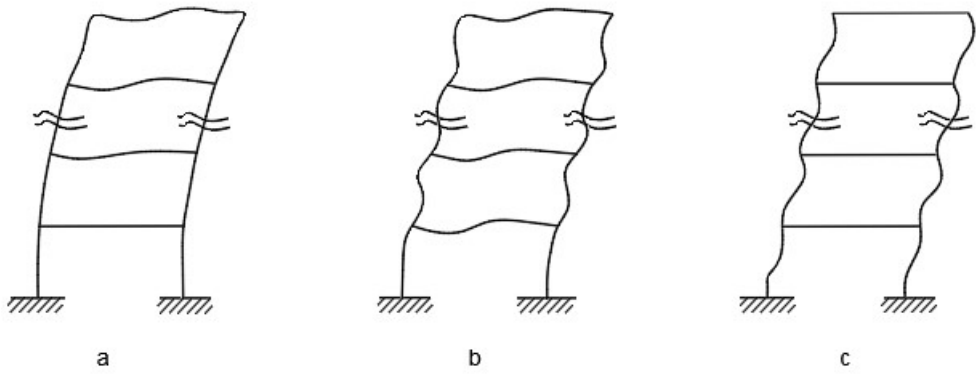


Şekil 3.5. Sönümlü titreşim

Yapısal sistemlerde kütle ve rijitlik, genelde bütün yapı üzerine dağılmış olarak bulunur. Bu sistemlerin dinamik hareketlerini belirlemek için sonsuz sayıda koordinata bir başka deyişle sonsuz sayıda serbestlik derecesine ihtiyaç vardır. Sürekli sistemler

olarak adlandırılan bu sistemlerin analitik çözümleri mevcut olmakla beraber çözümlerin karmaşık sistemlere uygulanması oldukça zordur. Bu sebeple sürekli sistemler, kütlelerin belirli noktalarda toplanmasıyla idealleştirilerek çok serbestlik dereceli sistem olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşımın başarısı, kütle ve rijitlik dağılımı ile yapıya etkiyen dış kuvvetin yani yer hareketinin zamanla değişimi ile de yakından ilgilidir. Yapıdaki fiziksel zorlamalar ve yer hareketinin nitelikleri yapı sisteminin ancak belirli şekillerde davranışına izin veriyorsa, sistemin çok serbestlik dereceli sistem olarak modellendirilmesi, yapı davranışını iyi bir yaklaşıklık ile temsil edebilir (Erdik ve Yüzügüllü 1980).

Mühendislik yapılarının büyük bir çoğunluğunu kapsayan yapı sistemleri birbirlerine kütleleri ihmal edilebilen yay ve söndürücü elemanlarla (kolonlar) bağlı toplanmış kütleler (kat kütleleri) düzeni şeklinde çok serbestlik dereceli olarak modellendirilebilirler (Erdik ve Yüzügüllü 1980).

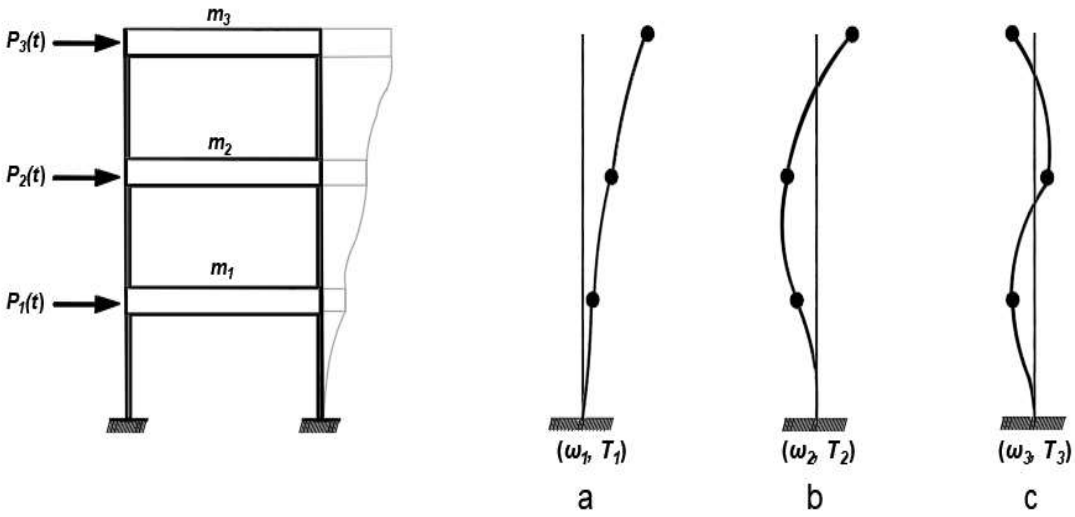


Şekil 3.6. Çok serbestlik dereceli yapı modelleri

Belirli yaklaşıklıklarla yatay yükler etkisi altında konsol eğilme kirişi şeklinde davranan ve taşıyıcı sistemi perde duvarlardan oluşan sistemler Şekil 3.6.a.'daki gibidir. Bu sistemde düşey elemandaki yer değiştirmeler sürekli bir fonksiyon şeklindedir ve bu tip davranış gösteren çerçevelerin sürekli sistem olarak modellendirilmesi daha gerçekçi olur. Şekil 3.6.b.'de verilen çerçevede ise yatay ve düşey elemanların rijitlikleri birbirine yakın olduğundan, elemanların kat hizalarındaki yatay ötelemeleri ile elemanların düğüm noktalarındaki dönmeleri de sistemin davranışında etkilidir. Bu sebeple çerçeve idealleştirilirken, yatay yöndeki serbestlikler ve dönme serbestliklerinin göz önüne

alınması gerekir. Şekil 3.6.c.'de verilen çerçeve sisteminde katlardaki kiriş ve döşeme rijitlikleri, kolon rijitliklerine göre çok büyük olduğundan sistem kat hizalarında, kirişlerde dönme olmadan sadece yatay öteleme yapar. Her bir kat ötelemesi sadece o kattaki kesme kuvvetine bağlı olmaktadır. Şekil 3.6.b.'de verilen eğilme tipi çerçeve sistemleri ise normal olarak dinamik yönden en fazla titreşim serbestliği olan sistemlerdir. Bu tip sistemlerin yatay yükler altındaki deformasyonları, teknik deyimle yan ötelenmeleri kesme tipi çerçeve sistemlerine göre ayrıcalık gösterir. Bu durum bilhassa titreşim esnasında da etkisini gösterir (Erdik ve Yüzügüllü 1980).

Şekil 3.6.c.'de verilen çerçeve tipinde sadece kat hizalarındaki yatay yer değiştirme serbestliklerini almak, kütleleri kat hizalarında toplanmış kabul etmek ve katlardaki kolon rijitliklerini toplayarak sistemi çok serbestlik dereceli toplu kütleli sistem olarak modellemek mümkündür. Şekil 3.6.c.'de verilen kat hizalarındaki kiriş-döşeme elemanı rijitlikleri kolonlarına göre oldukça büyük olan ve bu sebepten kiriş-döşeme elemanlarının dönme deformasyonu ihmal edilebilen yapının taşıyıcı sistemini oluşturan çerçeveler, kesme tipi çerçeve sistemi olarak isimlendirilir (Erdik ve Yüzügüllü 1980).



Şekil 3.7. Dinamik yüklemeye maruz çok serbestlik dereceli sistemin mod şekilleri (a). 1. mod, (b). 2. mod, (c). 3. mod

Şekil 3.7'de dinamik yüklemeye maruz kalmış çok serbestlik dereceli bir çerçeve sistemin mod şekilleri verilmiştir. (a) sistemin 1. mod şeklini, (b) sistemin 2. mod şeklini ve (c)'de sistemin 3. mod şeklini göstermektedir.

Yatay kirişlerin uç noktaları aynı zamanda şekil düzlemine dik eksen etrafında dönmelere, teknik deyimle rotasyon (dönme) etkisine de maruz kalırlar. Bundan dolayı her kattaki kolon uçlarına ait kesme kuvvetlerinin birbirinden bağımsız kalacağı düşünülemez. Bununla birlikte bu çeşit sistemlerde 1. mod titreşim türü yanında 2. mod ve 3. mod titreşimlerinin kesit iç kuvvetlerine katkıları da ihmal edilemeyecek büyüklükte olabilmektedir. Modların birleştirilmesi (modal analiz) de bu bakımdan önem kazanmaktadır (Erdik ve Yüzügüllü 1980).

$$\boldsymbol{F_{I_i} + F_{D_i} + F_{S_i} = P_i(t)} \qquad \boldsymbol{(i = 1, \dots, n)} \tag{3.19}$$

genel ifadesi ile yazılabilir. Yapının doğrusal-elastik davranış sergilemesi durumunda süperpozisyon ilkesi geçerlidir. Böyle durumlarda her katta harekete karşı koyan kuvvetler, tüm katlardaki hareket parametresinin çarpıldığı katsayılar cinsinden ifade edilebilir. (3.19) denklemi her kat kütlesi için açık olarak yazılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$m_1 \ddot{u}_1(t) + c_1 \dot{u}_1(t) - c_2\left(\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)\right) + k_1 u_1(t) - k_2\left(u_2(t) - u_1(t)\right) = P_1(t)$$

$$m_2 \ddot{u}_2(t) + c_2\left(\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)\right) - c_3\left(\dot{u}_3(t) - \dot{u}_2(t)\right) + k_2\left(u_2(t) - u_1(t)\right) - k_3\left(u_3(t) - u_2(t)\right) = P_2(t)$$

$$m_3 \ddot{u}_3(t) + c_3\left(\dot{u}_3(t) - \dot{u}_2(t)\right) + k_3\left(u_3(t) - u_2(t)\right) = P_3(t)$$

$$\vdots$$

$$m_n \ddot{u}_n(t) + c_n\left(\dot{u}_n(t) - \dot{u}_{n-1}(t)\right) + k_n\left(u_n(t) - u_{n-1}(t)\right) = P_n(t) \tag{3.20}$$

Çok serbestlik dereceli sistem için elde edilen bu denklem kütle, rijitlik ve sönüm matrislerini ihtiva edecek şekilde aşağıdaki formda yazılabilir (Erdik ve Yüzügüllü 1980).

$$\begin{bmatrix} m_1 & & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & m_n \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \ddot{u}_n(t) \end{bmatrix}}_{\ddot{u}(t)} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & -c_n \\ 0 & \cdots & -c_n & c_n \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{u}_n(t) \end{bmatrix}}_{\dot{u}(t)} + \cdots$$

$$+\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & -k_n \\ 0 & \cdots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n(t) \end{bmatrix}}_{u(t)} = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ P_n(t) \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.21)}$$

Bu denklem kapalı formda ise şu şekilde gösterilir:

$$[M]_{n*n}\{\ddot{u}_n(t)\}_{n*1} + [C]_{n*n}\{\dot{u}(t)\}_{n*1} + [K]_{n*n}\{u(t)\}_{n*1} = \{P(t)\}_{n*1} \quad \textbf{(3.22)}$$

burada *[M]*sistem kütle matrisi, *[C]* sistem sönüm matrisi, *[K]* sistem rijitlik matrisidir. $\{\ddot{u}(t)\}$ kütlelerin serbestlik derecesi doğrultusundaki ivmelerini içeren vektör, $\{\dot{u}(t)\}$ hız vektörü, $\{u(t)\}$ yerdeğiştirme vektörü ve $\{P(t)\}$ kütlelere uygulanan kuvvetlerin vektörüdür.

Sönümsüz serbest titreşimlerde sönüm matrisinin tüm terimleri sıfırdır ve bu durumda (3.22) hareket denklemi şu şekilde sadeleştirilebilir:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad \textbf{(3.23)}$$

Her bir kütlenin tepkisinin harmonik olduğu kabul edilirse, bu denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\{u(t)\} = \{\phi\}\sin(\omega t + \theta) \quad \textbf{(3.24)}$$

burada, ϕ yerdeğiştirme genliğini içeren vektör ve θ yapının her katındaki faz açılarını içeren bir vektördür. Bu denklemin iki kez türevi alınarak aşağıdaki formüller elde edilir.

$$\{\ddot{u}(t)\} = -\omega^2\{\phi\}\sin(\omega t + \theta) = -\omega^2\{u(t)\} \quad \textbf{(3.25)}$$

(3.24) ile verilen yer değiştirme denklemi ve (3.25) ile verilen ivme denklemi (3.23)'teki hareket denkleminde yerine konması durumunda aşağıdaki denklem bulunur.

$$[-\omega^2[M]\{\phi\} + [K]\{\phi\}]\sin(\omega t + \theta) = \{0\} \quad \textbf{(3.26)}$$

Bu denklemin çözüm yollarından birisi, $[-\omega^2[M]\{\phi\} + [K]\{\phi\}]$ ifadesinin sıfıra eşit olmasıdır. Bu çözüm için denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[K]\{\phi\} = \omega^2[M]\{\phi\} \quad \textbf{(3.27)}$$

Bu denklem genelleştirilmiş özdeğer problemi olarak adlandırılır. Bu eşitliğin homojen cebirsel denklem biçiminde yeniden yazılmasıyla,

$$\left[[\boldsymbol{K}] - \boldsymbol{\omega^2}[\mathbf{M}]\right]\{\phi\} = \{\mathbf{0}\} \quad \textbf{(3.28)}$$

sistemin frekans denklemi veya karakteristik değer (özdeğer) denklemi elde edilir (Erdik ve Yüzügüllü 1980).

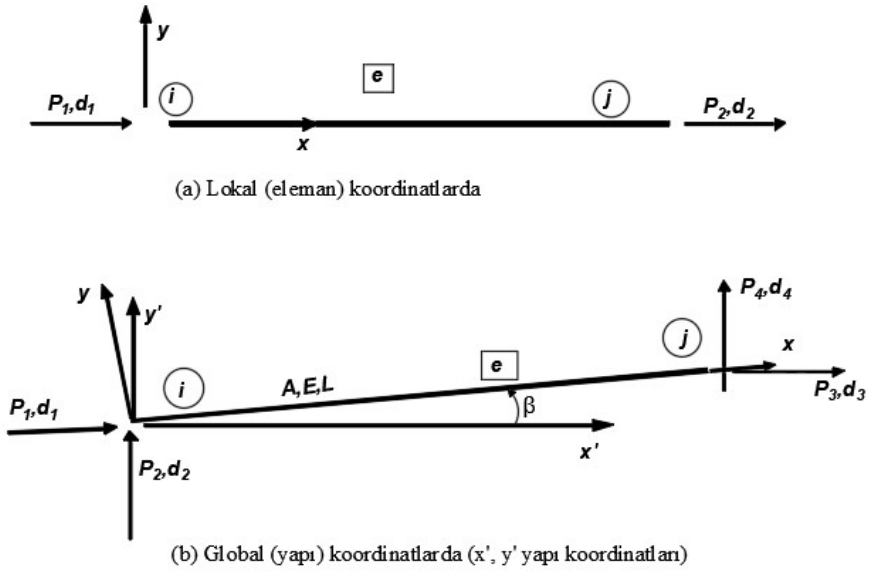
Denklem (3.28), *n* adet lineer homojen denklemdir ve bu denklemde zamana bağlı yer değiştirmelerin genlikleri olan ϕ'ler *n* adet bilinmeyeni ifade eder. Aynı zamanda ω^2 de bilinmeyen parametredir. (3.28) denklemi ile verilen lineer homojen denklem takımının sıfır olmayan köklere sahip olabilmesi için, katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması gerekir.

$$det\left[[K] - \omega^2[\mathrm{M}]\right] = \{0\} \quad \textbf{(3.29)}$$

Burada: *K;* yapının global rijitlik matrisi, *M;* yapının global kütle matrisi, ϕ*;* yapının titreşim mod vektörü, ω_i ; yapının *i*'inci açısal titreşim frekansı, f_i ; yapının i. titreşim frekansı, T_i ; yapının *i*'inci titreşim periyodunu göstermektedir. *i*'inci doğal mod sayısını *i*=1, ... *n* (*n*: serbestlik derecesi) ifade eder.

3.8.2.1. Düzlem Kafes Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisi

Kafes sistem elemanları yalnızca doğrultuları boyunca yük taşırlar, eğilme yükü taşımazlar. Bu sebeple sonlu elemanlar modelinde çubukların her bir düğüm noktasında iki serbestlik derecesi mevcuttur. Dış kuvvetler yalnızca çubukların düğüm noktalarına uygulanır. Düzlem kafes sistemlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, bu yöntemle geliştirilen eleman rijitlik matrislerinin global matrisinde süperpoze edilmesi ve bu matrisin düğüm noktası deplasmanlarıyla yüklere bağlanması şeklindedir. Şekil 3.8.'de düzlem kafes elemanların lokal ve global koordinatlarda gösterimi yapılmıştır.



Şekil 3.8. Düzlem kafes elemanının (a) lokal ve (b) global koordinatlardaki gösterimi

Lokal koordinattaki eleman rijitlik matrisinin $[K_e]$, global koordinattaki rijitlik matrisine $[K_g]$ dönüşümü için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$[K_g] = [T]'[K_e][T]$$

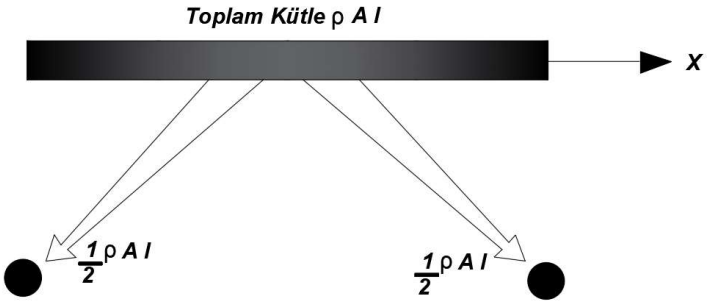
$$[K_g] = \begin{bmatrix} cos\beta & -sin\beta & 0 & 0 \\ sin\beta & cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\beta & -sin\beta \\ 0 & 0 & sin\beta & cos\beta \end{bmatrix}_{4\times4} \times \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4\times4} \times \begin{bmatrix} cos\beta & sin\beta & 0 & 0 \\ -sin\beta & cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\beta & sin\beta \\ 0 & 0 & -sin\beta & cos\beta \end{bmatrix}_{4\times4}$$

$$[K_g] = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}_{4\times4} \quad \textbf{(3.30)}$$

burada; $[K_g]$ global koordinatlarda rijitlik matrisi, $[T]$ dönüşüm matrisini göstermektedir. c=cosβ, s=sinβ ve β çubuk x ekseni ile sistem x' ekseni arasındaki açıdır.

Kütle ve rijitlik matrisinin elde edilmesi için referans alınan sistem Şekil 3.8.'de gösterilmiştir. Burada A: çubuk enkesit alanını, E: malzeme elastisite modülünü ve L: çubuğun uzunluğunu göstermektedir.

Şekil 3.9.'da kütlelerin düğümlerde toplandığı sistemlere örnek olarak sadece x ekseni doğrultusunda hareket edebilen iki düğümlü prizmatik çubuk elemanı gözönüne alınmıştır.



Şekil 3.9. İki düğümlü prizmatik bar eleman için direk kütle toplanması

burada, l; eleman boyu, A; kesit alanı ve ρ; elemanın özgül ağırlığıdır. Bir elemana ait toplam kütle M= ρ A l şeklindedir. Sistem sadece iki serbestlik derecesine sahip olduğu ve iki düğüm noktasına indirgeneceği için kütle ikiye bölünerek düğümlere paylaştırılır. Böylece eleman koordinatlarındaki kütle matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir (Özberk 2006).

$$[M_e] = \frac{1}{2}\,\rho A l \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{2\times 2} \qquad \textbf{(3.31)}$$

Yukarıdaki denklemde lokal (eleman) koordinatlarında verilen eleman kütle matrisi $[M_e]$, koordinat dönüşümü ile global (yapı) $[M_g]$ koordinatlarına dönüştürülerek;

$$[M_g] = [T]'[M_e][T]$$

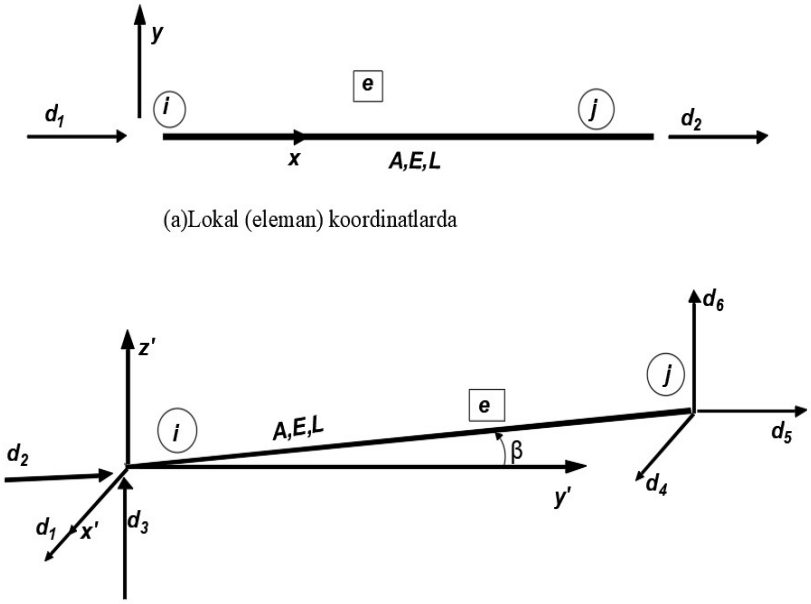
$$[M_g] = \begin{bmatrix} cos\beta & -sin\beta & 0 & 0 \\ sin\beta & cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\beta & -sin\beta \\ 0 & 0 & sin\beta & cos\beta \end{bmatrix}_{4\times 4} \times \frac{\rho A l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4\times 4} \times \begin{bmatrix} cos\beta & sin\beta & 0 & 0 \\ -sin\beta & cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cos\beta & sin\beta \\ 0 & 0 & -sin\beta & cos\beta \end{bmatrix}_{4\times 4}$$

$$[M_g] = \frac{\rho A l}{6} \begin{bmatrix} 2c^2 & 2cs & c^2 & cs \\ 2cs & 2s^2 & cs & s^2 \\ c^2 & cs & 2c^2 & 2cs \\ cs & s^2 & 2cs & 2s^2 \end{bmatrix}_{4\times 4} \qquad \textbf{(3.32)}$$

şeklinde elde edilebilir. Burada; $[M_g]$ global koordinatlarda kütle matrisi, $[T]$ dönüşüm matrisini göstermektedir. c=cosβ, s=sinβ ve β çubuk x ekseni ile sistem x' ekseni arasındaki açıdır.

3.8.2.2. Uzay Kafes Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisi

Uzay kafes sistemler, düzlem kafes sistemlerden farklı olarak aynı düzlemde olmayan üç boyutlu çubukların bir noktada birleşmesinden oluşmaktadır. Uzay kafes sistemde her düğümde 3 Serbestlik derecesi vardır. Uzay kafes sitemde çubuk serbestlik derecesi 6'dır. Şekil 3.10.'da bir uzay kafes elemanın lokal (çubuk) ve global (yapı, sistem) koordinatlarındaki gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.10. Uzay kafes elemanının (a) lokal ve (b) global koordinatlardaki gösterimi

Herhangi bir uzay kafes elemanının global koordinatlardaki rijitlik $[K_g]$ ve kütle $[M_g]$ matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$[K_g] = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ c_y & 0 \\ c_z & 0 \\ 0 & c_x \\ 0 & c_y \\ 0 & c_z \end{bmatrix}_{2\times6} \times \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & \frac{-AE}{L} \\ \frac{-AE}{L} & \frac{AE}{L} \end{bmatrix}_{2\times2} \times \begin{bmatrix} c_x & c_y & c_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_x & c_y & c_z \end{bmatrix}_{6\times2}$$

$$[K_g] = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} c_x^2 & c_xc_y & c_xc_z & -c_x^2 & -c_xc_y & -c_xc_z \\ c_xc_y & c_y^2 & c_zc_y & -c_xc_y & -c_y^2 & -c_zc_y \\ c_xc_z & c_zc_y & c_z^2 & -c_xc_z & -c_zc_y & -c_z^2 \\ -c_x^2 & -c_xc_y & -c_xc_z & c_x^2 & c_xc_y & c_xc_z \\ -c_xc_y & -c_y^2 & -c_zc_y & c_xc_y & c_y^2 & c_zc_y \\ -c_xc_z & -c_yc_z & -c_z^2 & c_xc_z & c_zc_y & c_z^2 \end{bmatrix}_{6\times6} \quad \textbf{(3.33)}$$

$$[M_g] = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ c_y & 0 \\ c_z & 0 \\ 0 & c_x \\ 0 & c_y \\ 0 & c_z \end{bmatrix}_{2\times6} \times \frac{\rho Al}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}_{2\times2} \times \begin{bmatrix} c_x & c_y & c_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_x & c_y & c_z \end{bmatrix}_{6\times2}$$

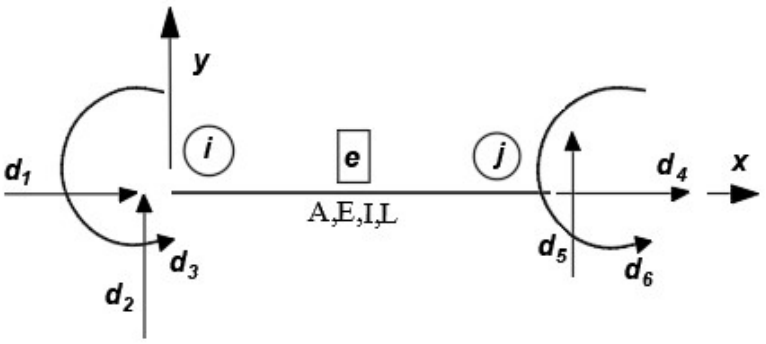
$$[M_g] = \frac{\rho Al}{6}\begin{bmatrix} 2c_x^2 & 2c_xc_y & 2c_xc_z & c_x^2 & c_xc_y & c_xc_z \\ 2c_xc_y & 2c_y^2 & 2c_zc_y & c_xc_y & c_y^2 & c_zc_y \\ 2c_xc_z & 2c_zc_y & 2c_z^2 & c_xc_z & c_zc_y & c_z^2 \\ c_x^2 & c_xc_y & c_xc_z & 2c_x^2 & 2c_xc_y & 2c_xc_z \\ c_xc_y & c_y^2 & c_zc_y & 2c_xc_y & 2c_y^2 & 2c_zc_y \\ c_xc_z & c_yc_z & c_z^2 & 2c_xc_z & 2c_zc_y & 2c_z^2 \end{bmatrix}_{6*6} \quad \textbf{(3.34)}$$

burada; $[K_g]$ ve $[M_g]$ sırasıyla global koordinatlardaki rijitlik ve kütle matrislerini $[T]$ dönüşüm matrisini göstermektedir. c_x, c_y, c_z sırasıyla x, y, z eksenleriyle yapılan açıların kosinüs doğrultmanlarıdır.

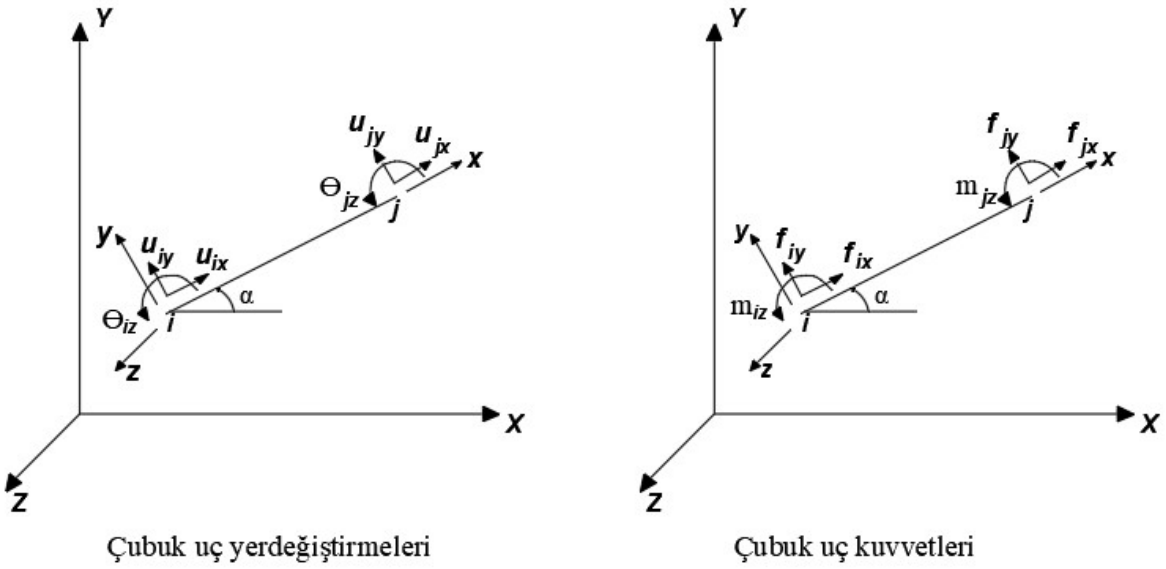
3.8.2.3 Düzlem Çerçeve Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisleri

Düzlem çerçeve çubuğunun her düğümünde iki ötelenme ve bir dönme olmak üzere toplam altı serbestlik derecesi bulunmaktadır. Her serbestlik derecesine karşılık bir de uç kuvveti bulunmaktadır. Çubuk üzerinde ara yük bulunuyorsa, bu ara yüklere karşılık düğümlerde "ankastrelik uç kuvvetleri" denilen reaksiyon kuvvetleri de meydana gelecektir. Çubuk ankastrelik uç kuvvetleri, çubuğun her iki ucu ankastre iken, ara yüklerden dolayı meydana gelen ankastre mesnet reaksiyonları olmaktadır. Düğümlerde hesaplanan bu ankastrelik uç kuvvetlerinin ters işaretlileri aynı zamanda düğümlere indirgenmiş eşdeğer yükleri de vermektedir. Düzlem çerçeve çubuğu 6 serbestlik dereceli

olduğundan; çubuk uç deplasmanları ile uç kuvvetleri arasındaki ilişki 6×6‟lık bir katsayılar matrisi ile kurulmaktadır. Bu matrise, çubuk rijitlik matrisi denilmektedir. Düzlem çerçeve elemanın gösterimi Şekil 3.11.'de, çubuk uç yerdeğiştirmeleri ve uç kuvvetleri ise Şekil 3.12.'deki gibidir.



Şekil 3.11. Düzlem çerçeve elemanının gösterimi



Şekil 3.12. Düzlem çerçeve elemanının gösterimi. Burada; XYZ genel eksen takımı xyz eleman eksen takımı

Şekil 3.11.'de *A*: çubuk enkesit alanını, *E*: malzeme elastisite modülünü, *I*: enkesit atalet momentini ve *L*: çubuğun uzunluğunu göstermektedir. d_1, d_4: *x* ekseni doğrultusundaki serbestlik derecelerini, d_2,d_5: *y* ekseni doğrultusundaki serbestlik derecelerini, d_3,d_6: dönme serbestlik dereceleridir. Şekil 3.12.'de ise çubuk uç yerdeğiştirmeleri (u_{ix}, u_{iy}, Θ_{iz}, u_{jx}, u_{jy}, Θ_{jz}) ve uç kuvvetleri (f_{ix}, f_{iy}, m_{iz}, f_{jx}, f_{jy}, m_{jz})

gösterilmiştir. Burada u_{ix} *:i* ucuna ait *x* ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme, u_{iy} *:i* ucuna ait *y* ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme, Θ_{iz}*: i* ucuna ait dönmedir. u_{jx} *:j* ucuna ait *x* ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme, u_{jy} *:j* ucuna ait *y* ekseni doğrultusundaki yerdeğiştirme, Θ_{jz}*: j* ucuna ait dönmedir. f_{ix}*:i* ucuna ait *x* ekseni doğrultusundaki uç kuvvet, f_{iy}*:i* ucuna ait *y* ekseni doğrultusundaki uç kuvvet, m_{iz}*: i* ucuna ait uç momentidir, f_{jx}*:j* ucuna ait *x* ekseni doğrultusundaki uç kuvvet, f_{jy}*:j* ucuna ait *y* ekseni doğrultusundaki uç kuvvet, m_{jz} *: j* ucuna ait uç momentini ifade etmektedir.

Eleman koordinatlarındaki rijitlik $[k]$ ve kütle $[m]$ matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$[k]=\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ & & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ & sim. & & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.36)}$$

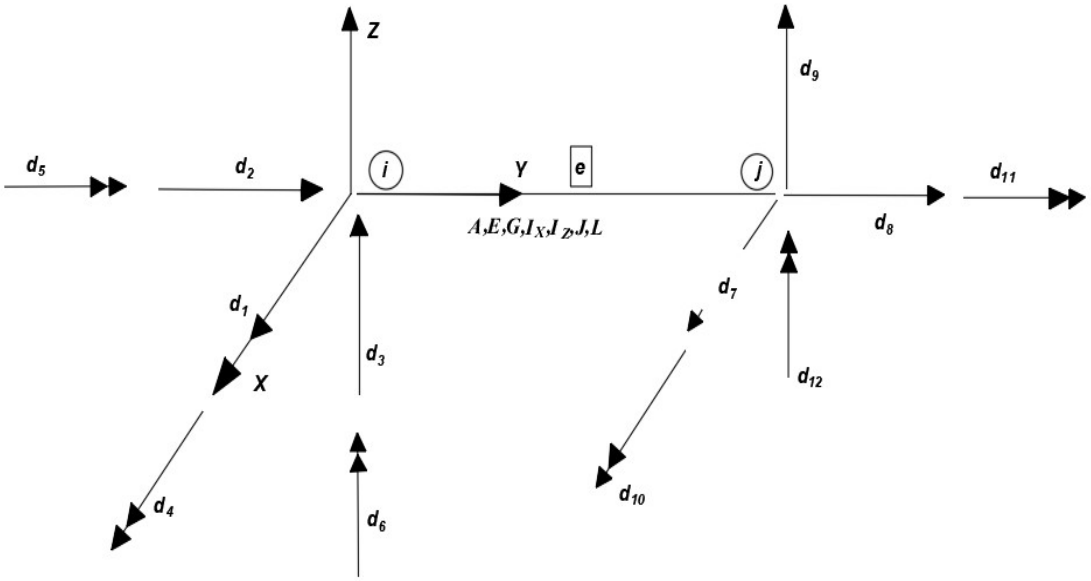
$$[m]=\frac{\rho AL}{420}\begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ & & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ & & & 140 & 0 & 0 \\ & & & & 156 & -22L \\ & sim. & & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.35)}$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Eleman koordinatlarındaki bu matrislerin yapı koordinatlarına dönüştürülmesi [T] dönüşüm matrisi ile yapılmaktadır. Burada ρ; çubuk özgül ağırlığını, c=cosα ve s=sinα'dır. α açısı, çubuk x ekseni ile sistem X ekseni arasındaki açıdır.

3.8.2.4. Uzay Çerçeve Sistemlerde Kütle ve Rijitlik Matrisleri

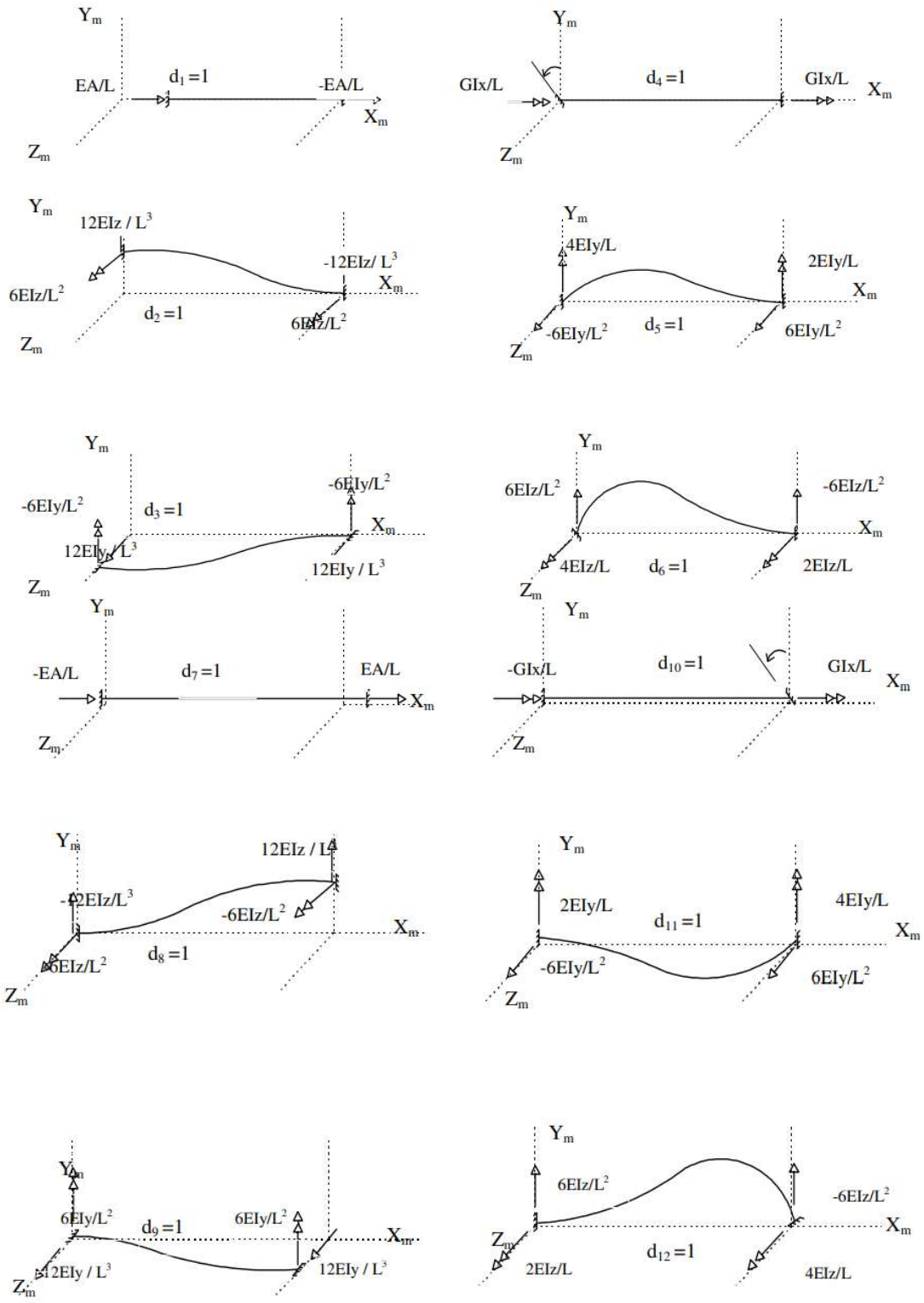
Herhangi bir uzay çerçeve çubuğunun her ucunda sırası ile x, y, z doğrultusunda üç ötelenme, yine sırası ile x, y, z eksenleri etrafında 3 dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi vardır. Dolayısıyla Şekil 3.13.'te gösterilen uzay çerçeve çubuğu için serbestlik derecesi 12'dir.



Şekil 3.13. Uzay çerçeve elemanında serbestlik derecelerinin gösterimi

Şekil 3.13.'te A: çubuk enkesit alanını, E: malzeme elastisite modülünü, G kayma modülünü, I_x: x eksenine göre enkesit atalet momentini, I_z: z eksenine göre enkesit atalet momentini, J: burulma momentini ve L: çubuğun uzunluğunu göstermektedir. Burada uzay çerçeve elemanın i ucu için; d_1: x yönündeki ötelenmeyi, d_2: y yönündeki ötelenmeyi, d_3: z yönündeki ötelenmeyi, d_4: x ekseni etrafındaki dönmeyi, d_5: y ekseni etrafındaki dönmeyi, d_6: z ekseni etrafındaki dönmeyi temsil etmektedir. Benzer şekilde j ucu için; d_7: x yönündeki ötelenmeyi, d_8: y yönündeki ötelenmeyi, d_9: z yönündeki ötelenmeyi, d_{10}: x ekseni etrafındaki dönmeyi, d_{11}: y ekseni etrafındaki dönmeyi, d_{12}: z ekseni etrafındaki dönmeyi ifade etmektedir.

Şekil 3.14.'te uzay çerçeve çubuğa tüm deplasman doğrultularında bir birim deplasman meydana gelmesi durumunda elde edilmiş rijitlik katsayıları gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Uzay çerçeve çubuğu için rijitlik katsayıları (Özberk 2006)

Eleman koordinatlarındaki rijitlik $[k]$ ve kütle $[m]$ matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$[\boldsymbol{k}] = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 & 6EI_z/L^2 & 0 & -12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 & 6EI_z/L^2 \\ & & 12EI_y/L^3 & 0 & -6EI_y/L^2 & 0 & 0 & 0 & 12EI_y/L^3 & 0 & 6EI_y/L^2 & 0 \\ & & & GJ/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -GJ/L & 0 & 0 \\ & & & & 4EI_y/L & 0 & 0 & 0 & 6EI_y/L^2 & 0 & 2EI_y/L & 0 \\ & & & & & 4EI_z/L & 0 & -6EI_z/L^2 & 0 & 0 & 0 & 2EI_z/L \\ & & & & & & EA/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 12EI_z/L^3 & 0 & 0 & 0 & -6EI_z/L^2 \\ & & & & & & & & 12EI_y/L^3 & 0 & 6EI_y/L^2 & 0 \\ & & & & & & & & & GJ/L & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 4EI_y/L & 0 \\ & & & & & & & & & & & 4EI_z/L \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.37)}$$

Simetrik

$$[\boldsymbol{m}] = \frac{\boldsymbol{\rho AL}}{\boldsymbol{420}} \begin{pmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 156 & 0 & 0 & 0 & 22L & 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & -13L \\ & & 156 & 0 & -22L & 0 & 0 & 0 & 54 & 0 & 13L & 0 \\ & & & 140\ I_x/A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -70\ I_x/A & 0 & 0 \\ & & & & 4L^2 & 0 & 0 & 0 & -13L & 0 & -3L^2 & 0 \\ & & & & & 4L^2 & 0 & 13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 \\ & & & & & & 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 156 & 0 & 0 & 0 & -22L \\ & & & & & & & & 156 & 0 & 22L & 0 \\ & & & & & & & & & 140\ I_x/A & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 4L^2 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 4L^2 \end{pmatrix} \quad \textbf{(3.38)}$$

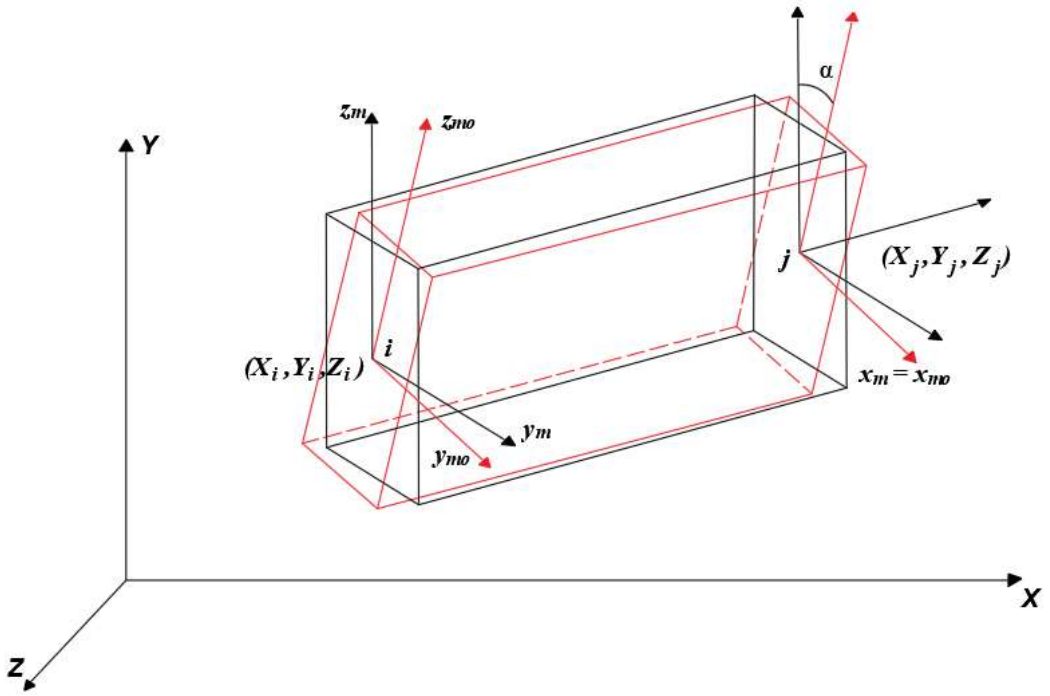
Simetrik

Eleman koordinatlarındaki matrislerin yapı koordinatlarına dönüştürülmesi [T] dönüşüm matrisi ile yapılmaktadır.

$$[T] = \begin{bmatrix} [t] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [t] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [t] & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [t] \end{bmatrix}_{12\times 12} \quad \textbf{(3.39)}$$

Burada *[t]* dönüşüm alt matrisi olup, Şekil 3.15.'te gösterilen ve x_m etrafında oluşan α dönmesini de içerecek şekilde (3.40) denkleminde verilmiştir.

Şekil 3.15.'te uzay çerçeve çubuğun asal atalet eksenleri olan y_m ve z_m eksenlerinin çubuk boy ekseni olan x_m etrafında 360^0 dönerek elde ettiği özel konum ve bu konumu gösteren x_{mo}, y_{mo}, z_{mo} eksenleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Uzay çerçeve çubuğu eksen takımları

$$[t] = \begin{bmatrix} Cx & Cy & Cz \\ \dfrac{-CxCy\cos\alpha - Cx\sin\alpha}{\sqrt{Cx^2+Cz^2}} & \sqrt{Cx^2+Cz^2}\cos\alpha & \dfrac{-CyCz\cos\alpha + Cx\sin\alpha}{\sqrt{Cx^2+Cz^2}} \\ \dfrac{CxCy\sin\alpha - Cz\cos\alpha}{\sqrt{Cx^2+Cz^2}} & -\sqrt{Cx^2+Cz^2}\sin\alpha & \dfrac{CyCz\sin\alpha + Cx\cos\alpha}{\sqrt{Cx^2+Cz^2}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.40)}$$

Burada L uzay çerçeve çubuğunun boyu olmak üzere, C_x, C_y ve C_z ifadeleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_x = \frac{X_j - X_i}{L}$$
$$C_y = \frac{Y_j - Y_i}{L} \quad \textbf{(3.41)}$$
$$C_z = \frac{Z_j - Z_i}{L}$$

3.9. Yapı Sistemlerinin Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Optimum Tasarım Probleminin Formülasyonu

Optimum tasarımda doğal frekans sınırlayıcılarını sağlayan tasarımlar arasında minimum ağırlıklı olan yapının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Buna göre optimum tasarım probleminin formülasyonu aşağıdaki biçimde tanımlanabilir:

$$\{A\} = \left[A_1, A_2, \dots, A_{d_1}\right];\ \{x\} = \left[x_1, x_2, \dots, x_{d_2}\right]$$
$$W(\{A, x\}) = \sum_{i=1}^{nm} \rho_i A_i L_i\left(x_j\right) \quad \textbf{(3.42)}$$
$$\omega_k \le \omega_k^u$$
$$\omega_l \ge \omega_l^l$$
$$A_i^{min} \le A_i \le A_i^{maks} \quad i = 1,2,\dots,d_1$$
$$x_j^{min} \le x_j \le x_j^{maks} \quad j = 1,2,\dots,d_2$$

burada $W(\{A, x\})$ yapının ağırlığını: $\{A\}$ ve $\{x\}$ sırasıyla her bir eleman grubuna ait enkesit alanlarını ve düğüm noktası koordinatlarını içeren vektörler; d_1 ve d_2 sırasıyla toplam enkesit ve düğüm noktası koordinat değişkenlerinin sayısını; A_i : i'inci elemanın enkesitini, A_i^{min} and A_i^{maks} i'inci eleman grubunun alabileceği en küçük ve en büyük enkesit alanlarını; x_j^{min} ve x_j^{maks}, sırasıyla , x_j'nin alabileceği en küçük ve en büyük koordinat değerlerini; nm yapıdaki toplam eleman sayısını, ρ_i ve L_i sırasıyla i'inci elemanın özgül ağırlığını ve uzunluğunu, j; düğüm noktası koordinat sayısı toplamı, ω_k ve ω_k^u sırasıyla, yapının k'inci doğal frekans değerini ve bu değerin alabileceği üst sınır değerini, ω_l ve ω_l^l ise sırasıyla kafes yapının l'inci doğal frekans değerini ve bu değerin alabileceği alt sınır değerini göstermektedir.

Optimum tasarım sürecinde frekans sınırlayıcılarını sağlayan veya sağlamayan tasarımları ayırt edebilmek için cezalandırılmış amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu

fonksiyon ile sınırlayıcıları sağlamayan kafes yapılar sınırlayıcı sağlamama derecelerine göre cezalandırılmaktadır. Cezalandırılmış amaç fonksiyonu, $\varphi(A,x)$, şu şekilde ifade edilebilir:

$$\varphi(A,x) = W(A,x) \times (1+\upsilon)^{\varepsilon} \tag{3.43}$$

burada ε üstel ceza katsayısı, υ cezalandırılmış doğal frekans sınırlayıcılarının toplamı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\upsilon = \sum_{k=1}^{nk} \upsilon_{\omega}^{k} + \sum_{l=1}^{lk} \upsilon_{\omega}^{l} \tag{3.44}$$

burada *nk* ve *lk* sırasıyla üstten ve alttan sınırlandırılmış doğal frekans sınırlayıcı sayısını, υ_{ω}^{k} ve υ_{ω}^{l} ise *k*'inci ve *l*'inci doğal frekanslar için ceza değerleri olup şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}
&\upsilon_{\omega}^{k} = 0 && \text{eğer} \quad \omega_k \le \omega_k^u \\
&\upsilon_{\omega}^{k} = \left\lfloor \frac{\omega_k - \omega_k^u}{\omega_k^u} \right\rfloor && \text{eğer} \quad \omega_k > \omega_k^u \\
&\upsilon_{\omega}^{l} = 0 && \text{eğer} \quad \omega_l \ge \omega_l^l \\
&\upsilon_{\omega}^{l} = \left\lfloor \frac{\omega_k - \omega_l^l}{\omega_l^l} \right\rfloor && \text{eğer} \quad \omega_l < \omega_l^l
\end{aligned} \tag{3.45}$$

3.10. Yapı Sistemlerinin Modifiye Edilmiş JAYA (MJA) Algoritmasıyla Optimum Tasarım Algoritması

JA algoritması, en iyi tasarıma yakınlaşmaya ve en kötü tasarımdan uzaklaşmaya çalışan popülasyon tabanlı sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. JA'da, popülasyon boyutu (*ps*) ve maksimum iterasyon sayısı (*iter* $_{maks}$) olmak üzere iki standart parametre dışında algoritmaya özgü başka parametreler kullanılmamaktadır. JA ilk olarak, popülasyon boyutu (*ps*) olarak ilk popülasyonu rastgele üretir. JA'nın uygulanması çok basittir ve yeni tasarımların elde edilmesi için sadece bir denklem içerir. $(A,x)_{i,l,it}$ iterasyonda tanımlanan *l*'inci tasarım için *i*'inci tasarım değişkeninin değeridir. JA, $(A,x)_{i,l,it}$ değerini aşağıdaki formülle modifiye eder:

$$(A,x)_{i,l,it}^{yeni} = (A,x)_{i,l,it} + r_{1,i,it}\left((A,x)_{i,eniyi,it} - \left|(A,x)_{i,l,it}\right|\right) - r_{2,i,it}\left((A,x)_{i,enkötü,it} - \left|(A,x)_{i,l,it}\right|\right) \tag{3.46}$$

3.48 denkleminde, $(A,x)_{i,l,it}^{yeni}$: tasarım değişkeni $(A,x)_{i,l,it}$ için yeni üretilen değerdir. $r_{1,i,it}$ ve $r_{2,i,it}$ i'inci iterasyonda i'inci tasarım değişkeni için [0,1] aralığında rastgele üretilen iki gerçel sayıdır. $(A,x)_{i,eniyi,it}$: popülasyon içerisindeki mevcut en iyi tasarım $(A,x)_{eniyi,it}$ için *i*'inci tasarım değişkeninin değeridir. $(A,x)_{i,enkötü,it}$: popülasyon içerisindeki mevcut en kötü tasarım $(A,x)_{enkötü,it}$ için *i*'inci tasarım değişkeninin değeridir. $r_{1,i,it}\left((A,x)_{i,eniyi,it} - \left|(A,x)_{i,l,it}\right|\right) - r_{2,i,it}\left((A,x)_{i,enkötü,it} - \left|(A,x)_{i,l,it}\right|\right)$ ifadesi sırasıyla çözümün en iyi tasarıma yaklaşma ve en kötü tasarımdan uzaklaşma eğilimini ifade eder. Rastgele üretilen r_1 ve r_2 katsayıları, arama alanının iyi bir şekilde belirlenmesini sağlar. Aday çözümün mutlak değerini $\left(\left|(A,x)_{i,l,it}\right|\right)$ almak JA'nın en iyi çözümü bulabilme kapasitesini daha da artırır (Rao 2016).

Yeni tasarım $(A,x)^{yeni}$ eğer popülasyonda önceden elde edilen tasarımdan $(A,x)^{mevcut}$ daha iyiyse, öncekinin yerini alır. Aksi takdirde, $(A,x)^{mevcut}$ değişmeden kalır. Popülasyondaki tüm tasarımlar için aynı süreç tekrarlanır ve böylece bir iterasyon tamamlanır. Optimizasyon süreci, maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında tamamlanır.

Bu tezde önerilen modifiye edilmiş JAYA algoritması (MJA), standart JA'dan farklı özelliklere sahiptir. MJA'da uygulanan bu özelliklerin amacı, hesaplama süresini ve yapı analiz sayısını azaltmaktır. Bu amaçla, denklem (3.42) kullanılarak elde edilen yeni tasarımın ağırlığı ($W(A,x)^{i,\,yeni}$) önceki tasarımın ağırlığı ile karşılaştırılmaktadır ($W(A,x)^{i}$). Eğer $W(A,x)^{i,\,yeni} < W(A,x)^{i}$ veya önceki tasarım cezalı ise, yeni tasarım için modifiye edilmiş amaç fonksiyonu hesaplanır. Eğer $W(A,x)^{i,\,yeni} > W(A,x)^{i}$ ve önceki tasarım yapılabilir (cezalandırılmamış) bir tasarım ise, yeni tasarım yapılabilir bir tasarım olsa bile önceki tasarımdan daha ağır olduğundan yapısal analiz yapılmasının anlamı yoktur, dolayısıyla yeni tasarımın modifiye edilmiş amaç fonksiyonu hesaplanmayacaktır. Yani MJA'da optimum tasarımda ilerlemeye neden olmayan tasarımlar için gereksiz yere yapısal analiz yapılmamaktadır. Bu strateji kafes yapılarının optimum boyutlandırılmasında başarıyla uygulanmıştır (Değertekin ve ark. 2018). Ayrıca MJA'da başlangıçta farklı popülasyonlar üretilir ve her popülasyondan en iyi tasarımlar seçilerek daha elit bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. MJA ile yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarım algoritması aşağıdaki adımlardan oluşur:

Adım 1: <u>*MJA algoritmasının başlatılması:*</u> Popülasyon sayısı (*ps),* maksimum iterasyon sayısı ($iter_{maks}$) ve grup sayısı *(ng)* belirlenir. 10**ps* kadar rastgele başlangıç popülasyonları üretilir. Diğerlerinden daha küçük modifiye edilmiş amaç fonksiyonuna sahip *ps* tasarımları kadar başlangıç popülasyonu olarak atanır. Bu tasarımlar matris formunda aşağıda gibi gösterilebilir:

$$pop=\begin{bmatrix} A_1^1 & A_2^1 & \dots & \dots & A_{ng}^1 \\ A_1^2 & A_2^2 & \dots & \dots & A_{ng}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_1^{ps-1} & A_2^{ps-1} & \dots & \dots & A_{ng}^{ps-1} \\ A_1^{ps} & A_2^{ps} & \dots & \dots & A_{ng}^{ps} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.47)}$$

bu matriste her satır bir yapı tasarımı göstermektedir. A_k^i, *i*-inci tasarımındaki *k*-ıncı eleman grubunu temsil eden enkesit alanıdır. Her tasarım için yapı analizleri yapılır ve modifiye edilmiş amaç fonksiyonları hesaplanır ($\varphi(A,x)^i$). İterasyon döngü sayısı *iter*=0 olarak ayarlanır.

Adım 2: İterasyon sayacı arttırılır, *iter*=*iter*+1.

Adım 3: <u>*En iyi ve en kötü tasarımları tanımlanması:*</u> Popülasyondaki en iyi $\varphi\ (A,x)^{min})$ *v*e en kötü $\varphi\ (A,x)^{maks})$ tasarımları belirlenir. Tasarım sayacının *id*=0, *(id* = 1,2, ..., *ps*) ayarlanarak tasarım algoritması başlatılır.

Adım 4: Tasarım sayısı arttırılır, *id*=*id*+1

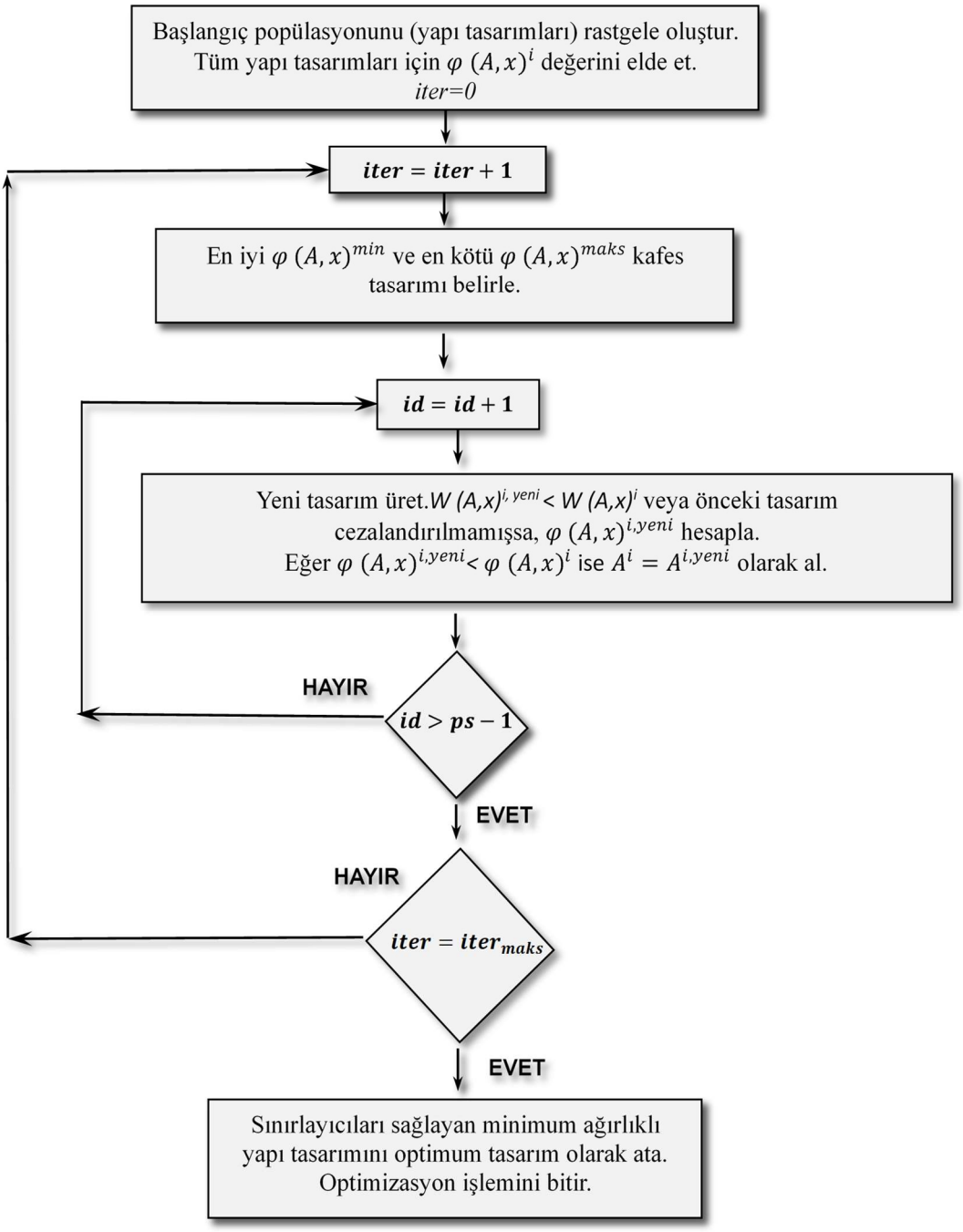
Adım 5: <u>*Yeni tasarımların üretilmesi:*</u> Dördüncü tasarımın tüm tasarım değişkenlerini aşağıda verilen 3.46 denklemi ile değiştirerek yeni tasarım oluşturulur.

$W\ (A,x)^{i,\ yeni} < W\ (A,x)^i$ veya önceki tasarım cezalandırılmışsa, 3.42 denklemi kullanarak yeni tasarım için cezalandırılmış amaç fonksiyonunu $\varphi\ (A,x)^{yeni}$ hesaplanır. Aksi takdirde, 4. adıma gidilir. $\varphi\ (A,x)^{i,yeni} < \varphi\ (A,x)^i$ ise, yeni tasarımı *i.* tasarım ile değiştirilir, aksi takdirde eski tasarım korunur.

Adım 6: *id> ps-1* ise 7. adıma gidilir, aksi halde 4. adıma gidilir.

Adım 7: *iter=iter$_{maks}$* ise, Adım 8'e gidilir, aksi takdirde Adım 2'ye gidilir.

Adım 8: *MJA sonlandırılması:* Arama işlemi sonlandırılır ve doğal frekans sınırlayıcılarını sağlayan minimum ağırlıklı tasarım, optimum tasarım olarak atanır, $\varphi\ (A^{opt}) = \varphi\ (A^{min})$



Şekil 3.16. MJA algoritmasının akış diyagramı

3.11. Yapı Sistemlerinin Adaptif JAYA (AJA) İle Optimum Tasarım Algoritması

Standart JA'da popülasyon boyutu (*ps*) ve maksimum iterasyon sayısı (*iter* $_{maks}$) olmak üzere iki standart parametre dışında algoritmaya özgü başka parametreler kullanılmamaktadır. Bu tezde önerilen adaptif JAYA'da (AJA) ise ne *ps* ne de *iter* $_{maks}$ parametreleri kullanılmaktadır. Dolayısıyla AJA'da problem ve algoritmaya özgü herhangi bir parametre kullanılmamaktadır. AJA'da popülasyon boyutu otomatik olarak belirlenmektedir. Bu sayede, kullanıcının popülasyon boyutunu ayrıca belirlemeye gerek kalmaz. Hesaplama açısından uzun süreçlerden kaçınmak için, önerilen AJA algoritması (10**nd*) tasarımlar içeren ilk popülasyonu oluşturur. Burada *nd*, d_1 enkesit değişkenleri ve d_2 şekil değişkenlerinin toplamına eşittir ($nd=d_1+d_2$). Dolayısıyla ilk popülasyon şu şekilde oluşturulur:

$$\begin{cases} A_{i,l}^{o} = A_i^{min} + rand_{i,l}(A_i^{min} - A_i^{maks}) \\ x_{j,l}^{o} = x_j^{min} + rand_{j,l}(x_j^{min} - x_j^{maks}) \end{cases} \qquad \begin{cases} i = 1, \dots, d_1 \\ j = 1, \dots, d_2 \\ l = 1, \dots, ps \end{cases} \qquad \textbf{(3.48)}$$

burada $rand_{i,l}$ ve $rand_{j,l}$, *l*'inci tasarımın *i*'inci enkesit değişkenini *j*'inci düğüm noktası değişkenleri için rastgele olarak [0,1] aralığında üretilir.

Popülasyon boyutu, her iterasyonda şu şekilde güncellenir (Rao ve More 2017)

$$ps_{yeni} = round(ps_{mevcut} + rand \times ps_{mevcut}) \qquad \textbf{(3.49)}$$

burada ps_{mevcut} ve ps_{yeni} sırasıyla geçerli iterasyondaki ve sonraki iterasyondaki popülasyon boyutlarıdır. *rand* [–0.5,0.5] aralığında rastgele oluşturulmuş bir sayıdır. (3.49) denklemine göre *rand* pozitif veya negatif olabileceğinden dolayı, optimizasyon işlemi sırasında popülasyon boyutu artabilir veya azalabilir. Yeni popülasyonda ps_{yeni} mevcut popülasyondan %50 olasılıkla daha büyük ve %50 olasılıkla daha küçük olabilir. Bu şekilde aralığı, optimizasyon hesaplama süresi büyük ölçüde arttırılmadan arama süreci boyunca popülasyondaki çeşitliliğin korunması amaçlanmaktadır.

Eğer $ps_{yeni} > ps_{mevcut}$ ise, mevcut popülasyon bir sonraki popülasyona tamamen aktarılır ve mevcut popülasyonda oluşan en iyi optimum çözümler, yeni popülasyonu oluşturmak ($ps_{yeni} - ps_{mevcut}$) için kullanılır. Bir sonraki popülasyon

büyüklüğü mevcut popülasyon büyüklüğünden daha az olduğunda ($ps_{yeni} < ps_{mevcut}$), mevcut popülasyondaki sadece en iyi tasarımlar yeni popülasyona gidecektir. Mevcut ve yeni popülasyon büyüklükleri eşitse ($ps_{yeni} = ps_{mevcut}$) hiçbir değişiklik yapılmaz.

JA'nın standart uygulamasında, maksimum iterasyon sayısı tamamlanana kadar arama adımları tekrar edilir. Ancak $iter_{max}$'ın en iyi değeri genellikle her tasarım örneği için belirli sayıda deneme çalışmasından sonra belirlenir. AJA'da ise maksimum iterasyon sayısı, kullanıcı tarafından sabit bir değer olarak belirtilmez, böylece yukarıda bahsedilen dezavantajdan kaçınılır. Optimizasyon süreci, popülasyon tasarımları için değerlendirilen cezalandırılmış tasarımların standart sapması ile ortalama cezalandırılmış tasarım arasındaki oran kullanıcı tarafından belirlenen yakınsama sınırından daha küçük ise otomatik olarak sonlanır (Lamberti ve Pappalettere 2009):

$$\frac{STD[\varphi(A,x)^1,\varphi(A,x)^2,.....,\varphi(A,x)^{ps}]}{\sum_{i=1}^{ps}\varphi(A,x)^i/ps} \leq \varepsilon_{conv} \qquad \textbf{(3.50)}$$

burada $\varphi(A,X)^i$ popülasyonda yer alan *i*'inci tasarımın (i = *1,..., ps*) cezalandırılmış amaç fonksiyon değeridir; ε_{conv} yakınsama katsayısı olup bu çalışmada 10^{-15} olarak alınmıştır.

AJA kullanarak yapı sistemlerinin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarım algoritması aşağıdaki adımlardan oluşur:

Adım 1: <u>*AJA algoritmasının başlatılması:*</u> Popülasyon sayısının on katı (10×*ps*) yapı sistemi tasarımı (3.48) denklemi ile rastgele üretilir. Daha küçük cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerine ($\varphi(A,x)$)sahip olan tasarımlar başlangıç popülasyonu olarak seçilir. İterasyon sayacı *iter = 0* olarak başlatılır.

Adım 2: İterasyon sayacı arttır, *iter=iter+1*. Eğer *iter>1* ise (3.49) denklemini kullanarak popülasyon boyutu *ps* güncellenir.

Adım 3: <u>*En iyi ve en kötü tasarımların belirlenmesi :*</u> Popülasyondaki en iyi $\varphi(A,x)^{en\ iyi}$ ve en kötü $\varphi(A,x)^{en\ kötü}$ tasarımlar belirlenir. Tasarım sayacı *id = 0*, (*id = 1,2,..., ps*) başlatılır.

Adım 4: Tasarım sayacı arttırılır *id=id+1*.

Adım 5: *Yeni tasarımların oluşturulması :* (3.46) denklemi kullanılarak *id*'inci tasarımın tüm tasarım değişkenleri değiştirilerek yeni tasarımı oluşturulur.

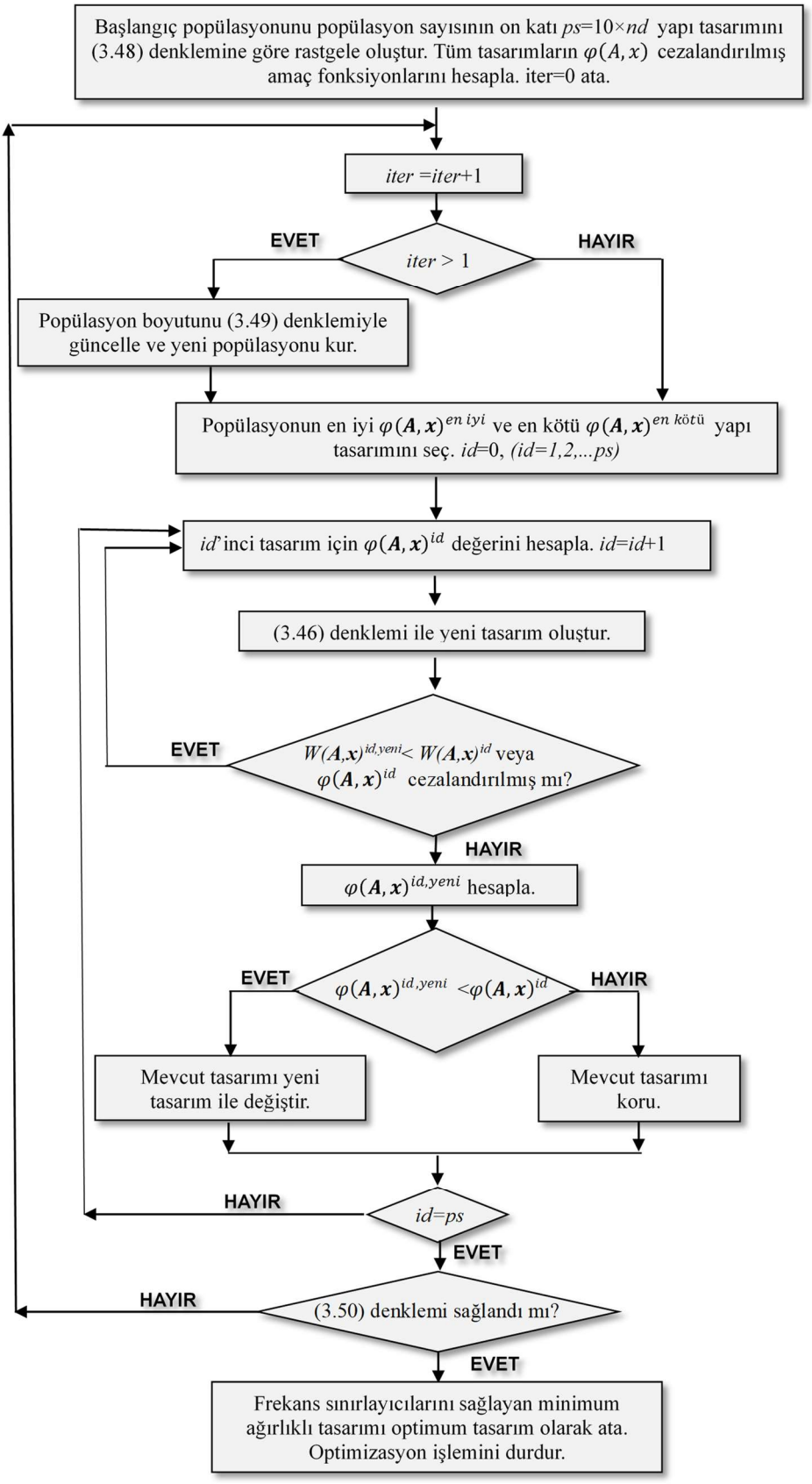
Adım 6: *Yeni tasarım için ön değerlendirme :* Eğer $W(A,x)^{id,\,yeni} < W(A,x)^{id}$ veya önceki tasarım cezalandırılmış bir tasarım ise Adım 7'ye gidilir. Aksi halde Adım 8'e gidilir.

Adım 7: Yeni tasarımın $(\varphi(A,x)^{id,yeni})$ cezalandırılmış amaç fonksiyonunu hesaplanır. Eğer $\varphi(A,x)^{id,yeni} < \varphi(A,x)^{id}$ ise mevcut tasarım yeni tasarımla değiştirerek popülasyon güncellenir. Aksi takdirde, *id*'inci tasarım değiştirilmez.

Adım 8: *id = ps* ise, 9. adıma gidilir, aksi takdirde 4. adıma gidilir.

Adım 9: (3.50) denklemi sağlanıyorsa, 10. adıma gidilir, aksi takdirde 2. adıma gidilir.

Adım 10: *AJA'nın sonlandırılması:* Optimizasyon süreci sonlandırılır. Frekans sınırlayıcılarını sağlayan tasarımlar içerisinde minimum ağırlıklı olan tasarım optimum tasarım olarak atanır.



Şekil 3.17. AJA algoritmasının akış diyagramı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kafes Yapılar

Önerilen yöntemlerin geçerliliği, daha önce GA-NC (Gholizadeh ve ark. 2008), PSO (Gomes 2011), NHPGA (Wei ve ark. 2011), CSS-Enhanced CSS (Kaveh ve Zolghadr 2011), GA (Wenjie Zuo ve ark. 2011), CSS-BBBC (Kaveh ve Zolghadr 2012), QN-BBBC (Kaveh ve Mahdavi 2013), TLBO (Baghlani ve Makiabadi 2013) GA-OC (Zuo ve ark. 2014), DPSO ve PSO (Kaveh ve Zolghadr 2014), SBO ve TLBO (Farschin ve ark. 2016), ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), VPS (Kaveh ve Ghazaan 2017), MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018), Re-DE (Hoo-Huu ve ark. 2018), AHEFA (Lieu ve ark. 2018), ISOS (Tejani ve ark. 2018), CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018), MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019), EACCS (Kaveh ve Koosshkbahhi 2019), HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019), JA (Grzywinski ve ark. 2019) yöntemleri kullanılarak optimize edilen üç adet düzlem ve 4 adet uzay kafes yapı üzerinde test edilmiştir. Yapı analizleri ve optimizasyon algoritmalarını içeren ana program MATLAB'ta (MathWorks, 2016) kodlanmıştır. Bu şekilde, MATLAB programının kullanımı ile optimum tasarım işlemi icra edilmiştir.

Bu çalışmada önerilen algoritmalar, her tasarım örneği için farklı başlangıç popülasyonları için 20 farklı kez icra edilmiş ve en hafif kafes yapının elde edildiği icra sonucundaki ağırlık optimum ağırlık ve bu ağırlığı elde etmek için gerekli yapı analiz sayısı (NSA) çizelgelerde sunulmuştur. Ayrıca, yirmi farklı icra sonucunda bulanan tasarımlara ait ortalama ağırlık, en kötü ağırlık ve standart sapma (SD) gibi bazı istatistiksel parametrelerde çizelgelerde verilmiştir.

Önerilen yöntemlerden elde edilen sonuçlarla doğru bir kıyaslama yapılabilmesi için daha önceki çalışmalardakilerle aynı malzeme özellikleri ile yük değerleri kullanılmıştır ve bu değerler Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir. Ayrıca MJA için en iyi yakınsama davranışını veren popülasyon büyüklüğünün (*ps*) değerini bulmak için bir hassasiyet analizi yapılmıştır. Bu amaçla, 200 elemanlı düzlem kafes, 72 elemanlı uzay kafes ve 600 elemanlı kubbe kafes örnekleri için popülasyon büyüklüğü 10, 20, 30, 40 ve 50 olmak üzere ayrı ayrı icra edilmiş, yapı analiz sayısı (NSA) ve yapı ağırlıkları Çizelge 4.2.'de sunulmuştur. Çizelge 4.2.'den *ps* değerinin en uygun değeri 20 olduğu görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalarda elde edilen optimum tasarımların ve bu tez çalışmasında sunulan JA, MJA ve AJA algoritmalarının icrasıyla elde edilen optimum tasarımlara ait sonuçların tasarım sınırlayıcılarını sağlayıp sağlamadığı SAP 2000 V23 yapısal analiz yazılımı ile test edilerek kontrol edilmiştir. Bu amaçla çizelgelerde sunulan tüm optimum tasarımlar bir kez de SAP 2000 V23'de modellenip, analiz edilerek doğal frekans değerleri kontrol edilmiştir. Böylece önerilen yöntemlerden elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olunmuştur.

Çizelge 4.1. Kafes yapıların malzeme özellikleri, kesit alanlarının alt-üst sınır değerleri ve doğal frekans sınır değerleri

Test örnekleri	Elastisite modülü E (N/m^2)	Malzeme yoğunluğu ρ (kg/m^3)	Kesit alanı sınırları (cm^2)	Doğal frekans sınırlamaları (Hz)
37 elemanlı düzlem	2.1×10^{11}	7800	$1 \le A$	$\omega_1 \ge 20$ $\omega_2 \ge 40$ $\omega_3 \ge 60$
52 elemanlı kubbe	2.1×10^{11}	7800	$0.1 \le A \le 10$	$\omega_1 \le 15.9155$ $\omega_2 \ge 28.6479$
72 elemanlı uzay	6.98×10^{10}	2770	$0.645 \le A$	$\omega_1 = 4$ $\omega_3 \ge 6$
200 elemanlı düzlem	2.1×10^{11}	7860	$0.1 \le A$	$\omega_1 \ge 5$ $\omega_2 \ge 10$ $\omega_3 \ge 15$
600 elemanlı kubbe	2.0×10^{11}	7850	$1 \le A \le 100$	$\omega_1 \ge 5$ $\omega_3 \ge 7$
1180 elemanlı kubbe	2.0×10^{11}	7850	$1 \le A \le 100$	$\omega_1 \ge 7$ $\omega_2 \ge 7$ $\omega_3 \ge 9$
1410 elemanlı kubbe	2.0×10^{11}	7850	$1 \le A \le 100$	$\omega_1 \ge 7$ $\omega_3 \ge 9$

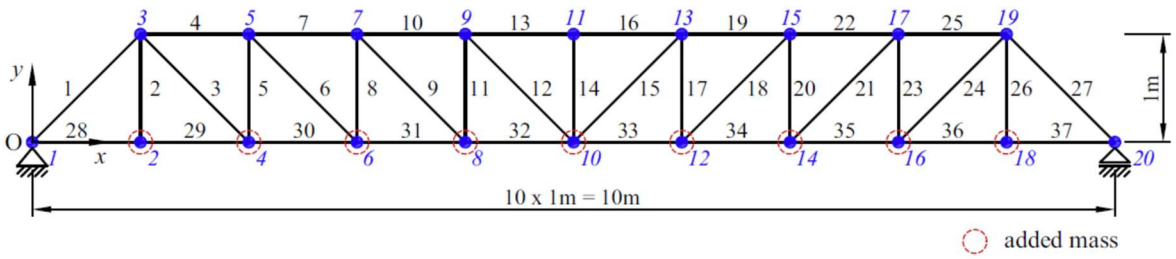
Çizelge 4.2. MJA yöntemi kullanılarak farklı popülasyon büyüklükleri için gereken yapılan analiz sayısı (NSA) ve en hafif yapı ağırlık sonuçları

Popülasyon büyüklüğü (ps)	72 elemanlı uzay kafes		200 elemanlı düzlem kafes		600 elemanlı kubbe kafes	
	Ağırlık (kg)	NSA	Ağırlık (kg)	NSA	Ağırlık (kg)	NSA
10	325.547	8000	2201.021	11.560	6352.25	9800
20	**324.9714**	**7450**	**2171.515**	**12.735**	**6334.656**	**9640**
30	325.9655	8170	2195.399	14.940	6380.341	9750
40	326.2441	9440	2245.655	13.450	6355.245	10160
50	327.1488	7560	2176.149	15.330	6396.658	10210

4.1.1. 37 Elemanlı Düzlem Kafes Yapı

Şekil 4.1.'deki 37 elemanlı düzlem kafes yapının ağırlık ve şekil optimizasyonu yapılmıştır. Bu kafes yapıda 14 tane enkesit ve 5 tane şekil tasarım değişkeni mevcuttur. Alt başlığın mesnetler dışındaki her düğüm noktasına 10 kg'lık kütle

eklenmiştir. Alt başlık çubuklarının enkesit alanları 0.4 cm^2 iken yapının diğer elemanlarına 1 cm^2 başlangıç enkesit alanı olarak atanmıştır. Üst başlıktaki tüm düğüm noktaları yapının simetrisi korunacak şekilde y ekseni doğrultusunda hareket edebilmektedir. Bu kafes yapının enkesit ve şekil tasarım değişkenleri Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4. sırasıyla, MJA (Değertekin ve ark. 2019), AJA'dan elde edilen sonuçlar; öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon MS-TLBO Tejani ve ark. (2016), okul tabanlı optimizasyon SBO Farshchin ve ark. (2016), titreşimli parçacık sistemi VPS Kaveh ve Ghazaan (2017), zenginleştirilmiş yapay koroner damar devridaim optimizasyonu EACCS Kaveh ve Kooshkbahhi (2019), hipotrokoid spiral optimizasyonu HSPO Kaveh ve Mahjoubi (2019), parçacık küme optimizasyonu esaslı armoni arama HALC- PSO Kaveh ve Ghazaan (2015), adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması AHEFA Lieu (2018), göç esaslı local arama mekanizmalı hibrid yüklü sistem araması CCS-MBLS Jalili ve Talatahari (2018) ve göç arama stratejili diferansiyel evrim MS-DE Jalili ve Hosseinzadeh (2019) yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 4.3.'te kafes yapının optimizasyon sonuçları, Çizelge 4.4.'te ise Çizelge 4.3.'teki optimizasyon sonuçları için elde edilen ilk beş doğal frekans değerleri MJA (Değertekin ve ark. 2019), AJA ve literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1. 37 elemanlı düzlem kafes yapının başlangıç halinin yan görünüşü (Lieu 2018)

Çizelge 4.3. 37 elemanlı kafes yapının optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri Y_j (m); A_i (cm^2)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	SBO (Farshchin ve ark. 2016)	VPS (Kaveh ve Ghazaan 2017)	EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018)	MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
Y_3, Y_{19}	0.9581	0.9551	0.9042	0.9352	0.9606	0.9750	0.9589	0.8954	0.9522	**0.8912**	**0.9724**
Y_5, Y_{17}	1.3614	1.3289	1.2850	1.3114	1.3425	1.3577	1.3450	1.2886	1.3435	**1.2439**	**1.3603**
Y_7, Y_{15}	1.5262	1.5273	1.5017	1.4983	1.5219	1.5520	1.5355	1.4864	1.5387	**1.4101**	**1.4976**
Y_9, Y_{13}	1.6429	1.6727	1.6509	1.6284	1.6567	1.6920	1.6668	1.6632	1.6750	**1.5595**	**1.6140**
Y_{11}	1.7167	1.7509	1.7277	1.7064	1.7330	1.7688	1.7397	1.7398	1.7501	**1.6312**	**1.6929**
A_1,A_{27}	3.0754	2.9219	3.1306	2.9045	3.0179	2.9652	2.8210	3.0202	2.8279	**3.6349**	**3.2214**
A_2, A_{26}	1.0000	1.0007	1.0023	1.0013	1.0000	1.0114	1.0019	1.1036	1.0280	**1.1390**	**1.0000**
A_3, A_{24}	1.0001	1.0005	1.0001	1.0156	1.0001	1.0090	1.0001	1.0257	1.0104	**1.0000**	**1.0000**
A_4, A_{25}	2.7449	2.6633	2.5883	2.6157	2.5478	2.4601	2.5308	2.5724	2.3892	**2.7251**	**2.6189**
A_5, A_{23}	1.2446	1.2387	1.1119	1.1372	1.2429	1.2300	1.2210	1.1995	1.2008	**1.3238**	**1.3890**
A_6, A_{21}	1.2466	1.2030	1.2599	1.2058	1.2679	1.2064	1.2429	1.1678	1.2553	**1.3490**	**1.5061**
A_7, A_{22}	2.4648	2.4843	2.6743	2.5863	2.5675	2.4245	2.4718	2.7402	2.4195	**3.0344**	**2.7945**
A_8, A_{20}	1.3055	1.3706	1.3961	1.3730	1.4142	1.4618	1.4018	1.5052	1.3621	**1.3394**	**1.5383**
A_9, A_{18}	1.4983	1.4618	1.5036	1.4763	1.5449	1.4328	1.5061	1.3893	1.5691	**1.7539**	**1.7091**
A_{10}, A_{19}	2.5125	2.4432	2.4441	2.4519	2.5457	2.5000	2.5604	2.4513	2.4970	**2.6325**	**2.6400**
A_{11}, A_{17}	1.2255	1.2758	1.2977	1.2508	1.2148	1.2319	1.2146	1.2574	1.2206	**1.2829**	**1.1418**
A_{12}, A_{15}	1.2299	1.3491	1.3619	1.3155	1.3371	1.3669	1.3605	1.4707	1.4111	**1.3327**	**1.3366**
A_{13}, A_{16}	2.3904	2.3831	2.3500	2.2816	2.3914	2.2801	2.3992	2.4018	2.5220	**3.0346**	**2.5320**
A_{14}	1.0025	1.0000	1.0000	1.0003	1.0000	1.0011	1.0000	1.0018	1.0013	**1.0000**	**1.0000**
En iyi ağırlık (kg)	359.973	359.83	359.94	358.932	360.45	359.93	359.812	360.15	359.93	**363.321**	**363.056**
Ortalama ağırlık (kg)	361.306	360.65	360.23	359.085	360.51	360.23	359.919	360.87	360.21	**364.432**	**363.934**
SD (kg)	1.0731	0.470	0.220	0.1246	0.1602	0.240	0.0871	0.580	0.200	**0.6744**	**0.5529**
CV (%)	5.15	5.32	5.35	5.78	4.13	5.33	5.35	5.32	5.34	**0.000**	**0.000**
NSA	6000	12000	7940	8000	9000	10000	8640	9750	9520	**7040**	**5600**

Çizelge 4.4. 37 elemanlı kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Frekans Numarası (Hz)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	SBO (Farshchin ve ark. 2016)	VPS (Kaveh ve Ghazaan 2017)	EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018)	MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	20.0015	20.0001	20.0002	20.0003	20.0000	20.0216	20.0000	20.001	20.0086	**20.0036**	**20.0020**
1*	**19.8721**	**19.8726**	**19.8728**	**19.5143**	**19.8997**	**19.8935**	**19.8725**	**19.8740**	**19.8821**	**20.0036**	**20.0020**
2	40.0251	40.0000	40.0005	40.0058	40.0000	40.0098	40.0001	40.0013	40.0156	**40.0023**	**40.0010**
2*	**39.0237**	**39.0091**	**39.0119**	**36.0031**	**39.2281**	**39.0160**	**39.0088**	**39.0134**	**39.0255**	**40.0023**	**40.0010**
3	60.1208	60.0000	60.0000	60.0049	60.0000	60.0017	60.0002	60.0078	60.0015	**60.0083**	**60.0010**
3*	**56.9100**	**56.8037**	**56.7888**	**56.5339**	**57.5229**	**56.7994**	**56.7917**	**56.8069**	**56.7969**	**60.0083**	**60.0010**
4	76.4775	76.9716	77.2124	76.4605	**	76.7857	76.7801	77.457	77.0491	**73.0755**	**71.9605**
5	95.9485	96.4656	97.3173	96.6879	**	96.3543	96.4007	98.3448	97.0918	**87.0543**	**84.7884**

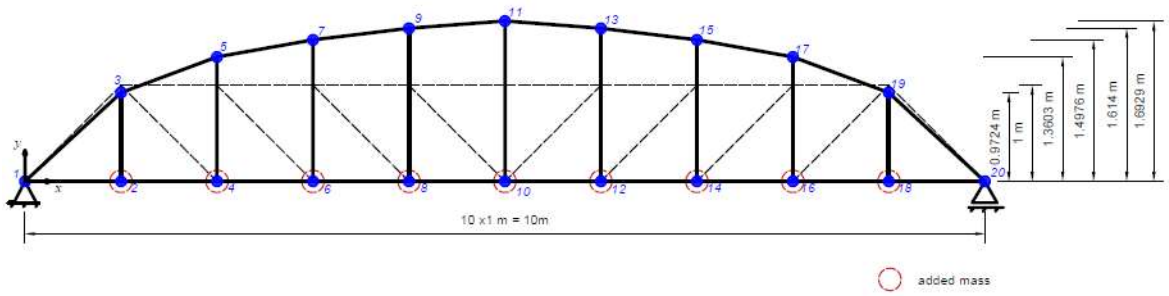
* SAP 2000 v23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

**Mevcut değil

Çizelge 4.3.'te, AJA ve MJA ile optimize edilmiş tasarımlarının, literatürde belirtilen en hafif çözümden yaklaşık % 1.15 daha ağır olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.3.'te en hafif yapı ağırlığı EACCS tarafından 358.932 kg olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte Çizelge 4.4.'te görüleceği üzere AJA ve MJA ile elde edilen optimum tasarımlar tüm frekans sınırlayıcılarını sağlarken, EACCS ve optimizasyon yöntemlerinden tarafından elde edilen optimum tasarımların 3. doğal frekans sınırlayıcısını % 4.13-% 5.78 arasında değişen bir oranda ihlal ettiği tespit edilmiştir. Bunun yanında Çizelge 4.4.'te, MJA ve AJA yöntemleri ile elde edilen optimum tasarıma ait doğal frekansların, SAP 2000 v23 yazılımı ile elde edilen doğal frekanslarla birebir aynı olduğu kanıtlanmıştır. AJA, optimize edilmiş ağırlık, ortalama ağırlık ve standart sapma değerleri açısından başarılı olduğundan MJA'dan daha güçlü bir yöntem olduğu görülmüştür.

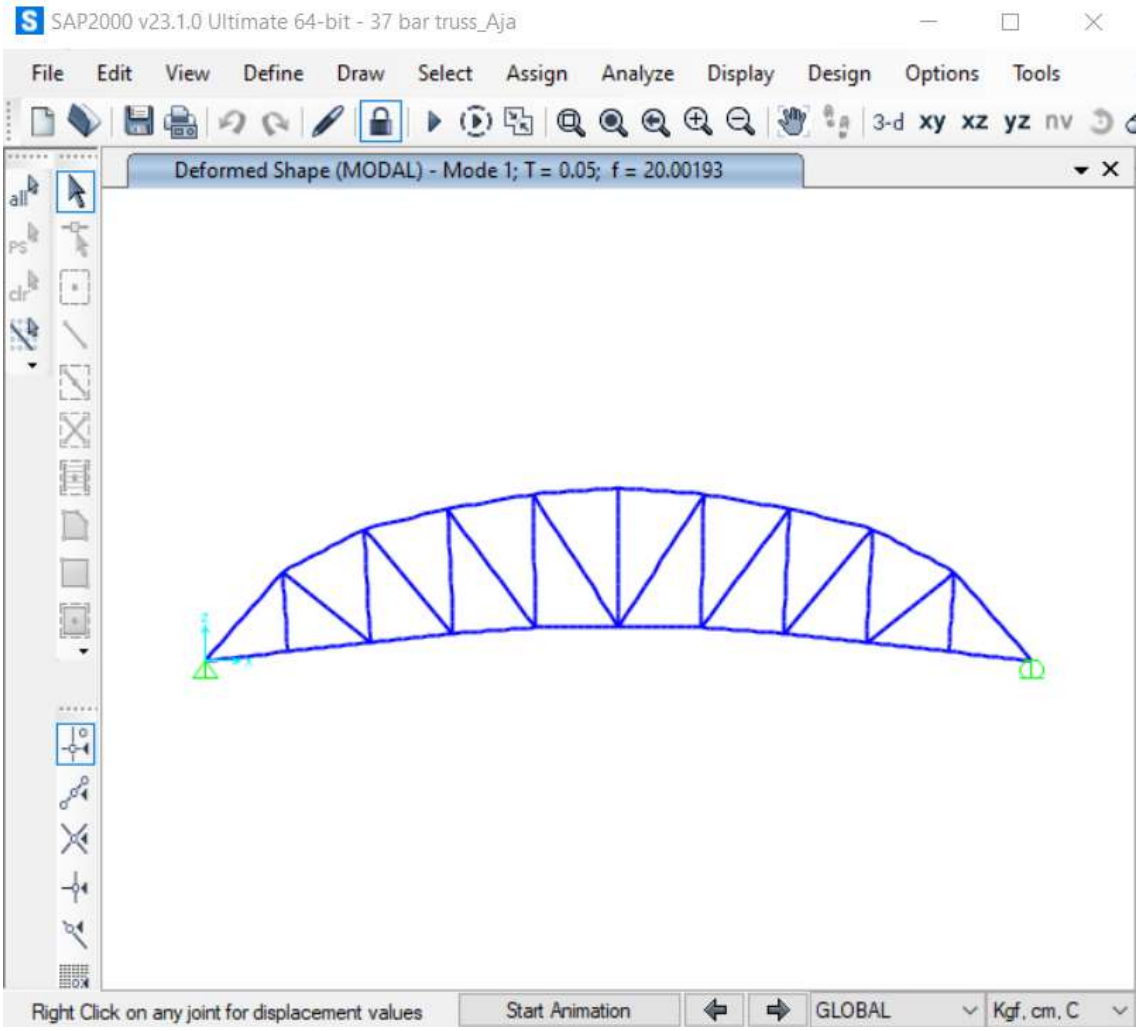
Ayrıca Çizelge 4.3.'te literatürdeki diğer algoritmalar optimizasyon sürecini 6000 ve 12000 arasındaki analiz sayısı ile tamamlarken, AJA sadece 5600 analiz sayısı ile optimizasyon sürecini tamamlamıştır. MJA ise 7040 yapı analizi sayısı ile optimum çözümü bulmuştur. AJA'nın frekans sınırlayıcılarını sağlayan en hafif yapıyı elde etmesine karşın diğer yöntemlerin frekans sınırlayıcılarını ihlal etmesi, AJA'nın 37 elemanlı düzlem kafes problemi için genel olarak en verimli optimizasyon yöntemi olduğu sonucuna varılmasına neden olmuştur.

Şekil 4.2., 37 elemanlı düzlem kafes yapının ilk hali ve AJA ile optimize edilmiş nihai hali gösterilmektedir.

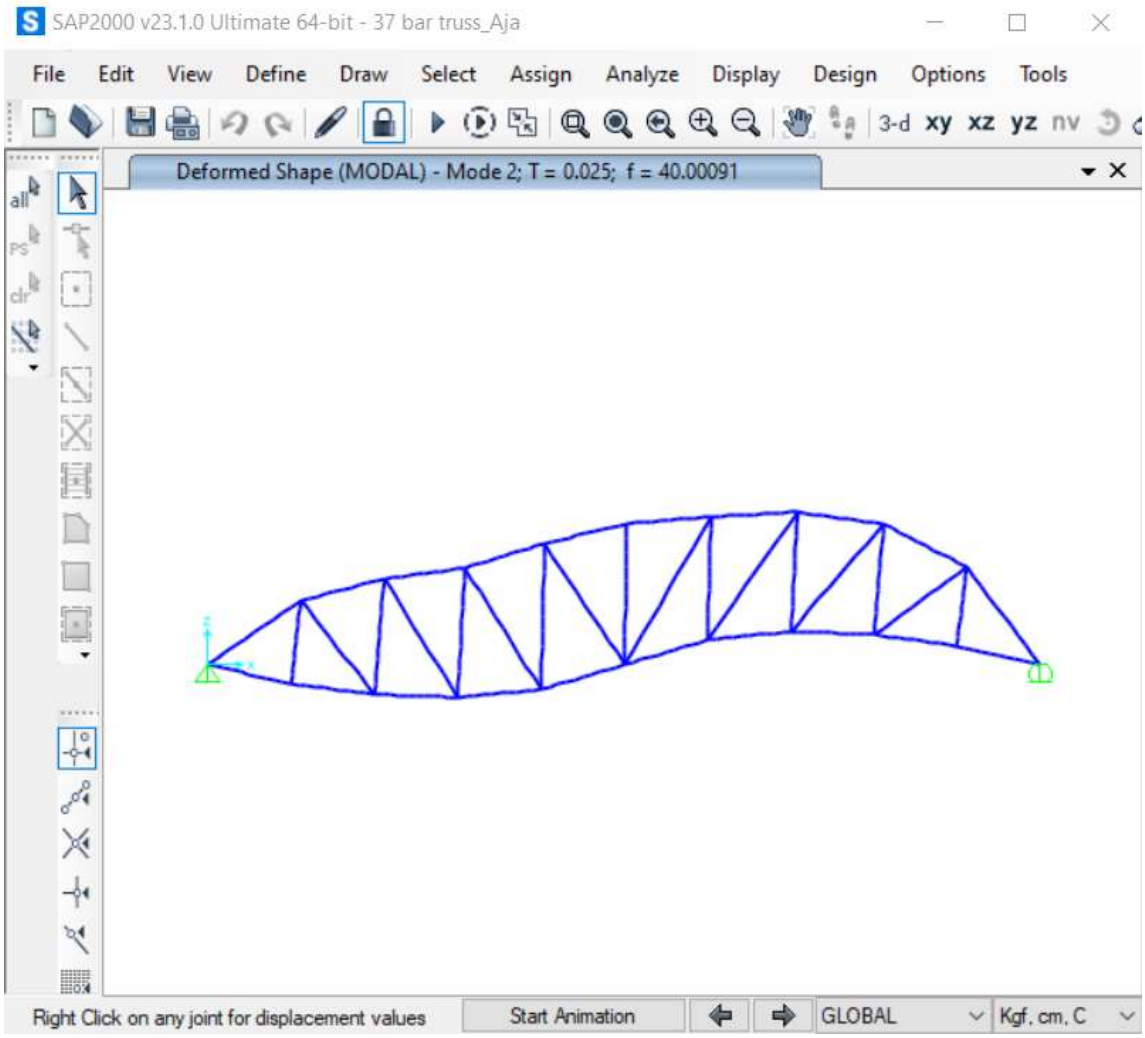


Şekil 4.2. 37 elemanlı düzlem kafes yapının başlangıç (kesikli çizgi) ve AJA ile optimize edilmiş halinin yan görünüşü

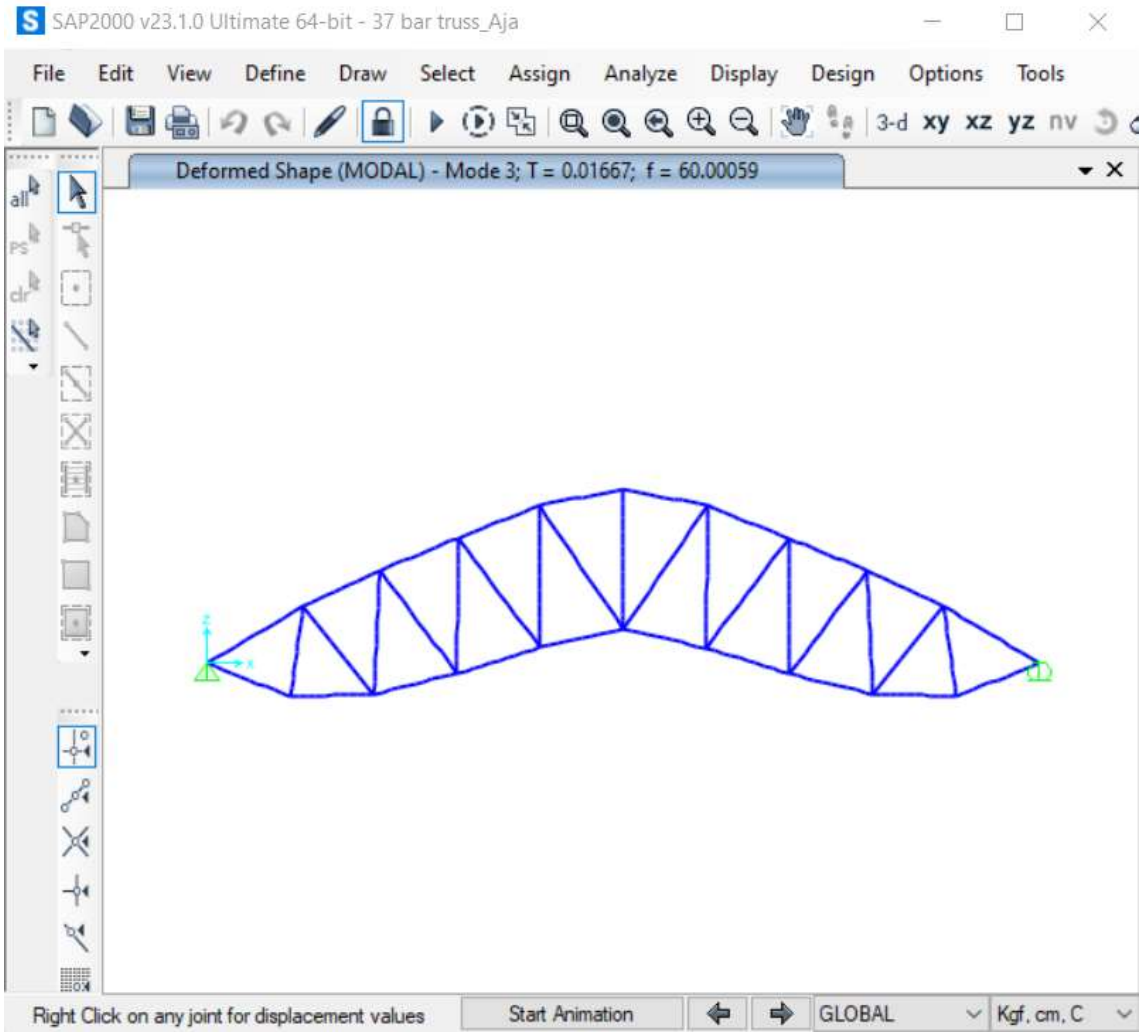
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk beş moduna ait sonuçlar Şekil 4.3.(a-e)'de sunulmuştur. Şekil 4.3.'ten görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



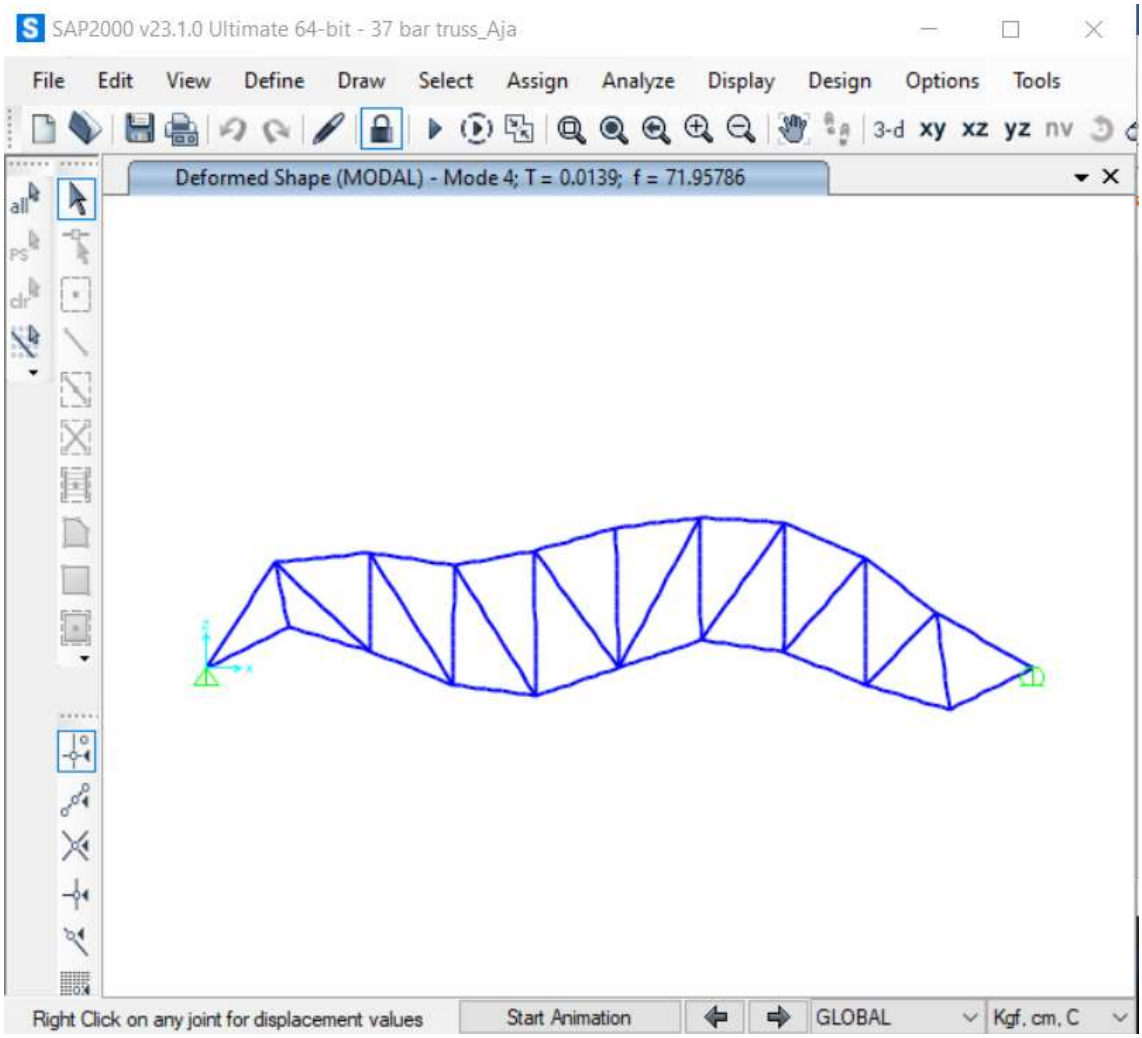
Şekil 4.3.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının 1. Modu



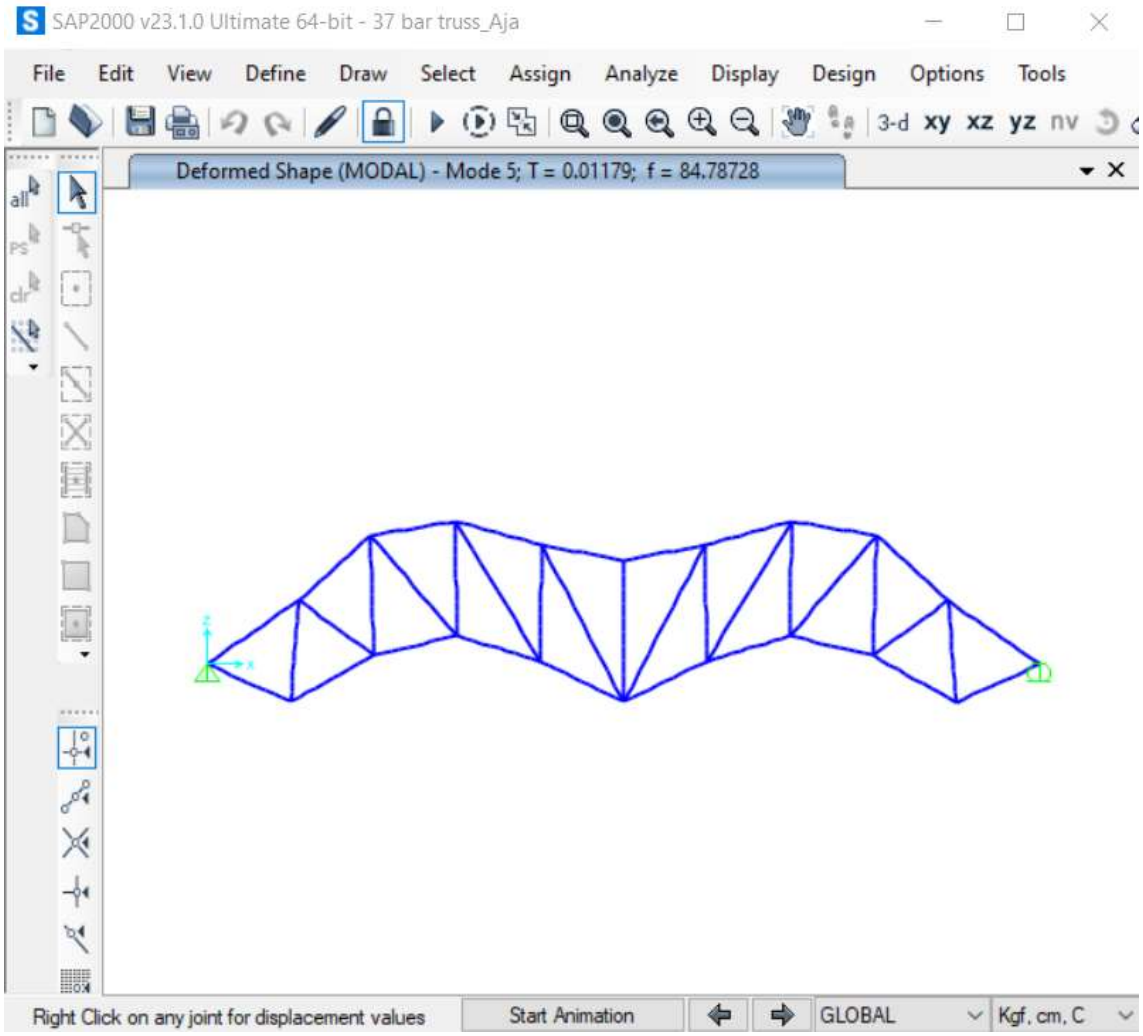
Şekil 4.3.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının 2. Modu



Şekil 4.3.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının 3. Modu

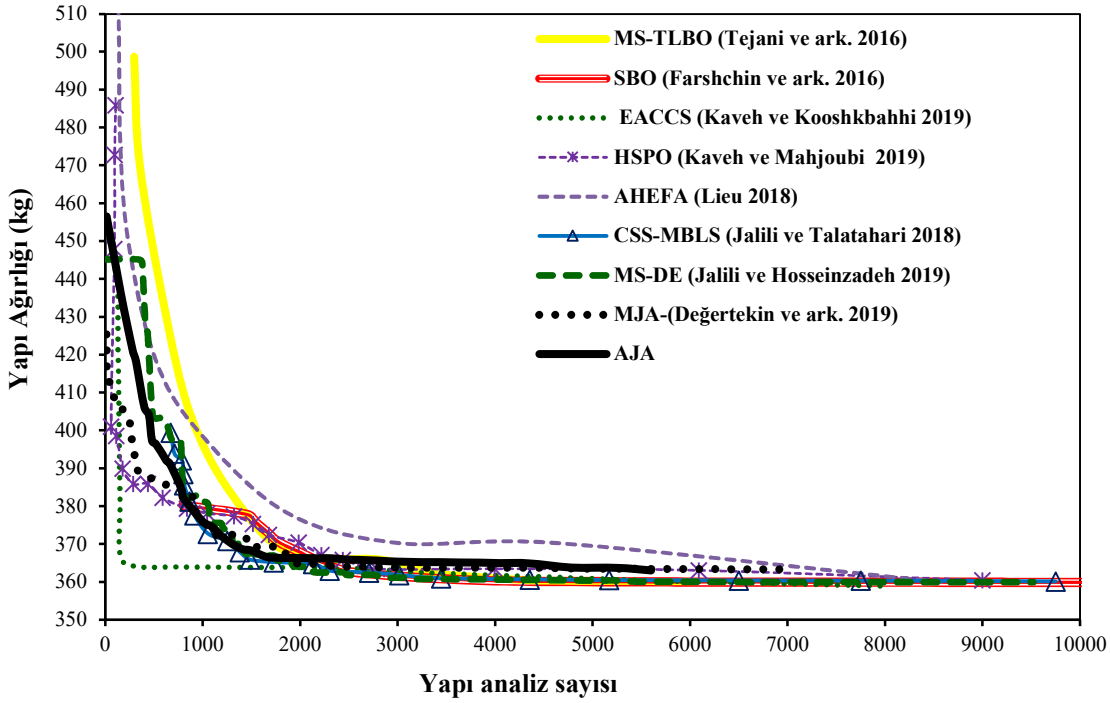


Şekil 4.3.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının 4. Modu



Şekil 4.3.(e). SAP 2000 V23 ile modellenen 37 elemanlı düzlem kafes yapının 5. Modu

AJA ve diğer yöntemler için optimizasyon işlemi süresince yapı ağırlığının yapı analiz sayısı ile değişimini gösteren yakınsama eğrileri Şekil 4.4.'te karşılaştırılmıştır.

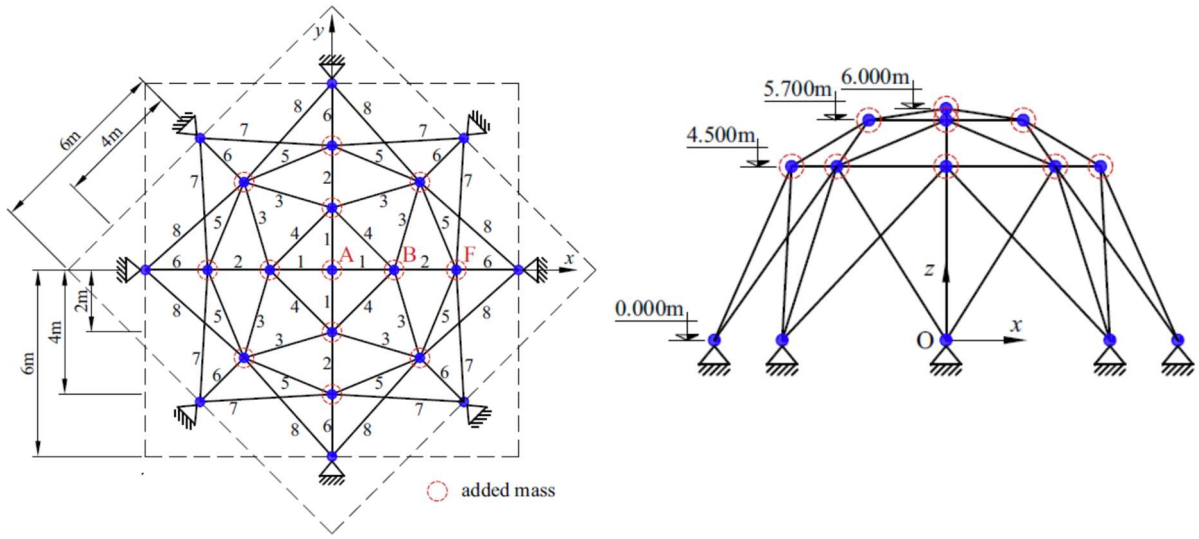


Şekil 4.4. 37 elemanlı düzlem kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 4.4.'ten AJA'nın sadece 500-1000 yapısal analizden sonra yakınsamaya başlayarak yaklaşık 5600 yapısal analizden sonra optimum çözümü bulabildiği görülmektedir. Bu, AJA'nın güçlü bir yakınsama kabiliyetini olduğunu ispatlamaktadır. MJA (Değertekin ve ark. 2019), MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016) , SBO (Farshchin ve ark. 2016), EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019), HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019), AHEFA (Lieu 2018), CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018) ve MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019) algoritmaları, yapı analiz sayısı açısından AJA ile karılaştırıldığında AJA'nın yalnızca 5600 analizine karşılık 6000 ila 12000 analiz ile optimum sonuca ulaşmıştırlar.

4.1.2. 52 Elemanlı Uzay Kubbe Kafes Yapı

İkinci tasarım örneği olan ve Şekil 4.5'te verilen 52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının ağırlık optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon probleminin 8 enkesit ve 5 şekil tasarım değişkeni mevcuttur. Mesnet noktaları dışındaki tüm düğüm noktalarına 50 kg'lık kütle eklenmiştir. *x*, *y* ve *z* yönlerindeki her bir serbest düğümün koordinatları ± 2 m'den fazla değişmesine müsaade edilmemektedir. Literatürde daha önce; öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon MS-TLBO Tejani ve ark. (2016), okul tabanlı optimizasyon SBO Farshchin ve ark. (2016), hipotrokoid spiral optimizasyonu HSPO Kaveh ve Mahjoubi (2019), demokratik parçacık sürüsü optimizasyonu DPSO Kaveh ve Zolghadr (2014), parçacık küme optimizasyonu esaslı armoni arama HALC-PSO Kaveh ve Ghazaan (2015), adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması AHEFA, CGFA Lieu (2018), göç esaslı local arama mekanizmalı hibrid yüklü sistem araması CCS-MBLS Jalili ve Talatahari (2018), göç arama stratejili diferansiyel evrim MS-DE Jalili ve Hosseinzadeh (2019), standard Jaya algoritması JA Grzywinski ve ark. (2019), ve kaotik ateşböceği algoritması esaslı Gaussian haritalaması CGFA Kaveh ve Javadi (2019) ve MJA (Değertekin ve ark. 2019) yöntemleri ile ağırlık ve şekil optimizasyonu yapılan bu kubbe kafes yapı bu çalışmada AJA ile optimize edilmiştir.



Şekil 4.5. 52 elemanlı kubbe kafes yapının ilk yerleşim planının üstten ve yandan şematik görünüşleri (Lieu 2018)

Çizelge 4.5.'te, AJA yöntemi ile elde edilen optimizasyon sonuçları MJA, standart JA literatürde bulunan diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.6.'da ise Çizelge 4.5.'teki tasarımlar için elde edilen ilk dört doğal frekans değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5. 52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri Y_j (m); A_i (cm^2)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	SBO (Farshchin ve ark 2016)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2014)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018)	MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019)	Standard JA (Grzywiński ve ark. 2019)	CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)	MJA **(Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
Z_A	5.8481	5.9644	5.93305	6.164	5.9362	5.9953	5.9966	6.0848	5.9493	5.9421	**5.9972**	**6.0081**
X_B	2.2609	2.2834	2.29496	2.261	2.2416	2.3062	2.1726	2.1778	2.3060	2.2530	**2.5243**	**2.5695**
Z_B	3.7000	3.7240	3.70796	3.832	3.7309	3.7308	3.8096	3.8260	3.7142	3.7152	**3.7000**	**3.7000**
X_F	3.9446	3.9738	2.81015	4.046	3.9630	4.0000	3.9876	4.0227	3.9855	3.9527	**4.1480**	**4.1590**
Z_F	2.5009	2.5000	2.50000	2.509	2.5000	2.5000	2.5090	2.5003	2.5000	2.5000	**2.5006**	**2.5162**
A_1 (1-4)	1.0000	1.0000	1.00000	1.002	1.0001	1.0000	1.0012	1.0002	1.0000	1.0000	**1.0003**	**1.0000**
A_2 (5-8)	1.1097	1.0933	1.11748	1.117	1.1654	1.0832	1.2028	1.1959	1.08219	1.1257	**1.6916**	**1.6649**
A_3 (9-16)	1.2279	1.1893	1.21602	1.221	1.2323	1.2014	1.2616	1.2733	1.19599	1.2134	**1.0961**	**1.0739**
A_4 (17-20)	1.5145	1.4493	1.48023	1.464	1.4323	1.4527	1.3776	1.3821	1.47996	1.4694	**1.3910**	**1.3957**
A_5 (21-28)	1.4136	1.3883	1.40868	1.513	1.3901	1.4212	1.4216	1.4705	1.41009	1.3989	**1.3155**	**1.3142**
A_6 (29-36)	1.0000	1.0000	1.00000	1.001	1.0001	1.0000	1.0001	1.0002	1.00001	1.0000	**1.0000**	**1.0000**
A_7 (37-44)	1.6206	1.6055	1.60639	1.526	1.6024	1.5570	1.4645	1.45810	1.57885	1.6019	**1.4035**	**1.3773**
A_8 (45-52)	1.3321	1.3823	1.39162	1.384	1.4131	1.3904	1.4785	1.42810	1.38031	1.3640	**1.6375**	**1.6690**
En iyi ağırlık (kg)	193.346	193.158	194.7876	195.620	194.850	193.202	193.970	193.960	193.223	193.134	**196.753**	**196.737**
Ortalama ağırlık (kg)	212.704	195.948	204.104	207.860	196.850	198.729	206.300	200.960	195.144	195.360	**199.507**	**198.445**
SD (kg)	32.848	3.794	7.806	10.24	2.380	4.411	7.170	6.310	2.874	2.580	**2.9159**	**2.281**
CV (%)	**2.809**	**3.030**	**53.299**	**4.502**	**2.761**	**3.071**	**2.841**	**3.853**	**2.670**	**3.579**	**0.000**	**0.000**
NSA	6000	15000	4000	3460	7500	12120	9000	7200	18000	6000	**7670**	**5800**

Çizelge 4.6. 52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Frekans Numarası (Hz)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	SBO (Farshchin ve ark. 2016)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2014)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018)	MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019)	Standard JA (Grzywiński ve ark. 2019)	CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	11.6331	11.6112	11.6528	11.236	11.433	11.662	11.162	10.963	11.7039	11.4430	**13.8446**	**14.1897**
1*	**10.7160**	**11.0120**	**11.1205**	**11.457**	**10.785**	**11.337**	**10.733**	**10.892**	**11.2205**	**10.6331**	**13.8446**	**14.1897**
2	28.6492	28.6480	28.6480	28.648	28.648	28.648	28.648	28.648	28.6485	28.6480	**28.6482**	**28.6481**
2*	**27.8429**	**27.7798**	**13.3787**	**27.358**	**27.857**	**27.768**	**27.834**	**27.544**	**27.8830**	**27.6224**	**28.6482**	**28.6481**
3	28.6492	28.6480	**	28.648	28.648	28.648	28.648	28.648	28.6485	28.6480	**28.6482**	**28.6481**
4	29.0176	28.6511	**	28.693	28.684	28.661	28.881	28.660	28.7063	28.6490	**28.6482**	**28.6481**

* SAP 2000 v23 ile elde edilen birinci ve üçüncü doğal frekans değeri

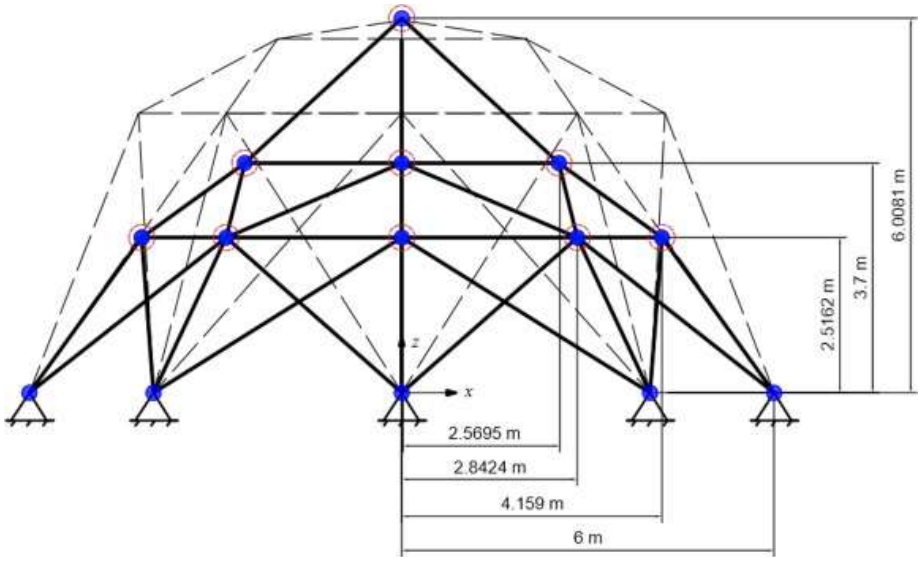
**Mevcut değil

Çizelge 4.5.'ten MJA ve AJA dışındaki tüm optimizasyon yöntemlerinden elde edilen optimum tasarımların 2. Frekans sınırlayıcısını % 2.670 ile % 53.299 arasında ihlal ettiği tespit edilmiştir. Bu durumda, daha ağır kafes yapılar elde etmelerine karşın MJA ve AJA'nın diğer tüm yöntemlerden daha uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca 196.737 kg ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en hafif yapı ağırlığı ile AJA yönteminin Çizelge 4.5.'teki yöntemler arasındaki en güçlü yöntem olduğu sonucuna varılabilir.

Çizelge 4.5.'te, AJA 5800 analiz ile optimizasyon sürecini tamamlarken DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2014) 3460 ve HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019) 4000 analiz ile süreci tamamlamıştır. Bu üç yöntemin diğer tüm yöntemlerden daha az yapısal analiz gerektirdiği görülmüştür. Bununla birlikte, DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2014) ve HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019) sınırlayıcıları ihlal ederken, AJA sınırlayıcıları sağlayan bir tasarım elde etmiştir. Ayrıca, AJA'nın diğer modifiye Jaya'lardan daha hızlı olduğu görülmüştür. Standart JA ve MJA optimizasyon işlemini sırasıyla 18000 ve 7670 yapı analizi sonunda tamamlarken AJA 5800 yapı analizinde tamamlamıştır.

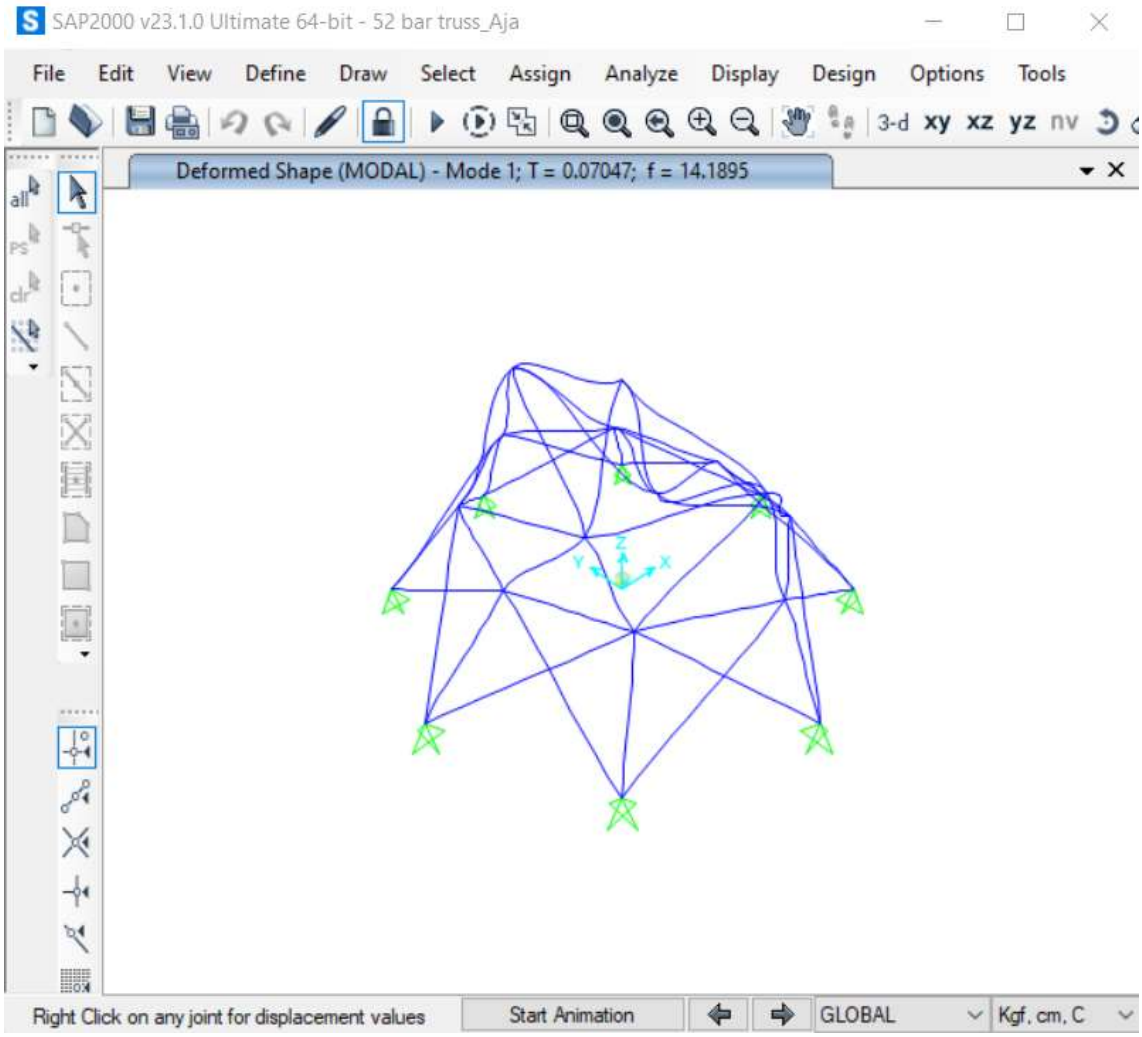
20 farklı icra için elde edilen sonuçlardan standart sapma değeri açısından AJA 2281 kg ile 1. sırada iken, ardından HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015), CGFA (Kaveh ve Javadi 2019), standart JA (Grzywiński ve ark. 2019) ve MJA (Değertekin ve ark. 2019) yöntemleri gelmiştir. Bu durum AJA'nın farklı icralar sonunda yaklaşık aynı değerleri elde ettiğini diğer bir değişle tutarlı sonuçlar veren bir yöntem olduğunun kanıtıdır.

Şekil 4.6.'da 52 elemanlı kubbe kafesin ilk şekli ve AJA ile optimize edilmiş nihai şekli gösterilmektedir.

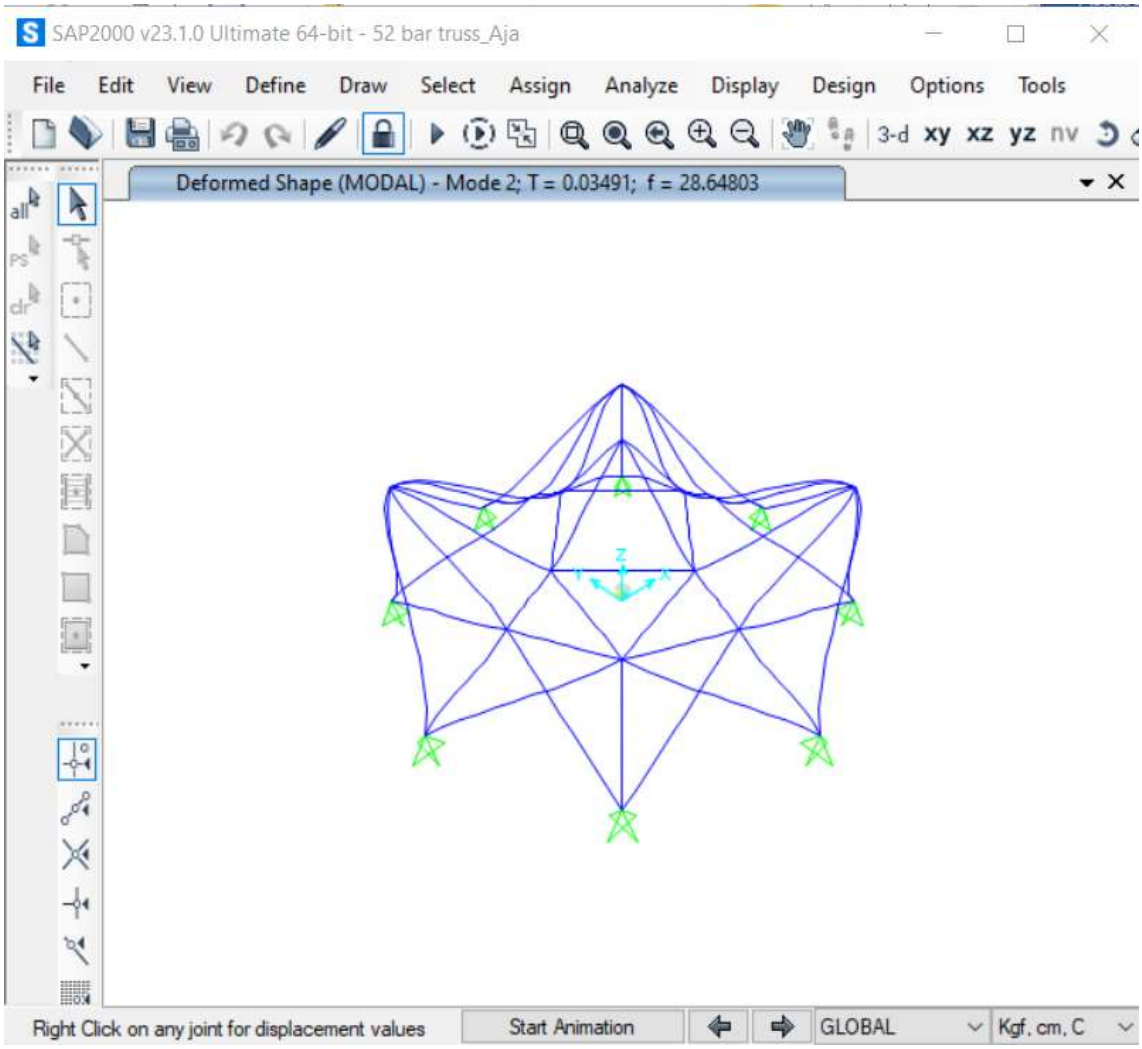


Şekil 4.6. AJA ile optimize edilmiş 52 elemanlı kubbe kafesin son görünüşü

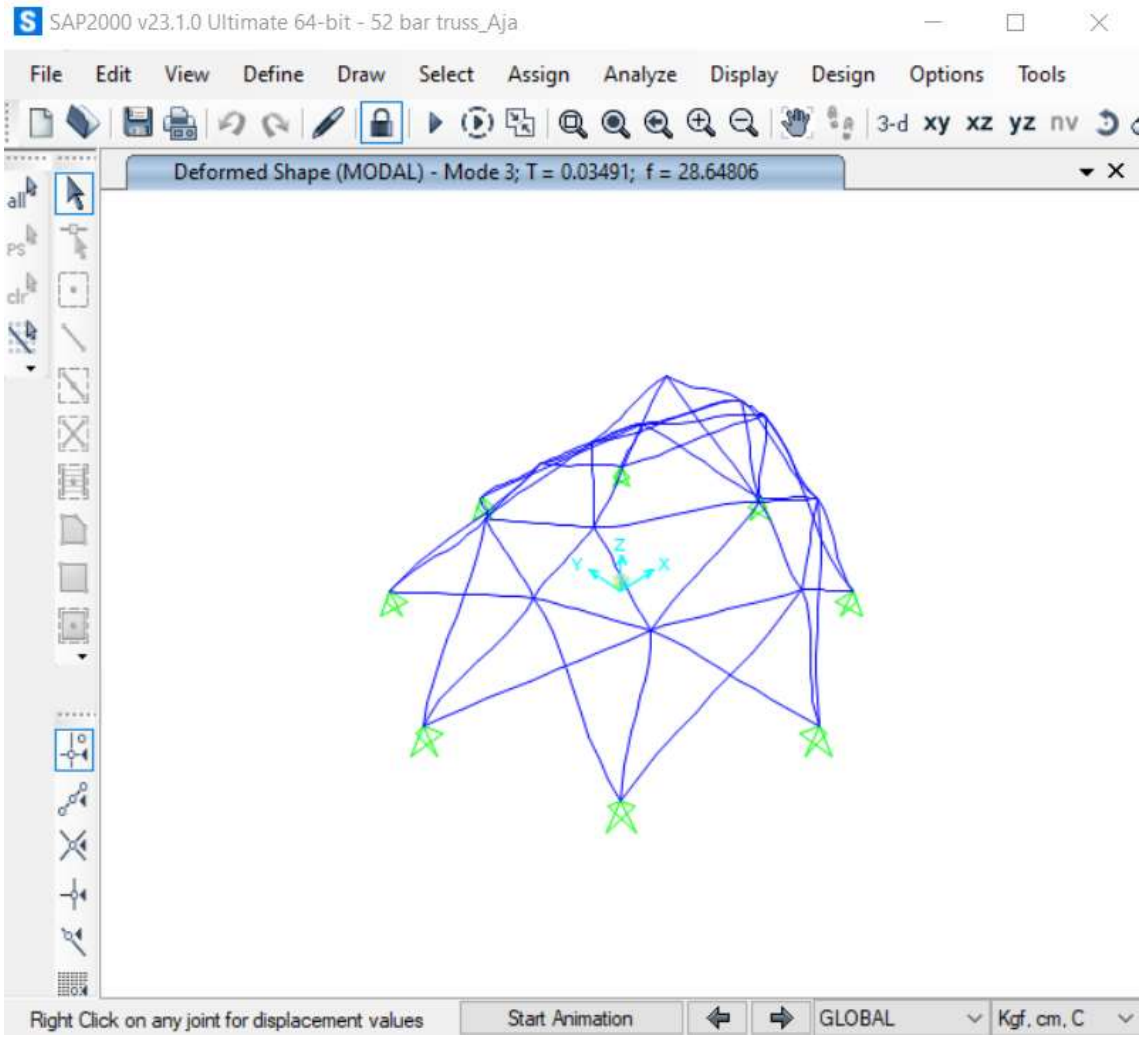
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk dört moduna ait sonuçlar Şekil 4.7.(a-d)'de sunulmuştur. Şekil 4.7.'den görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



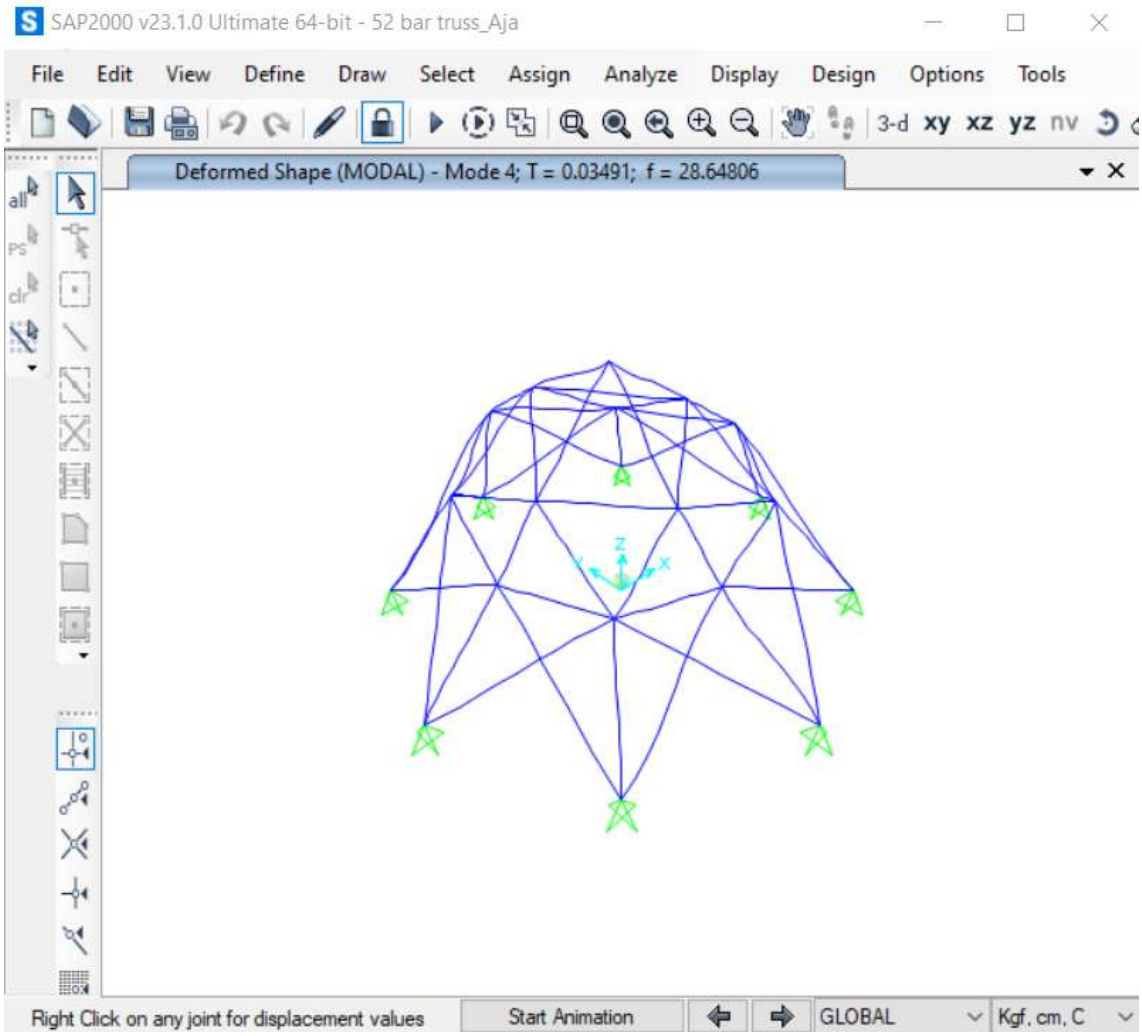
Şekil 4.7.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının 1. Modu



Şekil 4.7.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının 2. Modu

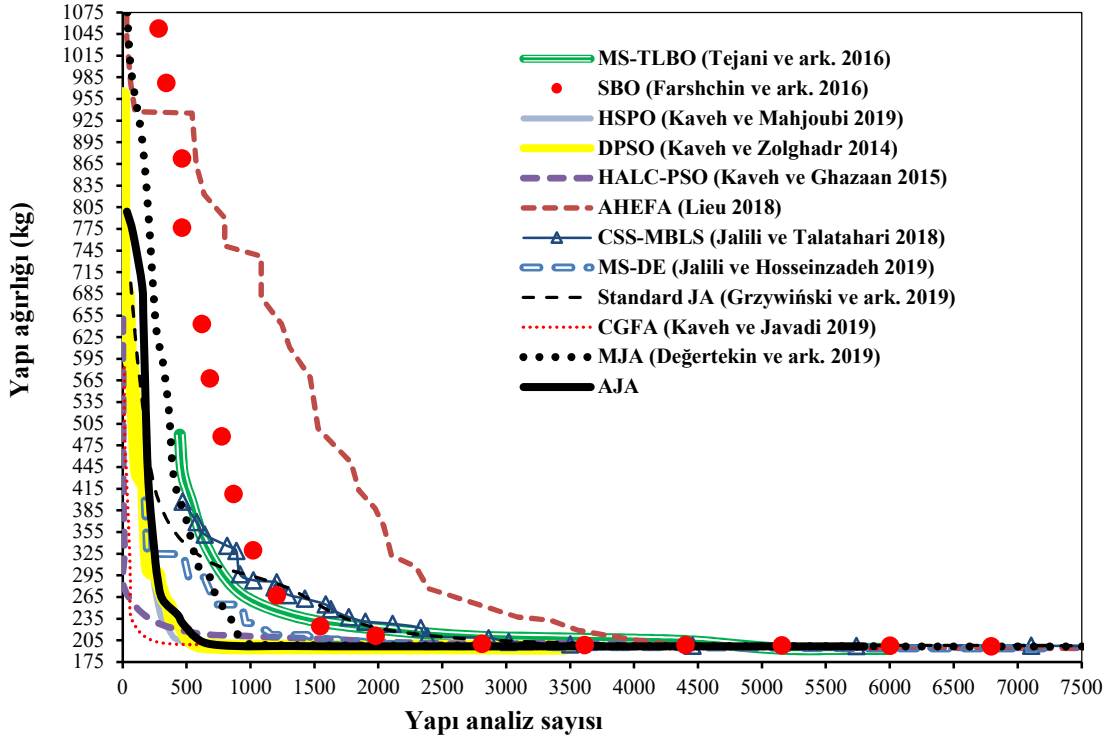


Şekil 4.7.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının 3. Modu



Şekil 4.7.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 52 elemanlı kubbe kafes yapının 4. Modu

AJA'nın ve diğer yöntemlerin yakınsama eğrileri Şekil 4.8.'de karşılaştırılmıştır. Yapı analiz sayısı eğrilerin net bir şekilde kıyaslanabilmesi için 7500 ile sınırlandırılmıştır. AJA sadece 500-1000 yapısal analizden sonra optimum sonuca yakınsamaya başlayarak yaklaşık 5000 yapı analizinden sonra optimum çözümü bulabilmiştir. Bu durum AJA'nın yakınsama kabiliyetinin gücünü ispatlamaktadır. MJA (Değertekin ve ark. 2019), MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016) , CGFA (Kaveh ve Javadi 2019), MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019) ve HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015) algoritmaları ise 6000 ile 7500 yapı analizi sonucunda optimum tasarıma ulaşmıştırlar. Bunun yanında, CGFA, MS-DE ve HALC-PSO yöntemleri optimizasyon işlemine, AJA'dan daha iyi popülasyonlardan başlasalar bile nihayetinde AJA'dan daha fazla yapısal analiz ile optimizasyon sürecini tamamlamıştırlar.

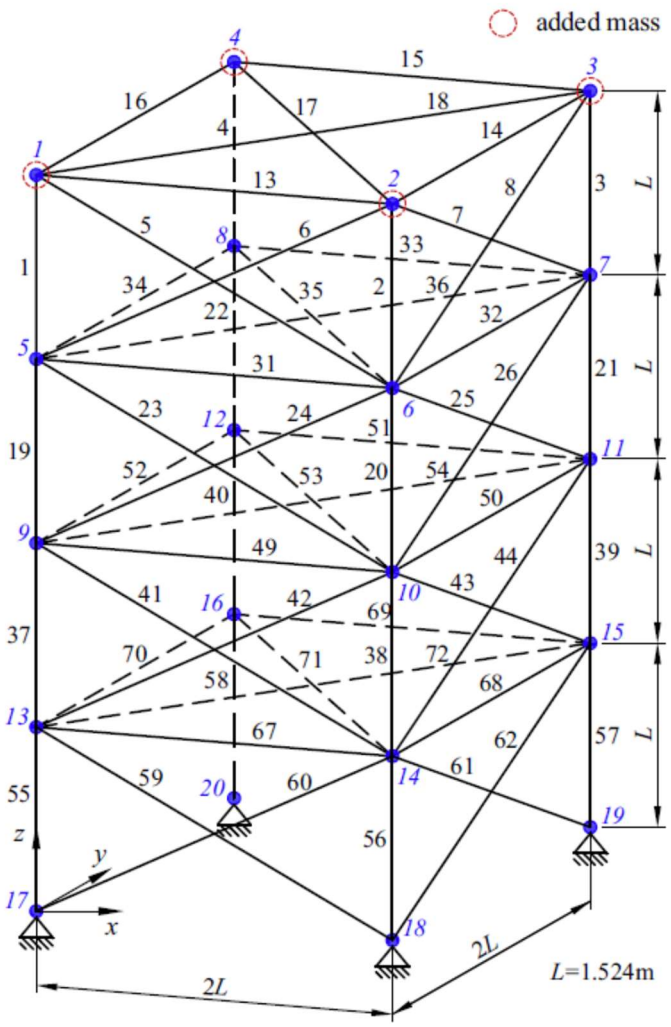


Şekil 4.8. 52 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

AJA'nın, standart JA (Grzywiński ve ark. 2019) ve MJA (Değertekin ve ark. 2019)'dan daha iyi bir yakınsamaya sahip olduğu da Şekil 4.8.'de açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum AJA'da uygulanan stratejilerin doğru olduğunu ve yöntemi güçlendirdiğini ispatlamaktadır.

4.1.3. 72 Elemanlı Uzay Kafes Yapı

Bu tez çalışmasındaki üçüncü tasarım problemi, Şekil 4.9.'da verilen 72 elemanlı uzay kafes yapının ağırlık optimizasyonudur. Kafes yapı Çizelge 4.7.'de verilen 16 tasarım değişkenine sahiptir. Kafes sistemin en üstteki dört düğüm noktasına 2270 kg kütle ilave edilmiştir. Kafes yapı daha önce MJA (Değertekin ve ark. 2019), öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016), rulet seçimli diferansiyel evrim ReDE (Ho-Huu ve ark. 2018), uyarlanabilir simbiyotik organizma araştırması SOS-ABF2 (Tejani ve ark. 2016) ve geliştirilmiş simbiyotik organizma arama ISOS (Tejani ve ark. 2018), titreşimli parçacık sistemi VPS (Kaveh ve Ghazaan 2017), çevrimsel partenogeniz algoritması CPA (Kaveh ve Zolghadr 2017), zenginleştirilmiş yapay koroner damar devridaim optimizasyonu EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019), hipotrokoid spiral optimizasyonu HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019), parçacık küme optimizasyonu esaslı armoni arama HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 20015) ve adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması AHEFA (Lieu 2018) yöntemleriyle optimize edilmiştir. Çizelge 4.7.'de AJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.8.'de ise Çizelge 4.7.'deki tasarım sonuçlarına ait ilk beş doğal frekans değeri verilmiştir.



Şekil 4.9. 72 elemanlı uzay kafes yapı şekli (Lieu 2018)

Çizelge 4.7.'den AJA ile 5360 yapı analizinden sonra optimum ağırlığı 324.9563 kg olan MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016), ReDE (Ho-Huu ve ark. 2018), SOS-ABF2 (Tejani ve ark. 2016), HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019) ve AHEFA (Lieu 2018) ile daha hafif tasarımlar elde edilmesine bu yöntemlerin 3. doğal frekans sınırlayıcısını ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın AJA tüm frekans sınırlayıcılarını sağlamıştır. Diğer yöntemlerin ise AJA'dan daha ağır tasarımlara yakınsadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7. 72 elemanlı uzay kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	ReDE (Ho-Huu ve ark. 2018)	SOS-ABF2 (Tejani ve ark. 2016)	ISOS (Tejani ve ark. 2018)	VPS (Kaveh ve Ghazaan 2017)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2017)	EACCS (Kaveh ve Kooshkbaghhi 2019)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
A_1-A_4	3.3335	3.5327	3.6273	3.3563	3.5017	3.3290	3.7122	3.43147	3.3437	3.5612	**3.5163**	**3.4933**
A_5-A_{12}	7.9054	7.8303	7.9416	7.8726	7.9340	7.8410	7.7434	7.84360	7.8688	7.8736	**7.862**	**7.8400**
A_{13}-A_{16}	0.6469	0.6453	0.6460	0.6450	0.6450	0.6450	0.6468	0.64500	0.6450	0.6450	**0.645**	**0.6450**
A_{17}-A_{18}	0.6451	0.6459	0.6450	0.6450	0.6450	0.6450	0.6970	0.64500	0.6450	0.6451	**0.645**	**0.6450**
A_{19}-A_{22}	7.9980	8.0029	7.5653	8.5798	8.0215	8.4160	8.2884	8.03902	8.1626	7.9710	**7.965**	**7.9850**
A_{23}-A_{30}	7.7682	7.9135	8.0171	7.6566	7.9826	8.1600	8.2141	7.93058	7.9502	7.8928	**7.962**	**7.9650**
A_{31}-A_{34}	0.6450	0.6451	0.6714	0.7417	0.6450	0.6450	0.6658	0.64502	0.6452	0.6450	**0.645**	**0.6450**
A_{35}-A_{36}	0.6450	0.6451	0.6450	0.6450	0.6450	0.6450	0.6743	0.64500	0.6450	0.6451	**0.645**	**0.6450**
A_{37}-A_{40}	12.8748	12.7626	13.4781	13.0864	12.8175	13.078	12.150	12.7040	12.2668	12.5404	**12.731**	**12.6130**
A_{41}-A_{48}	8.0855	7.9657	7.6531	8.0764	8.1129	8.0430	7.8700	7.96843	8.1845	7.9639	**7.996**	**8.0030**
A_{49}-A_{52}	0.6450	0.6452	0.6450	0.6450	0.6450	0.6450	0.7058	0.64505	0.6451	0.6459	**0.645**	**0.6450**
A_{53}-A_{54}	0.6450	0.6450	0.6450	0.6937	0.6450	0.6450	0.6526	0.64500	0.6451	0.6462	**0.645**	**0.6450**
A_{55}-A_{58}	17.041	16.9041	16.6583	16.2517	17.3362	16.943	17.0882	17.0169	17.9632	17.1323	**16.93**	**17.0510**
A_{59}-A_{66}	8.0003	8.0434	8.1609	8.1703	8.1010	8.1430	7.9472	8.01267	8.1292	8.0216	**8.044**	**8.0540**
A_{67}-A_{70}	0.6450	0.6451	0.6450	0.6450	0.6450	0.6470	0.6450	0.64500	0.6450	0.6450	**0.645**	**0.6450**
A_{71}-A_{72}	0.6495	0.6473	0.6450	0.6450	0.6450	0.6530	0.7462	0.64500	0.6450	0.6451	**0.645**	**0.6450**
En iyi ağırlık (kg)	324.375	324.246	324.6897	325.068	327.649	328.490	325.195 *	324.233	327.77	324.237	**324.971**	**324.9563 [325.068][1] [327.649][2] [324.971][3]**
Ortalama ağırlık (kg)	325.749	324.321	328.4621	329.469	327.670	330.490	**	325.418	327.990	324.410	**325.733**	**325.2970**
SD (kg)	0.9186	0.0516	2.460	2.6642	0.0180	1.840	**	0.8985	0.190	0.242	**0.43**	**0.36**
CV (%)	0.1649	0.1687	0.1682	0.1560	0.5473	0.6205	0.0292	0.1642	0.5473	0.1704	**0.0000**	**0.0000**
NSA	4000	10840	4000	4000	4720	12800	12000*	8820	8000	8860	**7450**	**5360**

[1]AJA ISOS'un (Tejani ve ark. 2016) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 3850. analizdeki bir ara tasarımda elde etmiştir
[2]AJA VPS'nin (Kaveh ve Ghazaan 2017) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 3180. analizdeki bir ara tasarımda elde etmiştir
[3]AJA MJA'nın (Değertekin ve ark. 2019) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 5250. analizdeki bir ara tasarımda elde etmiştir
* Optimize edilmiş EACCS'nin optimum ağırlığı Kaveh ve Kooshkbahhi (2019) referansında verilmemiştir. Yapı ağırlığı ve yapı analiz sayısı bu refran staki bilgiler ışığında tahmin edilmiştir
**Mevcut değil

Çizelge 4.8. 72 elemanlı uzay kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

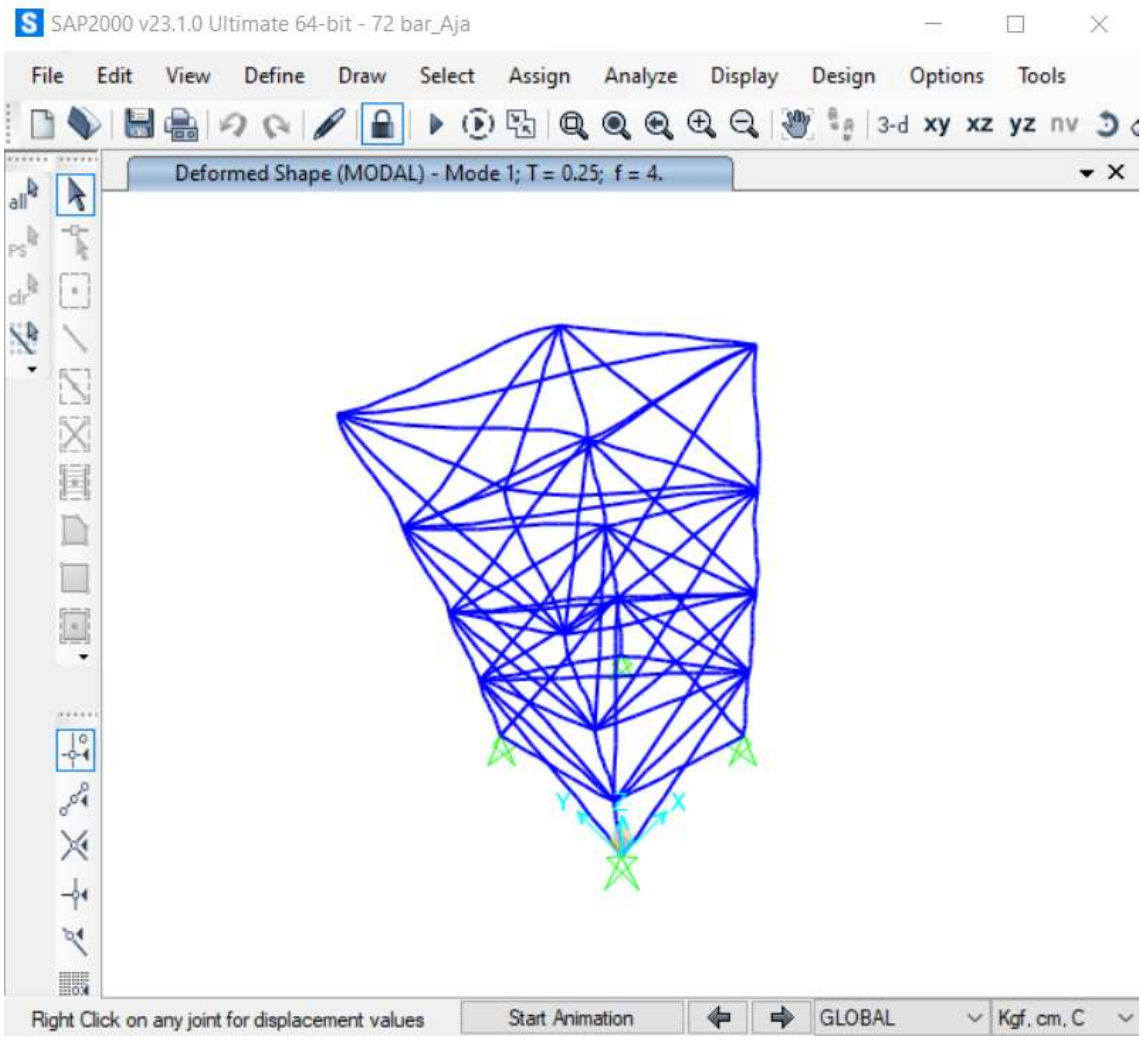
Frekans numarası (Hz)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	ReDE (Ho-Huu ve ark. 2018)	SOS-ABF2 (Tejani ve ark. 2016)	ISOS (Tejani ve ark. 2018)	VPS (Kaveh ve Ghazaan 2017)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2017)	EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	4.0011	4.0000	4.0013	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.000	4.0004	**4.0000**	**4.0000**
1*	**3.9999**	**3.9988**	**4.0001**	**3.9986**	**4.0219**	**4.0248**	**3.9988**	**3.9986**	**4.0219**	**3.9988**	**4.0000**	**4.0000**
2	4.0011	4.0000	4.0013	**	4.0002	4.0000	4.0000	**	4.000	4.0004	**4.0000**	**4.0000**
3	6.0003	6.0001	6.0002	6.0008	6.0000	6.0000	6.0007	6.0000	6.000	5.9898	**6.0003**	**6.0001**
3*	**5.9901**	**5.9899**	**5.9899**	**5.9906**	**6.0251**	**6.0299**	**5.9905**	**5.9902**	**6.0251**	**5.9898**	**6.0003**	**6.0001**
4	6.2625	6.2762	6.2750	**	6.2428	6.238	6.4325	**	6.230	6.2702	**6.2645**	**6.2623**
5	9.0871	9.1073	9.1536	**	9.0698	9.035	9.1635	**	9.041	9.1094	**9.1060**	**9.1009**

* SAP 2000 v23 ile elde edilen birinci ve üçüncü doğal frekans değeri
**Mevcut değil

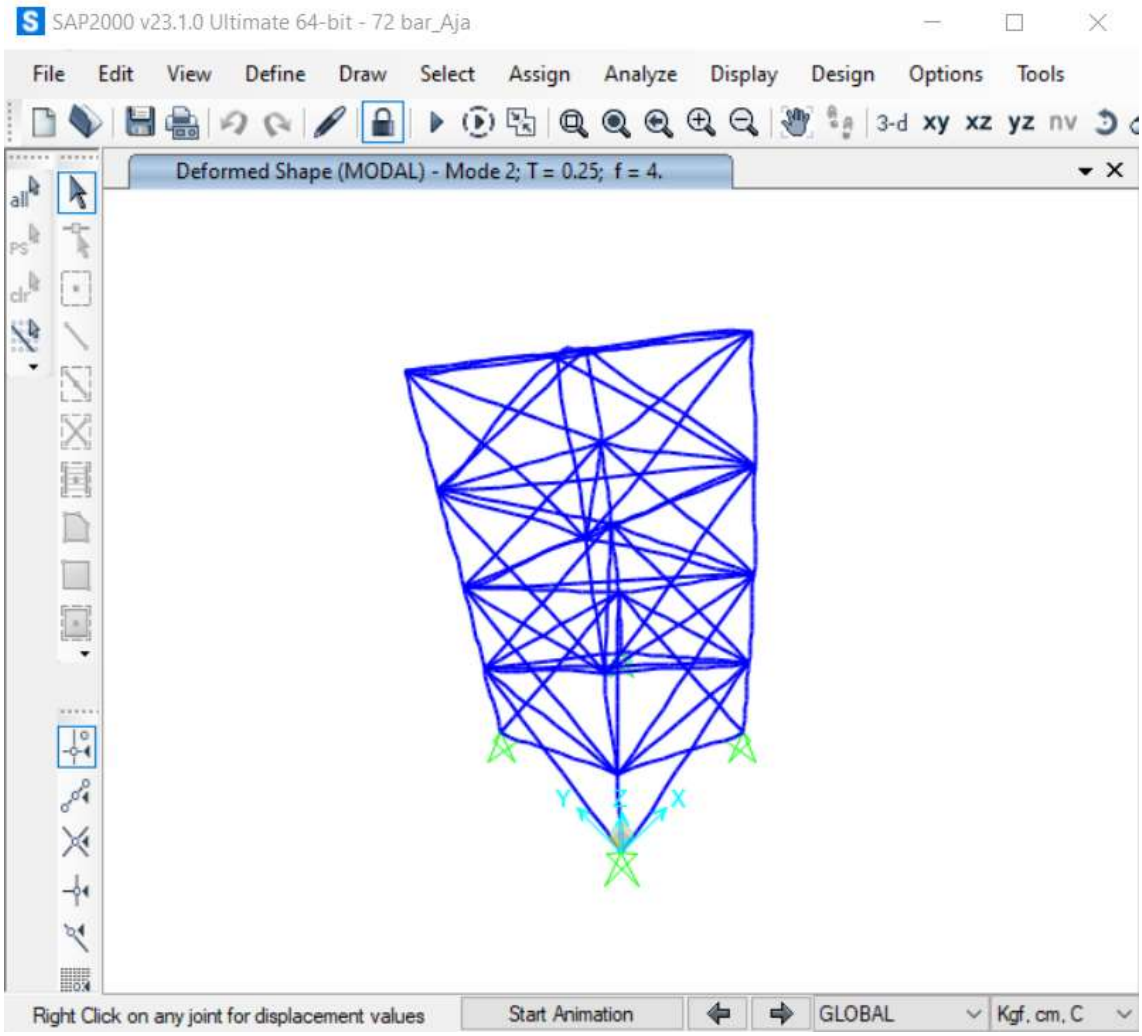
Çizelge 4.7.'den AJA'nın bu test problemi için de genel olarak en hızlı optimizasyon yöntemi olduğu gösterilmiştir. Aslında, MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016), SOS-ABF2 (Tejani ve ark. 2016) ve ISOS (Tejani ve ark. 2018), 5360 AJA analizine karşın 4000 analiz ile optimizasyon sürecini tamamlamıştır, ancak bu yöntemler optimum çözümde tasarım sınırlayıcılarını ihlal etmiştir.

Çizelge 4.7.'den, AJA'nın ortalama optimum ağırlık açısından ReDE (Ho-Huu ve ark. 2018) ve AHEFA (Lieu 2018)' dan sonra 3. sırada olduğunu ve standart sapma açısından diğer algoritmalara oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, AJA frekans sınırlayıcılarını tam olarak sağlarken MJA dışındaki yöntemlerin sınırlayıcıları ihlal ettiği unutulmamalıdır.

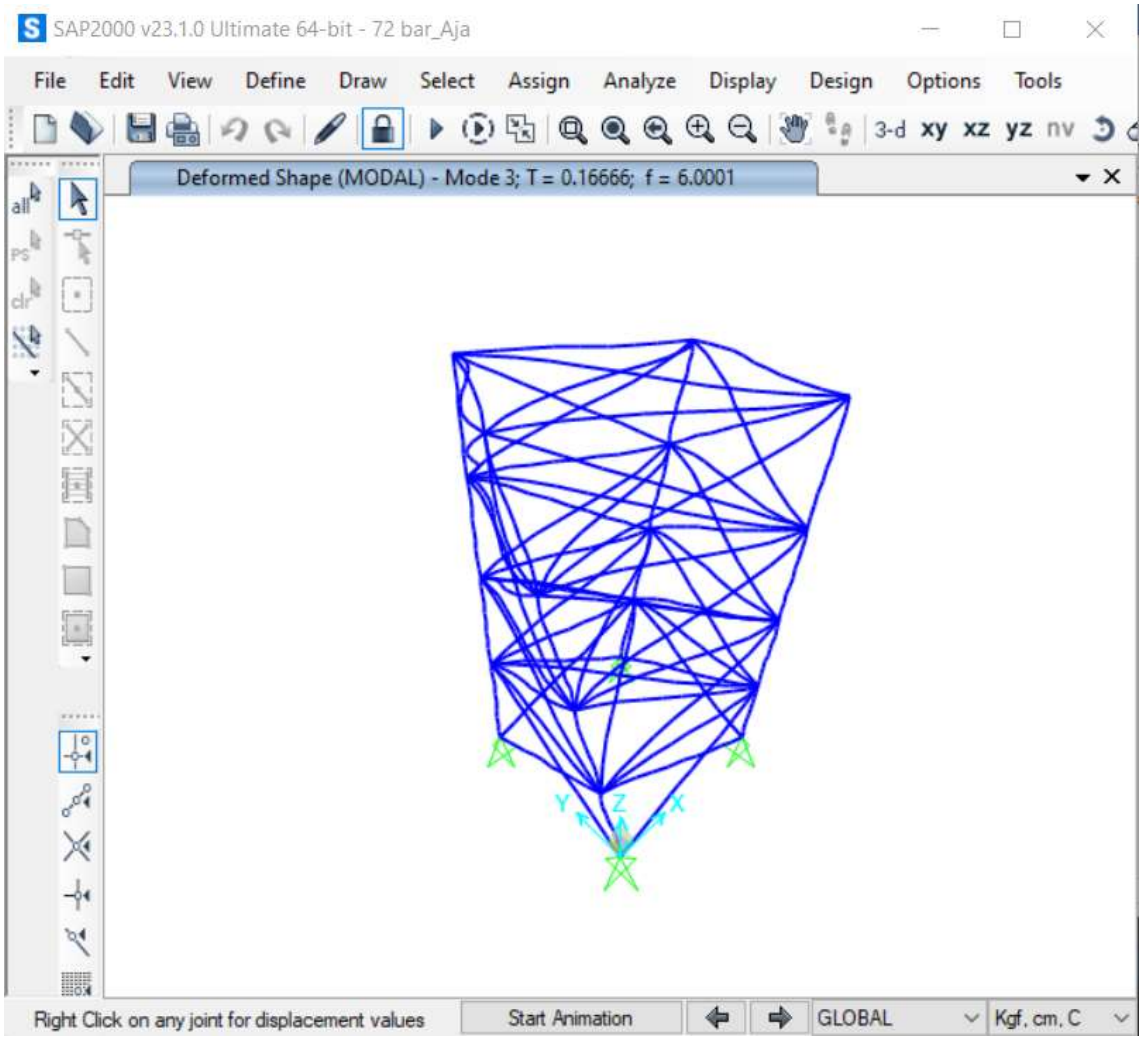
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk beş moduna ait sonuçlar Şekil 4.10.(a-e)'de sunulmuştur. Şekil 4.10.'dan görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



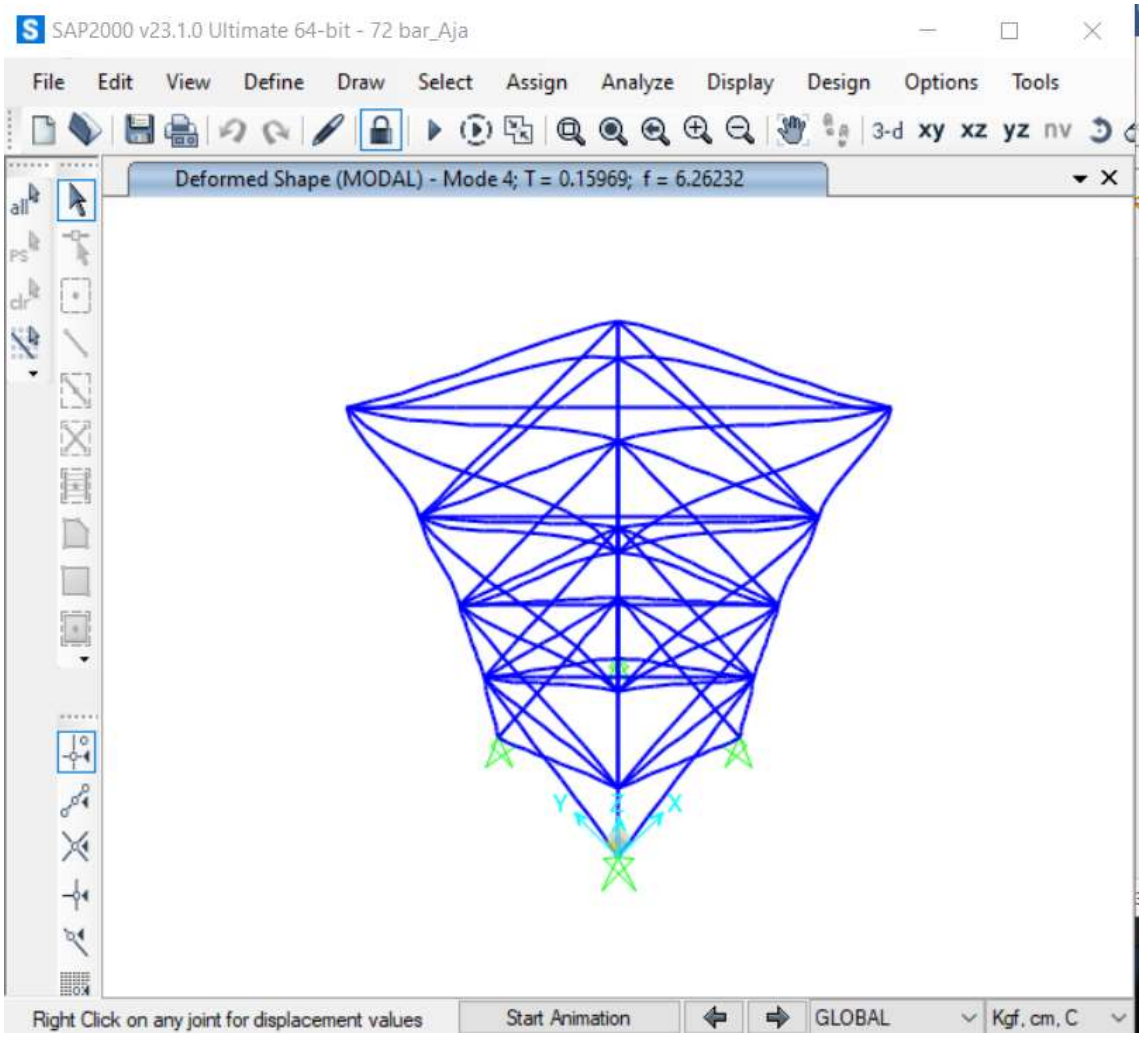
Şekil 4.10.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının 1. Modu



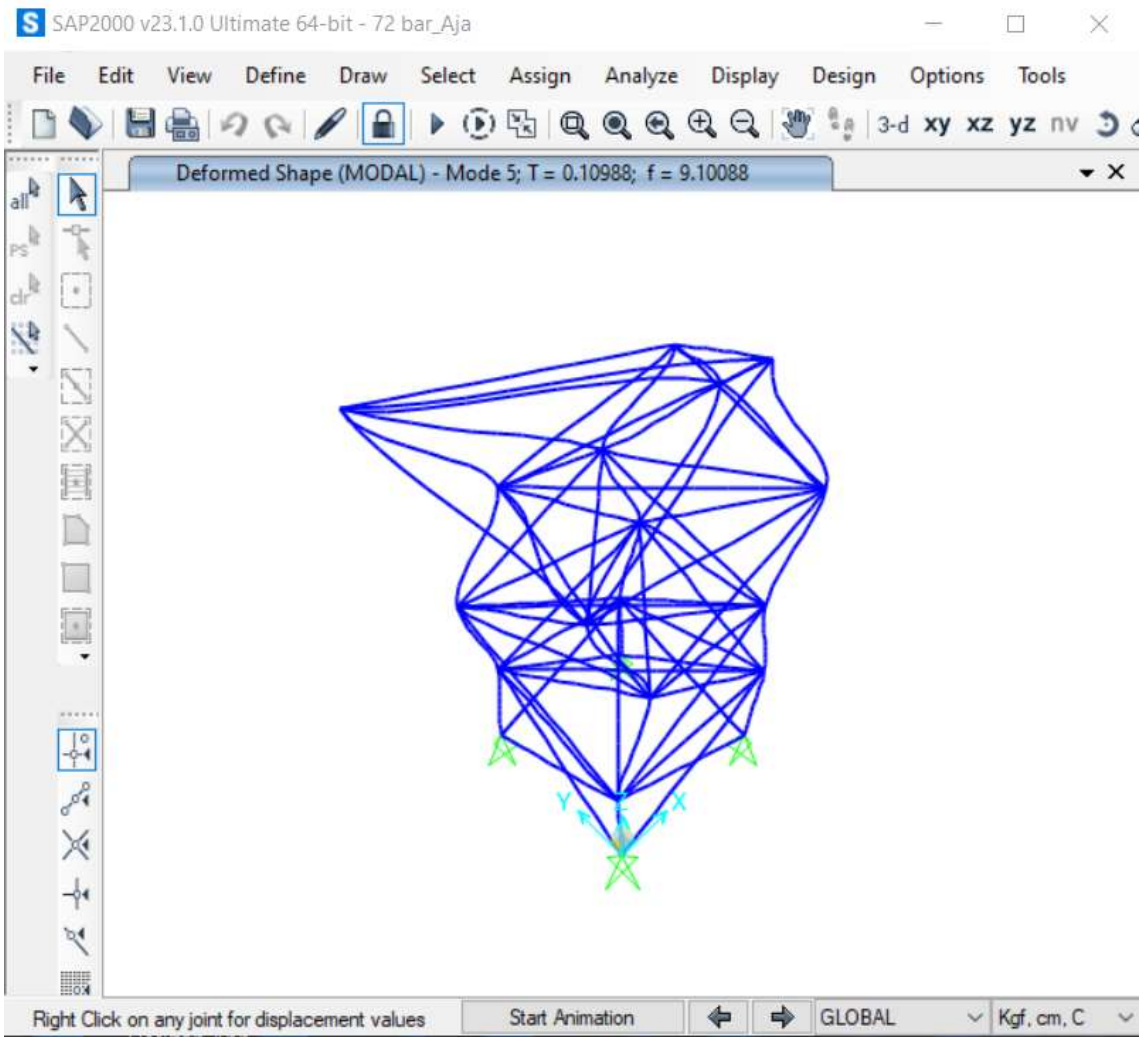
Şekil 4.10.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının 2. Modu



Şekil 4.10.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının 3. Modu

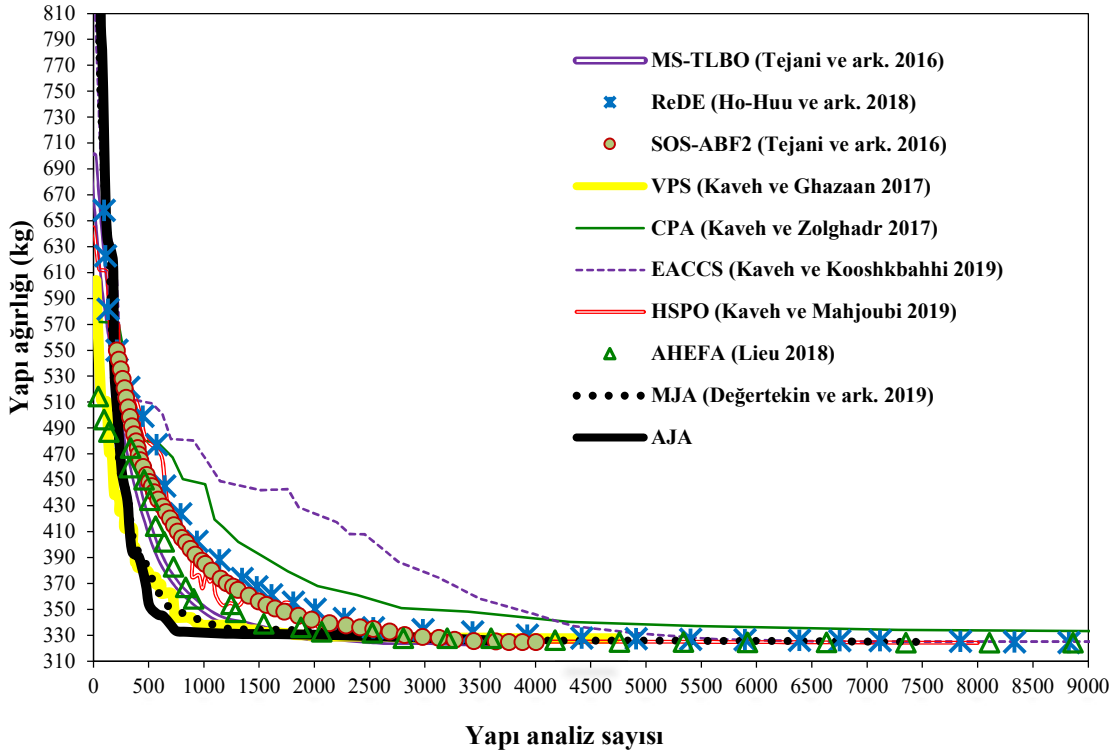


Şekil 4.10.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının 4. Modu



Şekil 4.10.(e). SAP 2000 V23 ile modellenen 72 elemanlı uzay kafes yapının 5. Modu

Şekil 4.11.'de, farklı yöntemlerin yakınsama eğrileri AJA ile kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. AJA yalnızca 1354 yapı analizinden sonra nihai optimumdan yaklaşık % 1.9 daha ağır bir tasarım bulabilmiştir. Bu durum AJA'nın optimum çözüme yakınsamadaki hızını ispatlamaktadır.



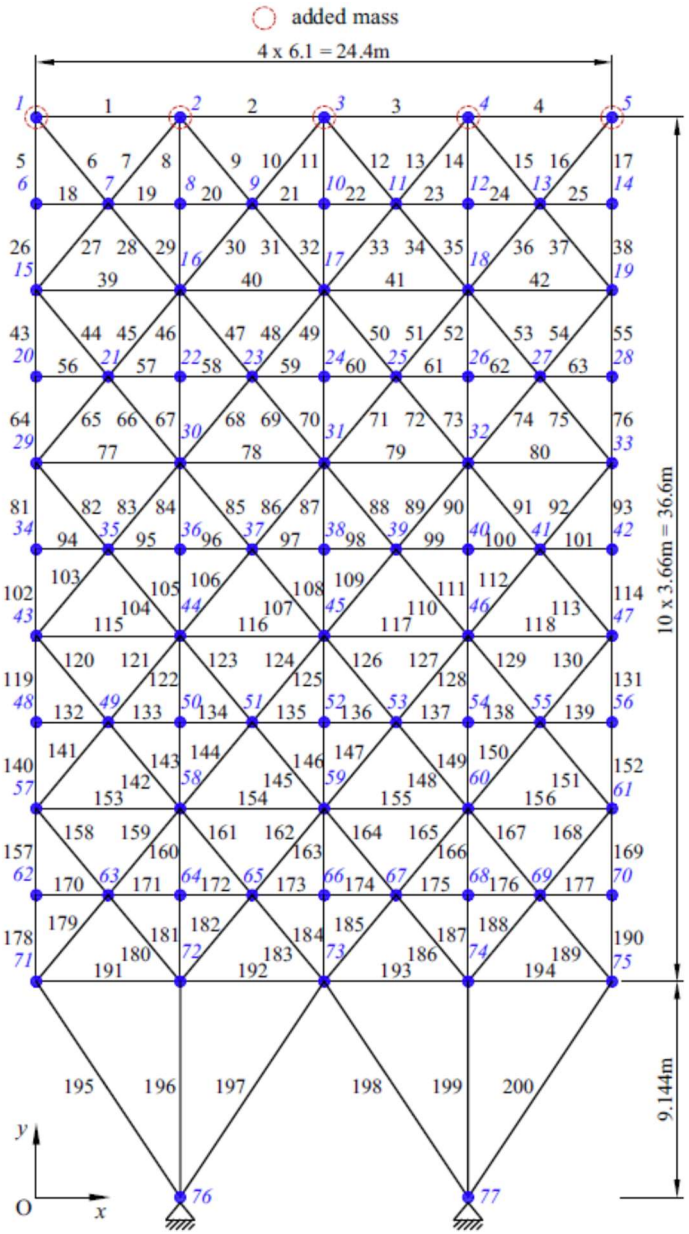
Şekil 4.11. 72 elemanlı uzay kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

4.1.4. 200 Elemanlı Düzlem Kafes Yapı

Bu tez çalışmasının dördüncü test problemi, Şekil 4.12.'de gösterilen 200 elemanlı düzlem kafes yapıdır . Bu tasarım, ayrıntılı biçimde verilen 29 tasarım değişkeninden oluşmaktadır. Kafesin üst düğüm noktalarına 100 kg'lık kütle eklenmiştir.

Çizelge 4.9. 200 elemanlı düzlem kafes yapının tasarım değişkenleri ve eleman numaraları

Tasarım değişkenleri	Eleman numarası	Tasarım değişkenleri	Eleman numarası
1	1,2,3,4	16	82,83,85,86,88,89,91,92,103,104, 106,107,109,110,112,113
2	5,8,11,14,17	17	115,116,117,118
3	19,20,21,22,23,24	18	119,122,125,128,131
4	18,25,56,63,94,101,132,139,170,177	19	133,134,135,136,137,138
5	26,29,32,35,38	20	140,143,146,149,152
6	6,7,9,10,12,13,15,16,27, 28,30,31,33,34,36,37	21	120,121,123,124,126,127,129,130 141,142,144,145,147,148,150,151
7	39,40,41,42	22	153,154,155,156
8	43,46,49,52,55	23	157,160,163,166,169
9	57,58,59,60,61,62	24	171,172,173174,175,176
10	64,67,70,73,76	25	178,181,184,187,190
11	44,45,47,48,50,51,53,54,65, 66,68,69,71,72,74,75	26	158,159,161,162,164,165,167,168 179,180,182,183,185,186,188,189
12	77,78,79,80	27	191,192,193,194
13	81,84,87,90,93	28	195,197,198,200
14	95,96,97,98,99,100	29	196,199
15	102,105,108,111,114		



Şekil 4.12. 200 elemanlı düzlem kafes yapının görünüşü (Lieu 2018)

Çizelge 4.10.'da, AJA ile elde edilen sonuçlar MJA (Değertekin ve ark. 2019), öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016), zenginleştirilmiş biyocoğrafya esaslı opimizasyon EBBO (Taheri ve Jalili 2016), uyarlanabilir simbiyotik organizma araştırması SOS-ABF2 (Tejani ve ark. 2016), ortogontal çoklu yerçekimsel arama OMGSA (Kahatibibnia ve Naseralavi 2014), zenginleştirilmiş yapay koroner damar devridaim optimizasyonu EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019), hipotrokoid spiral optimizasyonu HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019),

parçacık küme optimizasyonu esaslı armoni arama HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015), adaptif hibrid evrimsel ateşböceği algoritması AHEFA (Lieu 2018), göç esaslı local arama mekanizmalı hibrid yüklü sistem araması CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018) ve göç arama stratejili diferansiyel evrim (MS-DE) (Jalili ve Hosseinzadeh 2019) yöntemleri ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.10.'da görüldüğü üzere AJA ve MJA 2171.3487 kg ve 2171.51 kg yapı ağırlığına sahip sınırlayıcıları sağlayan optimum tasarımlar elde etmişlerdir. Diğer yöntemler, 2156.3651 kg ile 2164.884 kg arasında değişen yapı ağırlıklarına sahip tasarımlar bulmalarına karşın Çizelge 4.11.'de görüldüğü gibi % 0.2773-% 1.076 arasında değişen değerlerle birinci ve üçüncü doğal frekans sınırlayıcılarını ihlal etmişlerdir.

Çizelge 4.10. 200 elemanlı düzlem kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	EBBO (Taheri ve Jalili 2016)	SOS-ABF1 (Tejani ve ark. 2016)	OMGSA (Kahatibi bnia ve Naseralavi 2014)	EACCS (Kaveh ve Kooshkbahhi 2019)	HSPO (Kaveh ve Mahjoubi 2019)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghazaan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	CSS-MBLS (Jalili ve Talatahari 2018)	MS-DE (Jalili ve Hosseinzadeh 2019)	**MJA-(Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	0.29167	0.3059	0.2822	0.2890	0.3175	0.30143	0.3072	0.2993	0.3069	0.3027	**0.28975**	**0.30785**
2	0.48527	0.4539	0.5014	0.4860	0.4452	0.45938	0.4545	0.4508	0.4524	0.4533	**0.49163**	**0.47168**
3	0.10005	0.1000	0.1071	0.1000	0.1004	0.07811	0.1000	0.1001	0.1000	0.1002	**0.10000**	**0.10020**
4	0.1000	0.1000	0.1002	0.1000	0.1004	0.09830	0.1000	0.1000	0.1001	0.1003	**0.1000**	**0.1001**
5	0.49666	0.5210	0.5277	0.4990	0.4964	0.50624	0.5080	0.5123	0.5131	0.5112	**0.57060**	**0.54175**
6	0.8318	0.8260	0.8248	0.8040	0.8226	0.81990	0.8276	0.8205	0.8237	0.8169	**0.8230**	**0.8184**
7	0.10000	0.1000	0.1300	0.1030	0.1095	0.10000	0.1023	0.1011	0.1003	0.1005	**0.10001**	**0.10096**
8	1.40851	1.4619	1.4016	1.3770	1.3878	1.39676	1.4357	1.4156	1.4161	1.4093	**1.43960**	**1.42367**
9	0.10000	0.1001	0.1000	0.1000	0.1006	0.10000	0.1007	0.1000	0.1003	0.1001	**0.10018**	**0.10006**
10	1.58732	1.5839	1.4657	1.5540	1.5465	1.57350	1.5528	1.5742	1.5917	1.5887	**1.56835**	**1.63199**
11	1.1249	1.1426	1.1327	1.1510	1.1514	1.14900	1.1529	1.1597	1.1618	1.1619	**1.1678**	**1.1373**
12	0.10078	0.1028	0.1196	0.1310	0.1592	0.11859	0.1522	0.1338	0.1293	0.1364	**0.10188**	**0.10000**
13	2.98830	2.9913	3.0262	3.0280	2.9979	3.10264	2.9564	2.9672	2.8813	2.9712	**3.00000**	**2.97378**
14	0.10234	0.1000	0.2527	0.1010	0.1007	0.10000	0.1003	0.1000	0.1004	0.1009	**0.10000**	**0.10072**
15	3.33456	3.3607	3.3267	3.2610	3.2726	3.24327	3.2242	3.2722	3.1892	3.2506	**3.21900**	**3.32736**
16	1.5990	1.5674	1.5963	1.6120	1.5753	1.59680	1.5839	1.5762	1.5925	1.5839	**1.6076**	**1.5558**
17	0.18763	0.2825	0.2417	0.2090	0.2768	0.24217	0.2818	0.2562	0.2517	0.2615	**0.25003**	**0.23602**
18	5.14985	5.1062	4.8557	5.0200	5.0434	5.39675	5.0696	5.0956	5.1382	5.0886	**4.99953**	**5.20167**
19	0.10059	0.1000	0.1001	0.1330	0.1076	0.10000	0.1033	0.1001	0.1010	0.1033	**0.10028**	**0.10000**
20	5.37321	5.4145	5.4975	5.4530	5.4490	5.25824	5.4657	5.4546	5.4818	5.4265	**5.39931**	**5.47313**
21	2.0885	2.1388	2.0829	2.1130	2.1447	2.14340	2.0975	2.0933	2.1101	2.1086	**2.0875**	**2.0909**
22	0.63412	0.7121	0.8522	0.7230	0.6745	0.82930	0.6598	0.6737	0.6606	0.7051	**0.6911**	**0.6673**
23	7.66597	7.6374	7.5480	7.7240	7.6967	7.30130	7.6585	7.6498	7.6690	7.6910	**7.90209**	**7.53409**
24	0.10000	0.1151	0.1279	0.1820	0.1353	0.11284	0.1444	0.1178	0.1299	0.1079	**0.10040**	**0.10489**
25	7.99043	7.9160	7.6278	7.9710	7.7106	7.91076	8.0520	8.0682	7.9880	7.9069	**7.78816**	**7.87075**

Çizelge 4.10. 200 elemanlı düzlem kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (devamı)

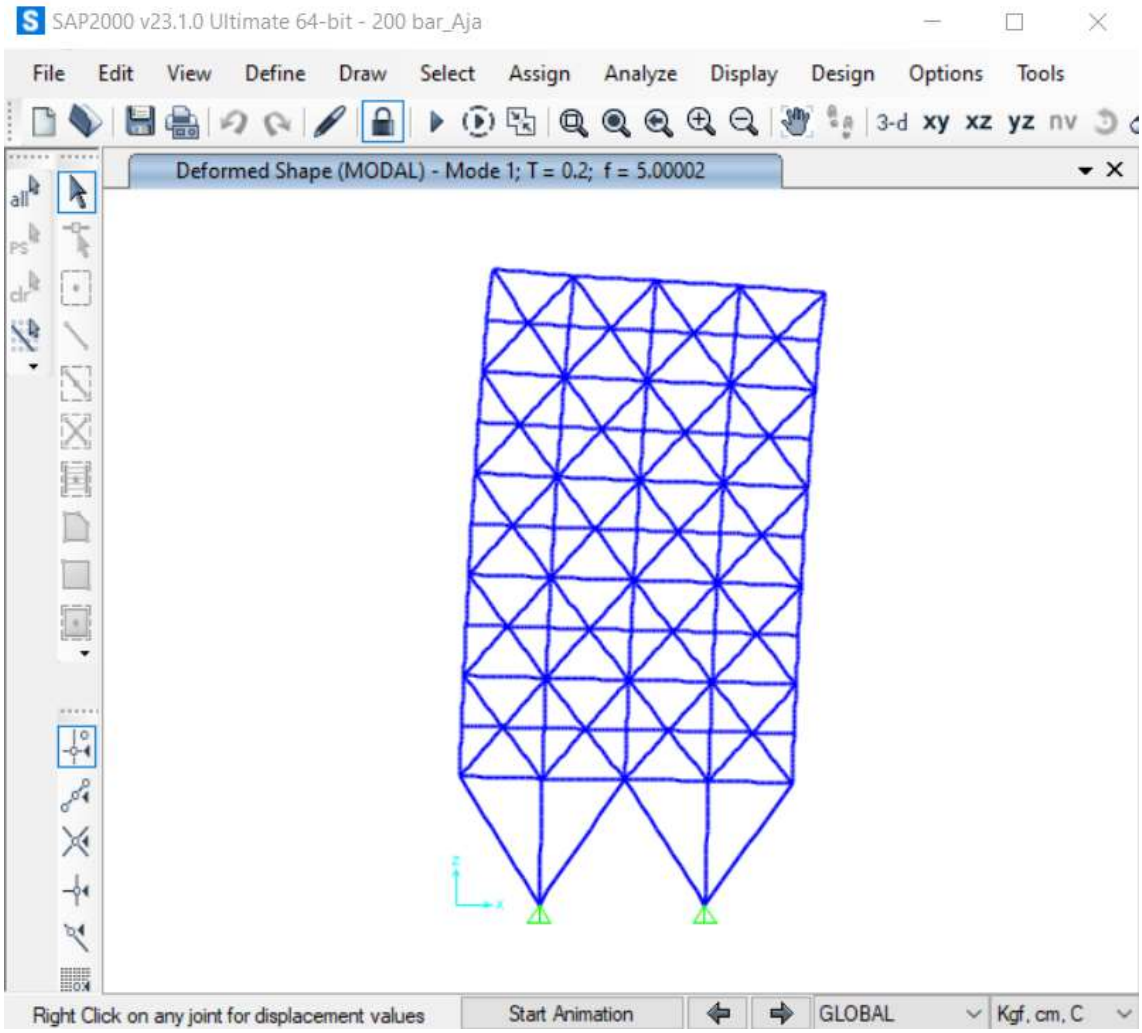
26	2.8246	2.8073	3.0233	2.9960	2.7915	2.86741	2.7889	2.8025	2.8022	2.8211	**2.84150**	**2.81229**
27	10.4271	10.2844	10.3024	10.2060	10.3755	10.8526	10.477	10.5040	10.3988	10.460	**10.6189**	**10.7021**
28	21.4295	21.2686	21.4034	20.6990	21.3364	20.8993	21.325	21.2935	21.1757	21.192	**21.4786**	**21.75078**
29	10.6321	10.7450	10.4810	11.5550	10.7345	10.7514	10.511	10.7410	10.9589	10.793	**10.8049**	**10.44841**
En iyi ağırlık (kg)	2160.35	2156.81	2164.88	2158.64	2156.36	2157.71	2156.7	2160.74	2156.7	2156.6	**2171.51**	**2171.3487**
Ortala. ağırlık (kg)	2214.62	2157.80	2186.57	2167.53	2157.65	2169.04	2157.1	2161.38	2157.4	2156.9	**2172.96**	**2171.573**
SD (kg)	87.1835	1.250	15.2711	1.5860	1.7683	10.8148	0.2413	0.1783	1.0400	0.196	**1.0893**	**0.2113**
CV (%)	0.7553	0.6407	0.2773	0.9920	0.9807	1.0760	0.8407	0.9947	0.9100	0.9460	**0.000**	**0.000**
NSA	10000	16500	10000	7252	23000	11640	13000	11300	9600	13600	**12735**	**10546**

Çizelge 4.11. 200 elemanlı düzlem kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

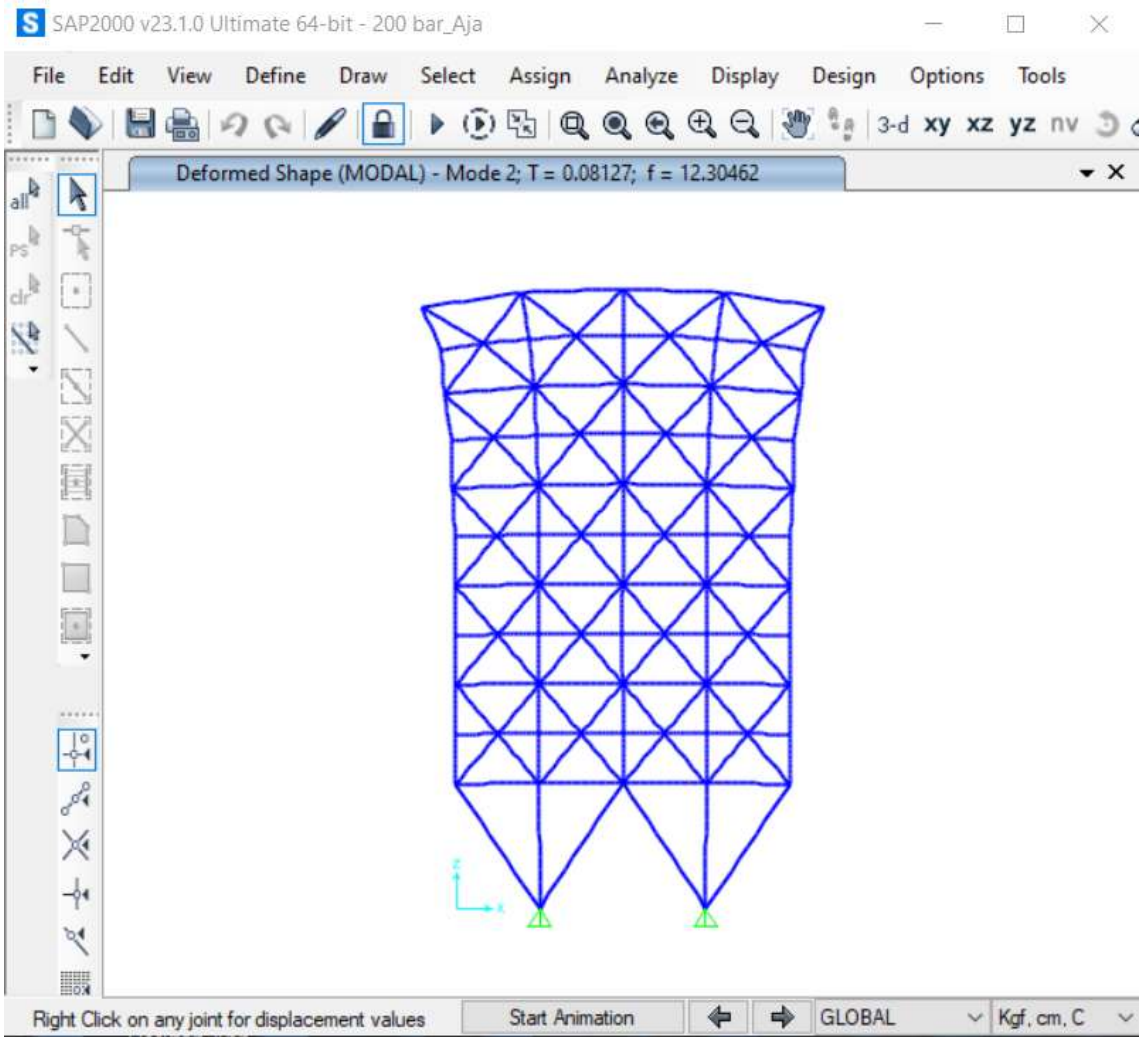
Frekans Numarası (Hz)	MS-TLBO (Tejani ve ark. 2016)	EBBO (Taheri ve Jalili 2016)	SOS-ABF1 (Tejani ve ark. 2016)	OMGSA (Kahatib ibnia ve Naser alavi 2014)	EACCS (Kaveh ve Koos hkbahhi 2019)	HSPO (Kaveh ve Mahj oubi 2019)	HALC-PSO (Kaveh ve Ghaz aan 2015)	AHEFA (Lieu 2018)	CSS-MBLS (Jalili ve Talatahar 2018)	MS-DE (Jalili ve Hosse inzadeh 2019)	**MJA- (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	5.0000	5.0000	5.0001	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	**5.0000**	**5.0000**
1*	**4.9896**	**4.9877**	**4.9897**	**4.9876**	**4.9871**	**4.9882**	**4.98780**	**4.9904**	**4.9878**	**4.9878**	**5.0000**	**5.0000**
2	12.136	12.2666	12.1388	12.118	12.3137	12.1499	12.2540	12.182	12.2480	12.213	**12.1958**	**12.3074**
2*	**12.111**	**12.2374**	**12.1138**	**12.0801**	**12.2835**	**12.1231**	**12.2246**	**12.151**	**12.2195**	**12.1841**	**12.1958**	**12.3074**
3	15.052	15.0766	15.1284	15.029	15.0226	15.0004	15.0440	15.016	15.0340	15.029	**15.0022**	**15.0066**
3*	**14.886**	**14.9039**	**14.9584**	**14.8512**	**14.8529**	**14.8386**	**14.8739**	**14.850**	**14.8635**	**14.8581**	**15.0022**	**15.0066**
4	16.645	16.7338	16.7317	16.639	16.6997	**	16.7180	16.683	16.6780	16.687	**16.6493**	**16.6699**
5	21.268	21.4288	21.1952	21.218	21.4152	**	21.4610	21.354	21.4580	21.417	**21.0859**	**21.1033**

* SAP 2000 v23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri
**Mevcut değil

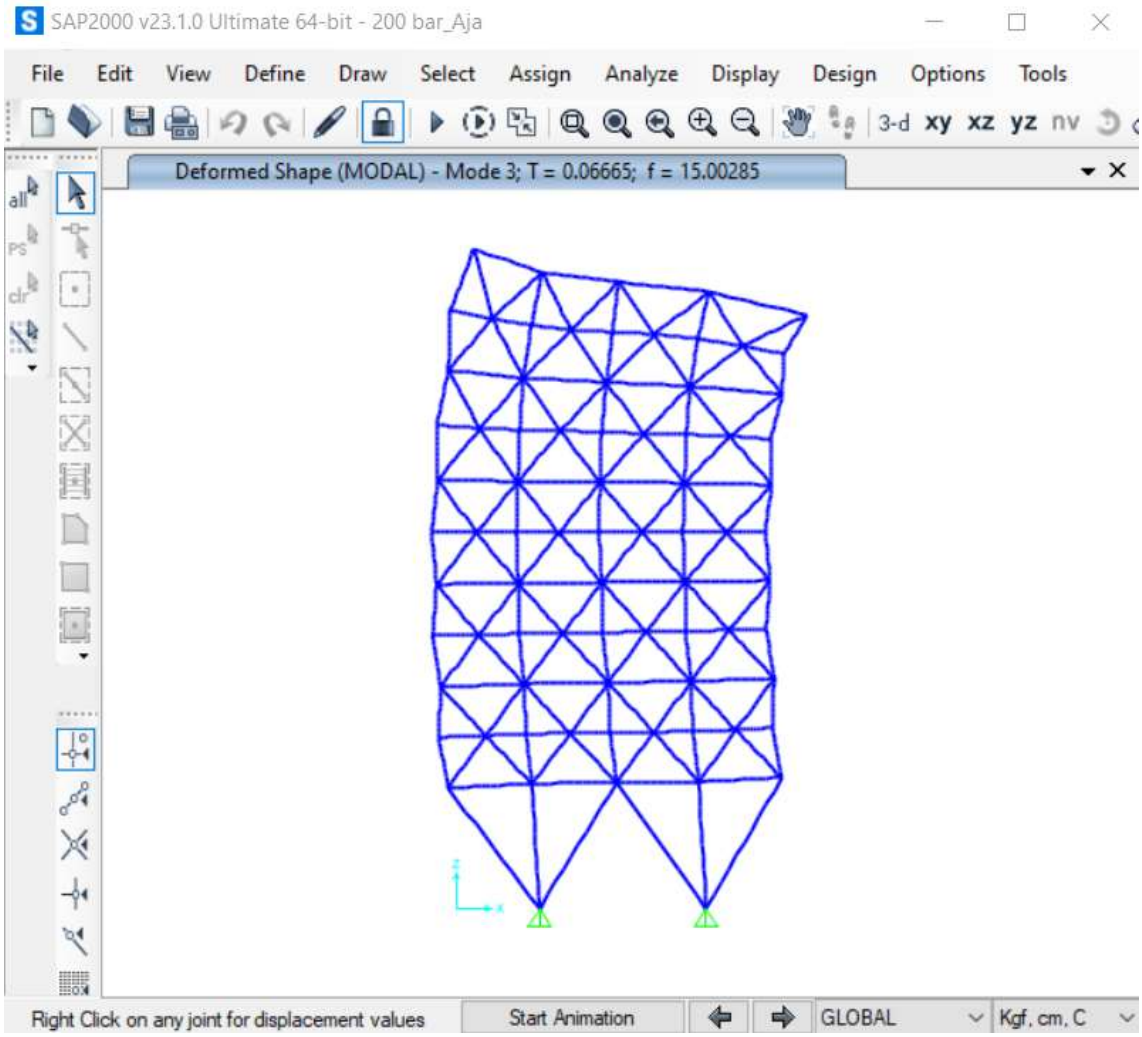
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk beş moduna ait sonuçlar Şekil 4.13.(a-e)'de sunulmuştur. Şekil 4.13.'ten görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



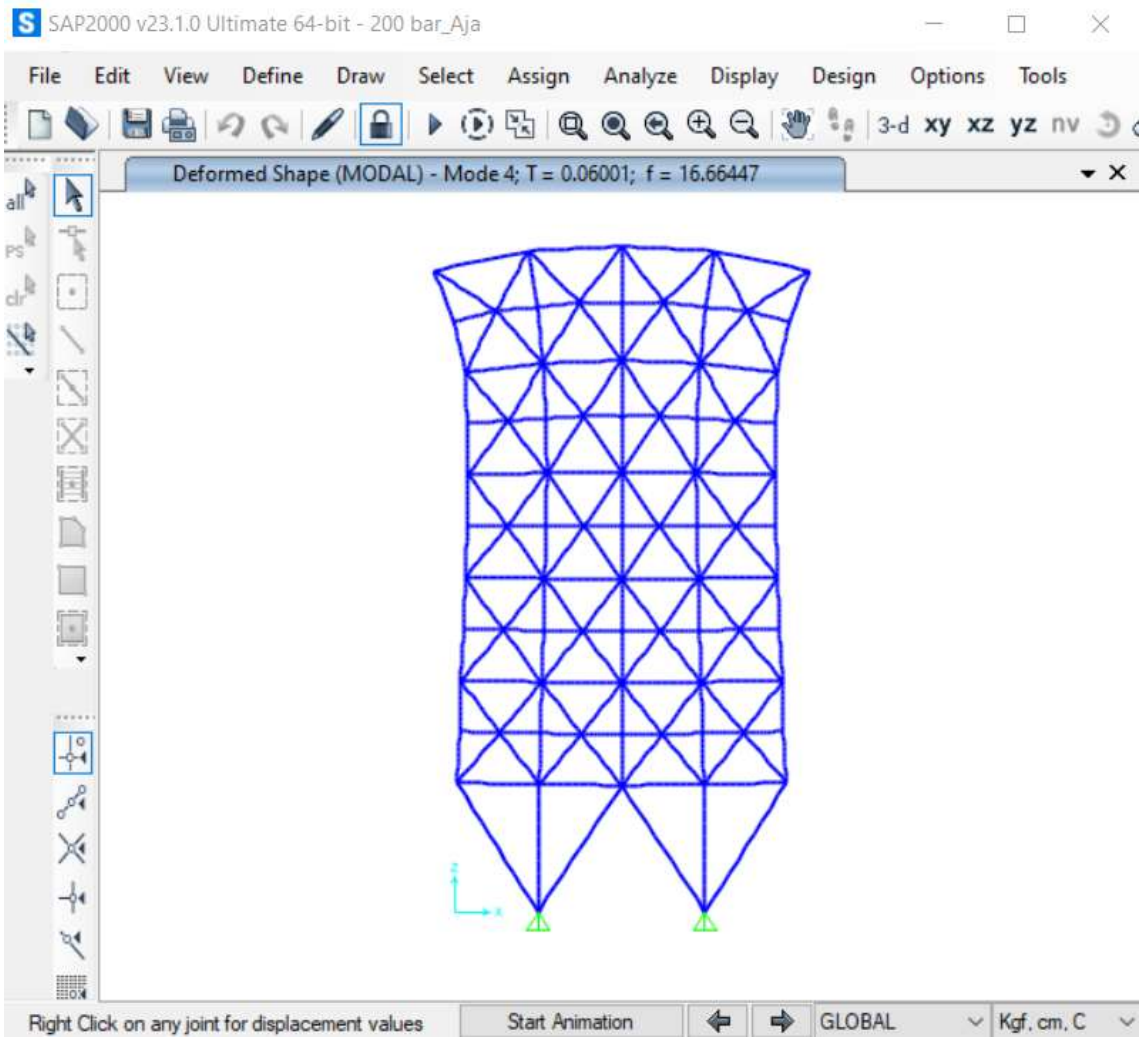
Şekil 4.13.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının 1. Modu



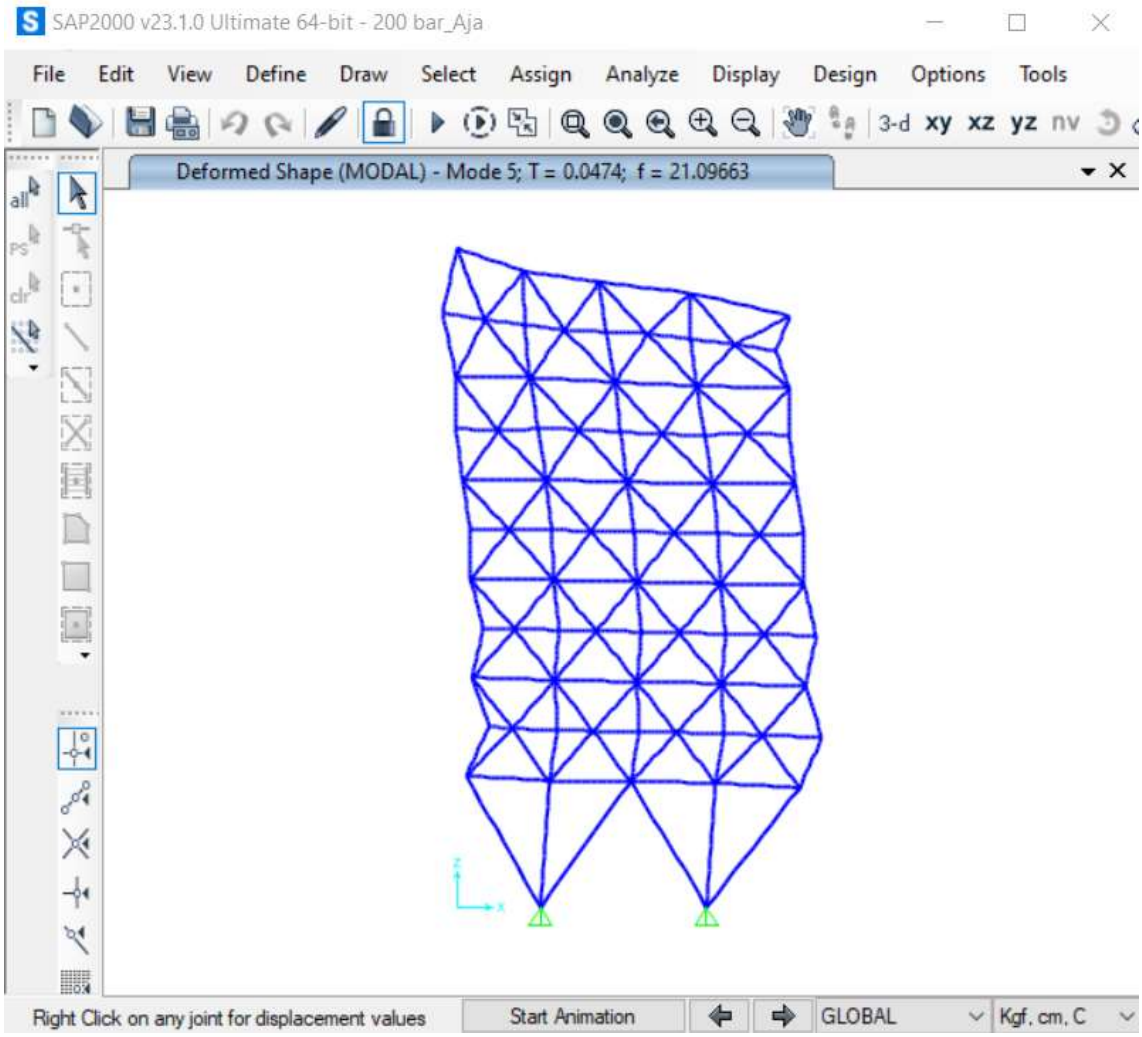
Şekil 4.13.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının 2. Modu



Şekil 4.13.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının 3. Modu

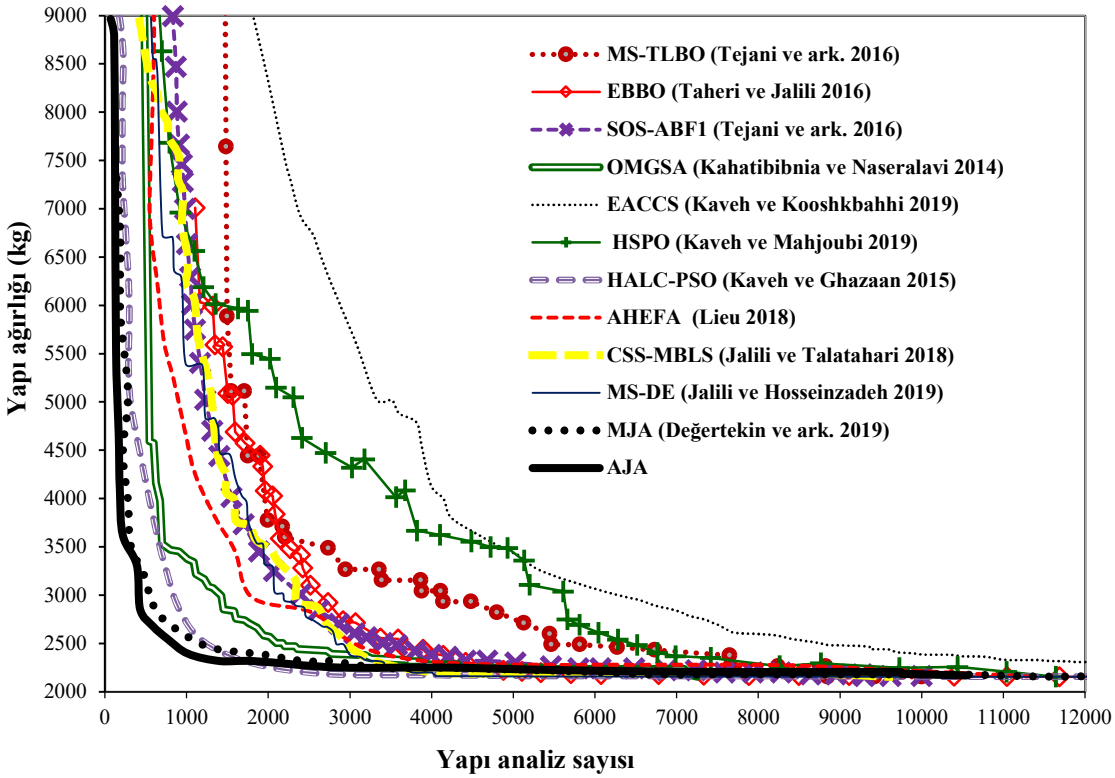


Şekil 4.13.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının 4. Modu



Şekil 4.13.(e). SAP 2000 V23 ile modellenen 200 elemanlı düzlem kafes yapının 5. Modu

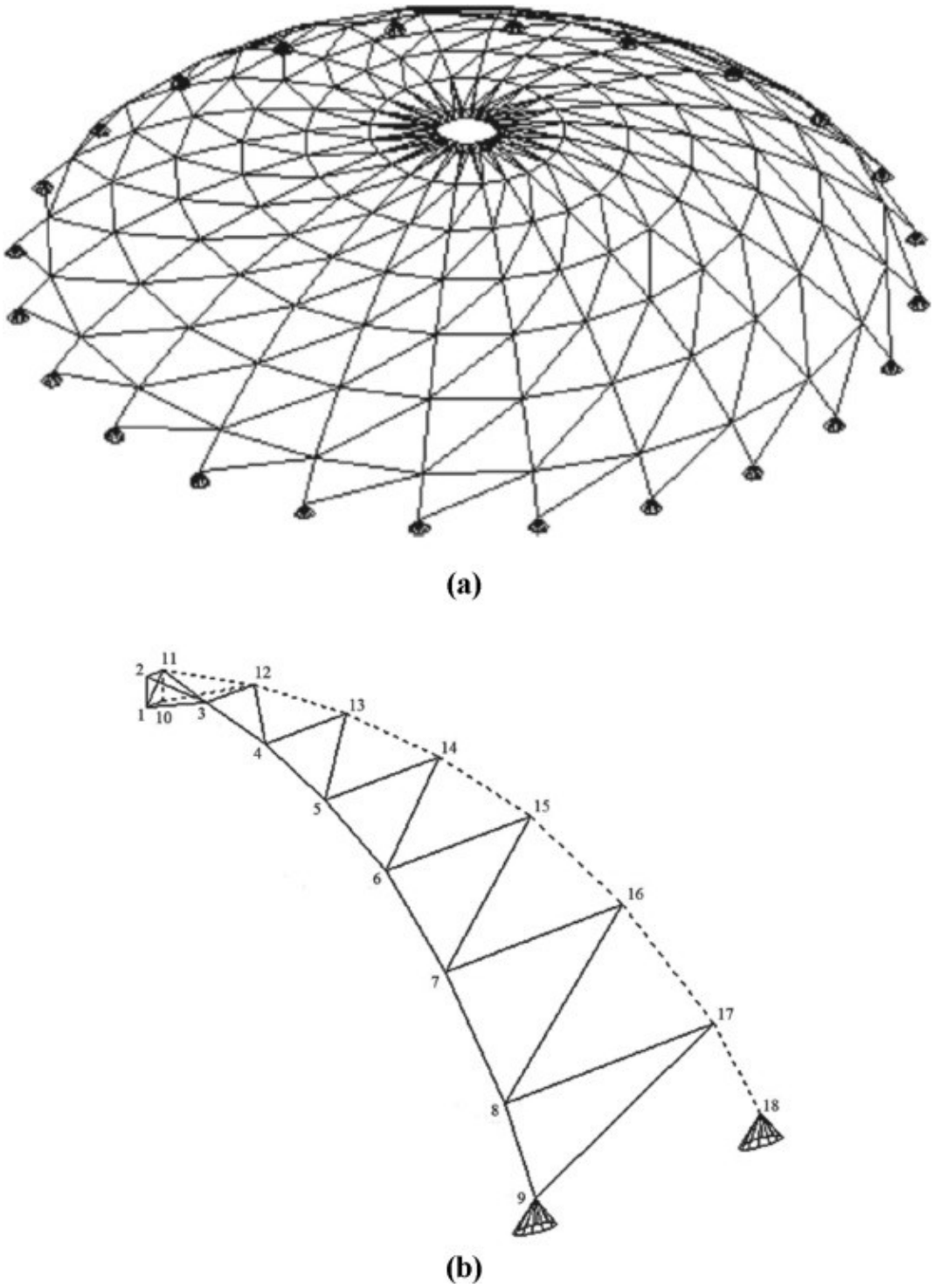
Şekil 4.14. AJA ve diğer yöntemlerden elde edilen yakınsama eğrileri gösterilmektedir. Sunulan yakınsama eğrisi AJA'nın başlangıçtan itibaren diğer yöntemlerden daha hızlı olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.14. 200 elemanlı düzlem kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

4.1.5. 600 Elemanlı Kubbe Kafes Yapı

Bu tez çalışmasında optimize edilen altıncı test problemi olan 600 elemanlı kubbe kafes yapı Şekil 4.15.(a)'da gösterilmiştir. Kubbe kafes yapı, 15°'lik aralıkla eksenel simetrik olarak yerleştirilmiş 24 kafes yapıdan oluşmaktadır. Bu kafes yapılar, üçgen bir çubuk ağı oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Her kafes yapıda 25 eleman vardır (Şekil 4.15. (b)) ve bu yapıdaki her çubuğun enkesit alanları, problemin 25 enkesit tasarım değişkenini temsil etmektedir. Her bitişik kafes yapı çiftinde 9 düğüm noktası ortaktır (Şekil 4.15. (b) ve Çizelge 4.12.'de eleman bağlantılarının ayrıntıları verilmiştir.). Kubbe kafes yapının mesnet noktaları dışındaki tüm düğüm noktalarına 100 kg kütle eklenmiştir. 600 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyon problemi daha önce Çizelge 4.12.'de belirtilen ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016), MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018), CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018), CRPSO (Carvalho ve ark. 2018), JA (Grzywinski ve ark. 2019), CGFA (Kaveh ve Javadi 2019) ve MJA (Değertekin ve ark. 2019) yöntemleri ile çözülmüştür. Çizelge 4.13.'te sırasıyla, AJA ile yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen ilk beş doğal frekans değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.15. 600 elemanlı kubbe kafes yapının şekli (a) Yapının üç boyutlu görünüşü (b) Kubbe yapının bir alt yapısının detay görünüşü (Kaveh ve Ghazaan 2018)

Çizelge 4.12. 600 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2) (Düğüm noktaları)	CRPSO (Carvalho ve ark. 2018)	ECBO (Cascade) (Taheri ve Jalili 2016)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016)	MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018)	Standard JA (Grzywinski ve ark. 2019)	CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)]	**MJA- (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1 (1-2)	1.5000	1.0299	1.3650	1.2575	1.1550	1.7518	1.3190	**1.2815**	**1.1867**
2 (1-3)	1.5000	1.3664	1.3910	1.3466	1.3040	1.1811	1.3826	**1.3355**	**1.2967**
3 (1-10)	7.0000	5.1095	5.6860	4.9738	4.1780	4.8878	4.9379	**4.5189**	**4.5771**
4 (1-11)	1.0000	1.3011	1.5110	1.4025	1.3350	1.5162	1.3222	**1.1772**	**1.3356**
5 (2-3)	16.5000	17.0572	17.711	17.3802	18.375	18.1659	17.1285	**18.1593**	**18.3157**
6 (2-11)	34.5000	34.0764	36.266	37.9742	39.914	36.0764	37.4657	**38.0168**	**38.5097**
7 (3-4)	12.0000	13.0985	13.263	13.0306	13.609	12.6571	12.7071	**13.9673**	**13.5917**
8 (3-11)	15.5000	15.5882	16.919	15.9209	16.470	14.6113	15.4252	**16.5656**	**16.8824**
9 (3-12)	10.5000	12.6889	13.333	11.9419	14.108	11.3198	11.3642	**13.2641**	**13.8766**
10 (4-5)	10.0000	10.3314	9.5340	9.1643	10.038	8.4580	9.3343	**10.0810**	**9.5286**
11 (4-12)	8.5000	8.5313	9.8840	8.4332	9.5140	8.4285	8.3872	**9.5786**	**9.4218**
12 (4-13)	9.0000	9.8308	9.5470	9.2375	9.3290	9.7321	9.1101	**9.3035**	**9.7643**
13 (5-6)	7.5000	7.0101	7.8660	7.2213	6.9380	7.2947	7.1472	**6.9441**	**7.2431**
14 (5-13)	5.5000	5.2917	5.5290	5.2142	5.5450	6.1922	5.1701	**5.6272**	**5.3913**
15 (5-14)	6.5000	6.2750	7.0070	6.7961	6.7630	6.4395	6.6239	**6.8711**	**6.7468**
16 (6-7)	5.5000	5.4305	5.4620	5.2078	5.2090	5.4760	5.2427	**5.2731**	**5.1493**
17 (6-14)	5.0000	3.6414	3.8530	3.4586	3.8420	3.2695	3.5213	**3.8429**	**3.8342**
18 (6-15)	7.5000	7.2827	7.4320	7.6407	8.1120	8.3724	7.6096	**7.8006**	**8.0665**
19 (7-8)	4.5000	4.4912	4.2610	4.3690	4.2520	4.4987	4.2877	**4.1592**	**4.2800**
20 (7-15)	2.0000	1.9275	2.2530	2.1237	2.2270	2.2197	2.1684	**2.1469**	**2.2509**
21 (7-16)	4.5000	4.6958	4.3370	4.5774	4.5820	4.6162	4.6704	**4.5404**	**4.5372**
22 (8-9)	4.0000	3.3595	4.0280	3.4564	3.3360	3.0667	3.5380	**3.5008**	**3.5615**
23 (8-16)	2.0000	1.7067	1.9540	1.7920	1.7250	1.8549	1.8252	**1.7568**	**1.7744**
24 (8-17)	4.5000	4.8372	4.7090	4.8264	4.6750	4.7960	4.8110	**4.8201**	**4.6445**
25 (9-17)	1.5000	2.0253	1.4100	1.7601	1.6730	1.6029	1.6589	**1.6957**	**1.6141**
En iyi ağırlık (kg)	6132.296	6140.510	6344.550	6115.100	6336.850	6112.644	6058.490	**6334.656**	**6333.251 [6344.55][1] [6336.85][2] [6334.656][3]**
Ortalama ağırlık(kg)	6682.319	6175.330	6674.710	6119.95	6376.010	6146.1936	6076.670	**6418.586**	**6380.31**
SD (kg)	999.246	34.080	473.210	16.230	90.390	17.2355	22.420	**63.953**	**47.396**
CV (%)	2.696	2.011	0.001	2.0678	0.000	2.555	2.637	**0.000**	**0.000**
NSA	20000	17300	9000	17513	40000	15030	10000	**9640**	**8580**

[1]AJA DPSO'nun (Kaveh ve Zolghadr 2016) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 7560. analizde elde etmiştir
[1]AJA CPA'nın (Kaveh ve Zolghadr 2018) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 8230. analizde elde etmiştir
[1]AJA MJA'nın (Değertekin ve ark. 2019) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 8550. analizde elde etmiştir

Çizelge 4.13. 600 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

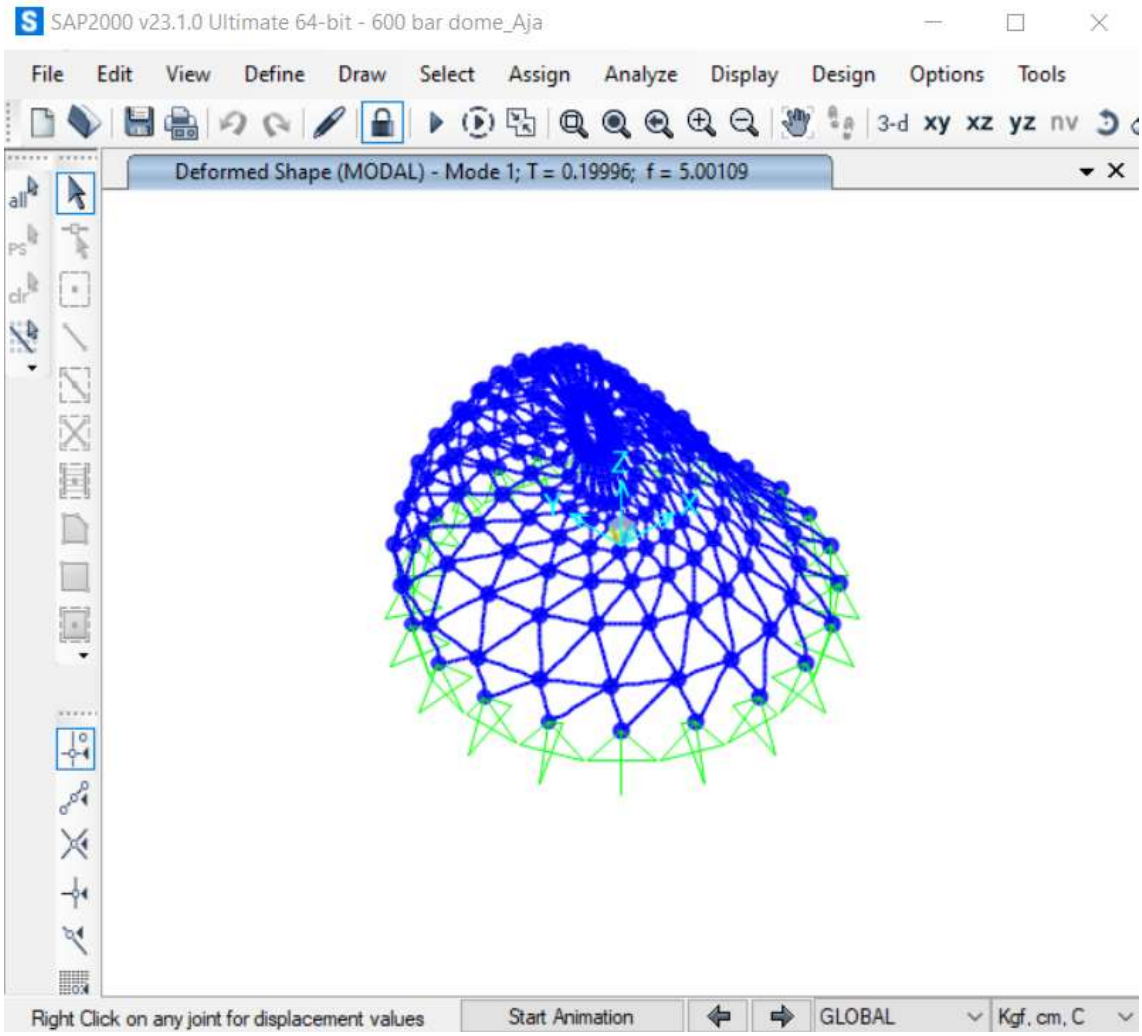
Frekans Numarası (Hz)	CRPSO (Carvalho ve ark. 2018)	ECBO (Cascade) (Taheri ve Jalili 2016)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016)	MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018)	Standard JA (Grzywinski ve ark. 2019)	CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)]	**MJA-(Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	5.0231	5.0010	5.0000	5.0000	5.0000	5.0804	5.0000	**5.0027**	**5.0011**
1*	**5.0132**	**4.9936**	**5.0002**	**4.9925**	**5.0000**	**4.9958**	**4.9902**	**5.0027**	**5.0011**
2	5.0231	5.0010	5.0000	5.0000	5.0000	5.0804	5.0000	**5.0027**	**5.0011**
3	7.0013	7.0010	7.0000	7.0000	7.0000	7.0001	7.0000	**7.0002**	**7.0000**
3*	**6.8113**	**6.8592**	**6.9999**	**6.8552**	**7.0000**	**6.8211**	**6.8154**	**7.0002**	**7.0000**
4	7.0013	7.0010	7.0000	7.0000	7.0000	7.0001	7.0000	**7.0002**	**7.0000**
5	7.0013	7.0020	7.0000	7.0000	7.0000	7.0006	7.0010	**7.0015**	**7.0000**

* SAP 2000 v23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri.

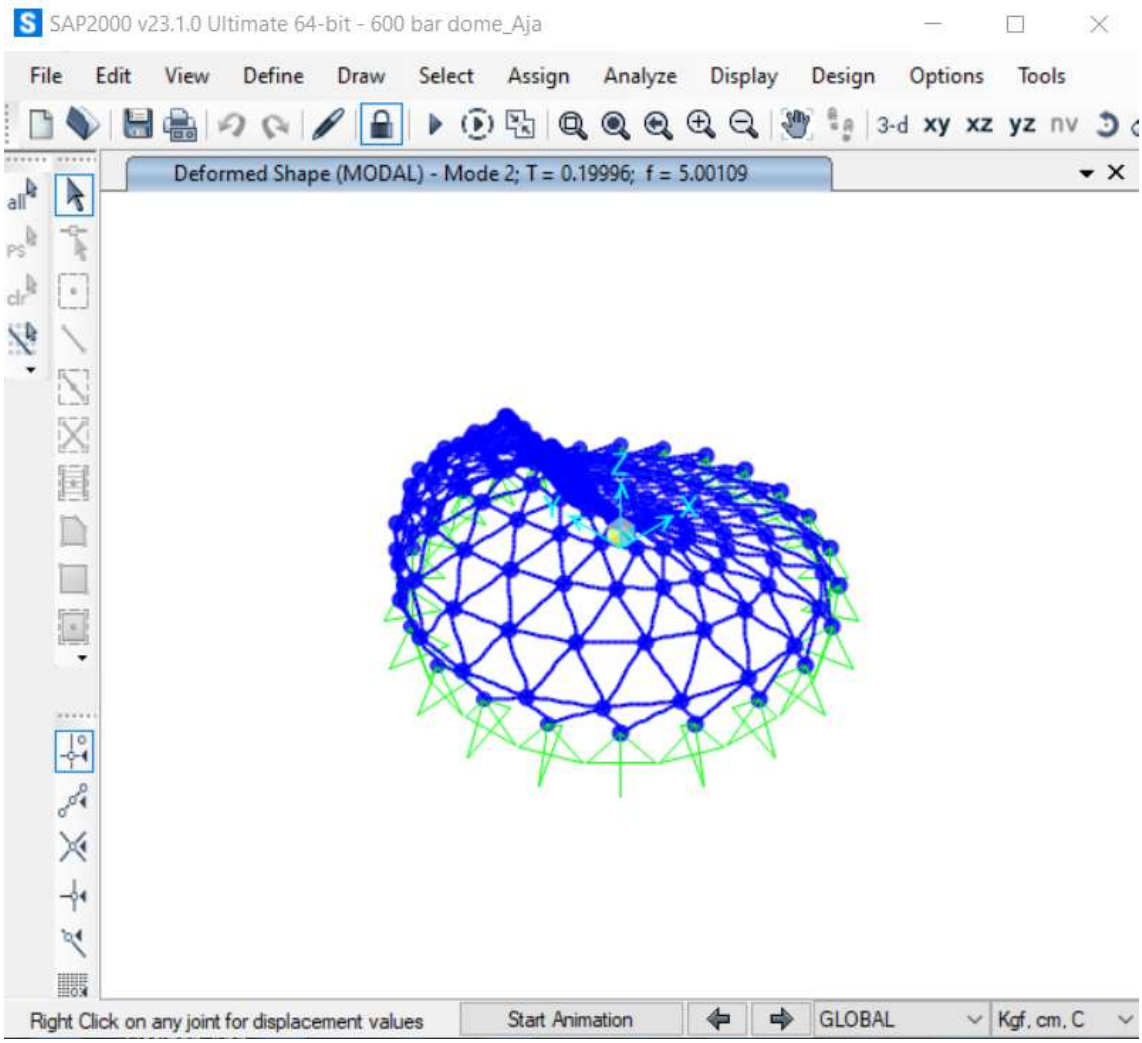
Çizelge 4.12.'de AJA ve MJA'nın (Değertekin ve ark.2019) 6333.251 kg ve 6334.656 kg ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi ağırlıkları elde ettikleri görülmektedir. ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018), CRPSO (Carvalho ve ark. 2018), JA (Grzywinski ve ark. 2019), CGFA (Kaveh ve Javadi 2019) yöntemlerinin ise frekans sınırlayıcılarını % 2.011 ile % 2.696 arasındaki oranlarda sağlamadığı tespit edilmiştir.

Ayrıca Çizelge 4.12.'de görüldüğü gibi literatürdeki diğer yöntemler optimizasyon sürecini 9000 ile 40000 arasında değişen değerlerde yapı analizi ile tamamlarken AJA 8580, MJA (Değertekin ve ark.2019) ise 9640 yapı analizi ile optimizasyon sürecini tamamlamıştır.

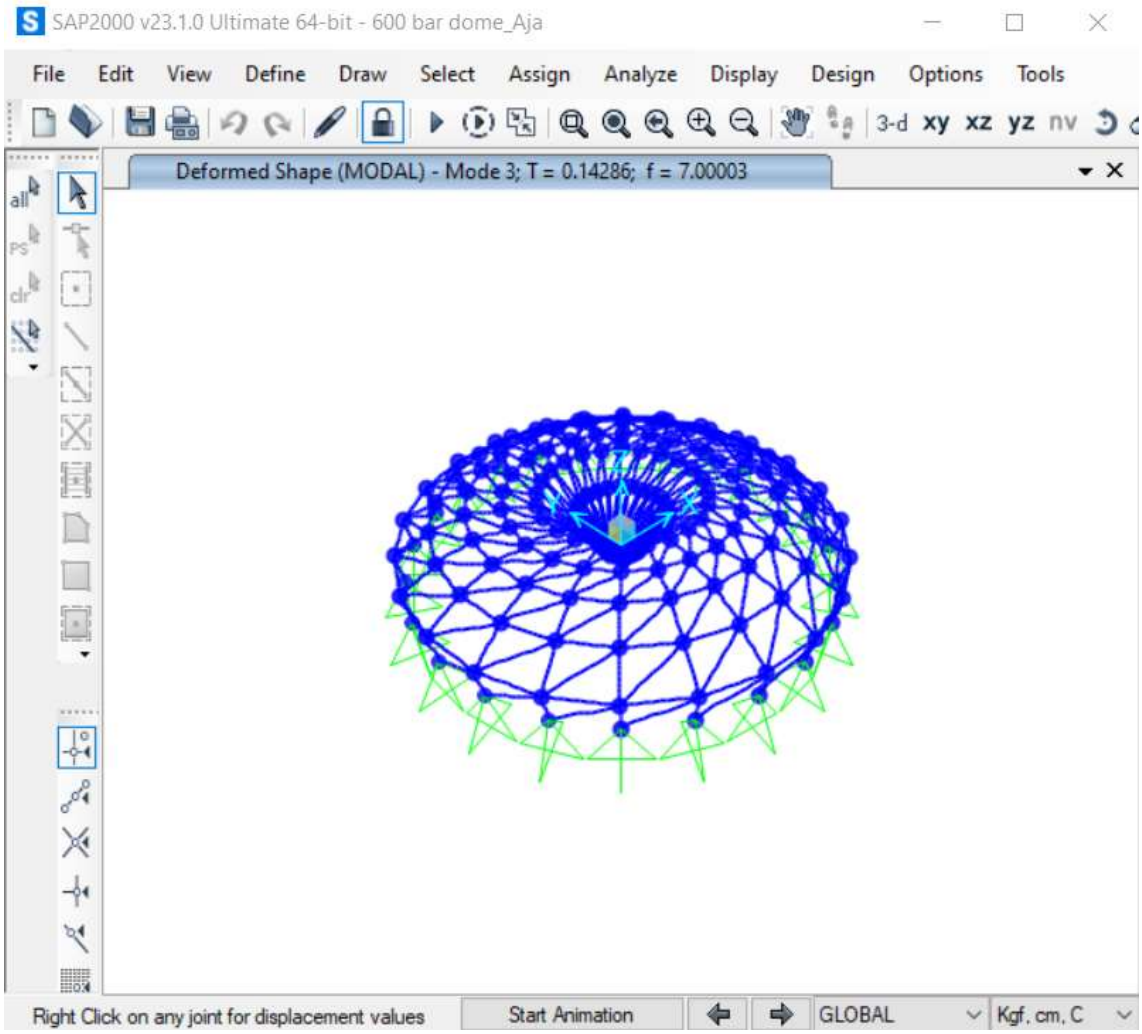
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk beş moduna ait sonuçlar Şekil 4.16.(a-e)'de sunulmuştur. Şekil 4.16.'dan görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



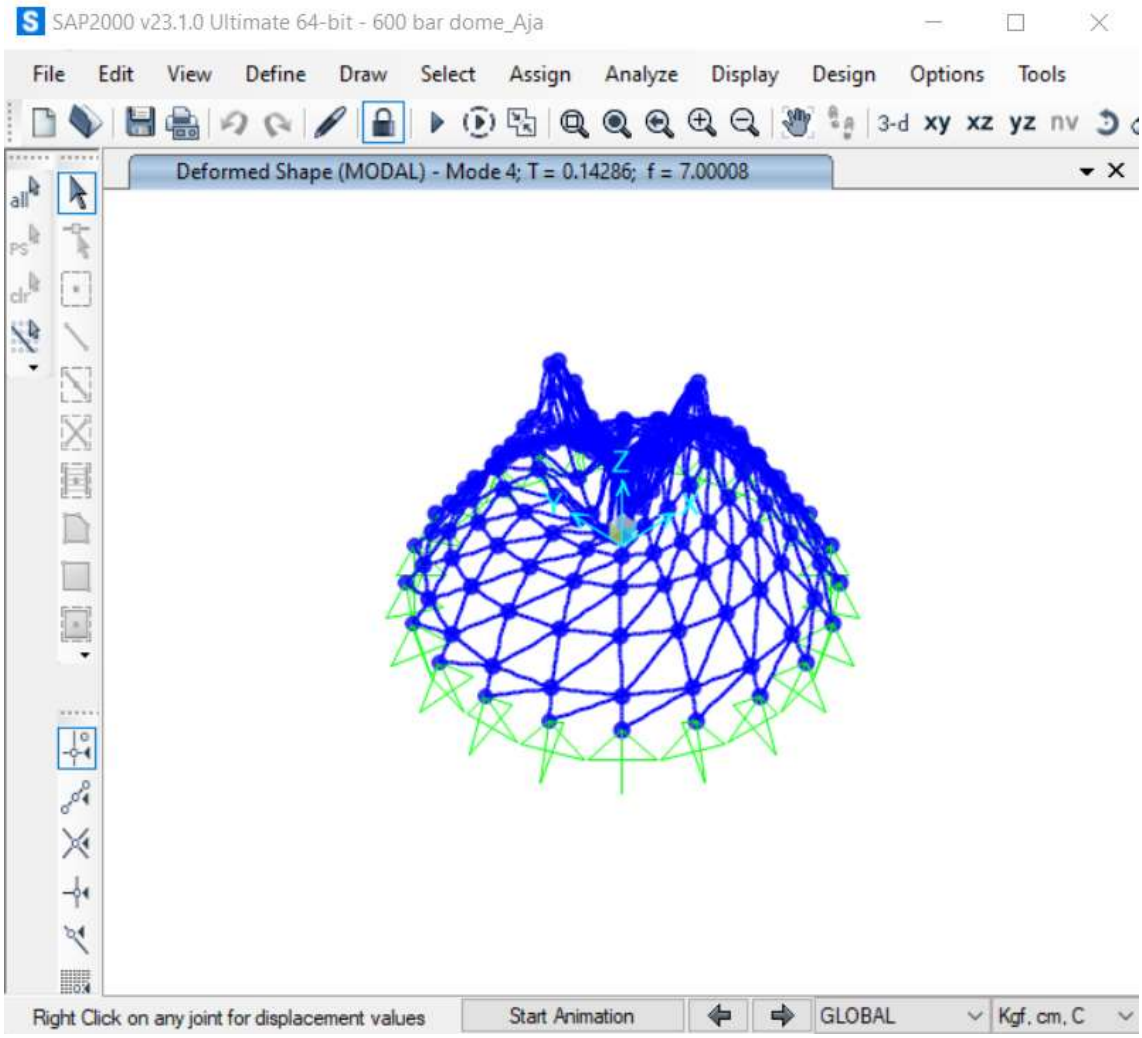
Şekil 4.16.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının 1. Modu



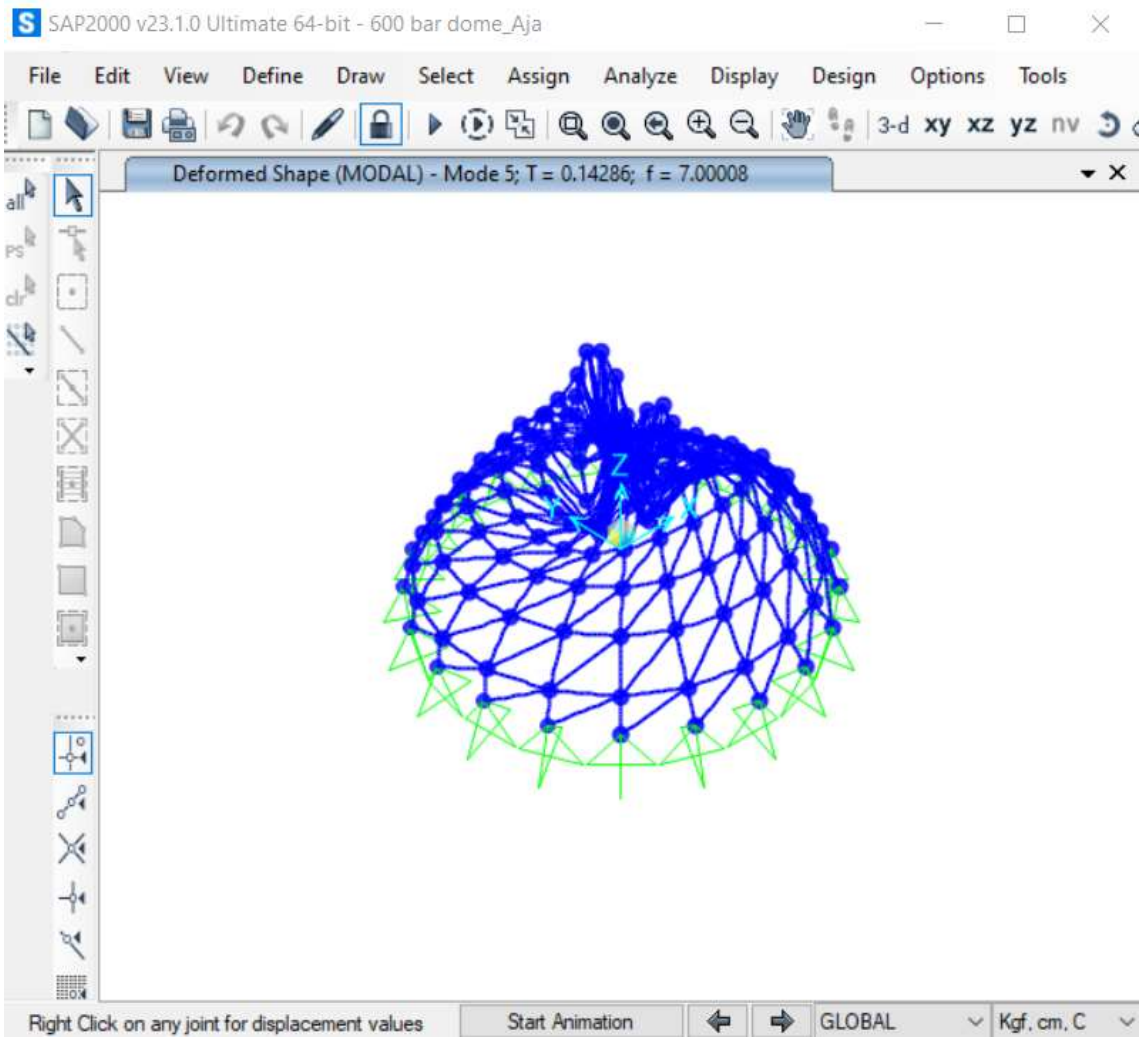
Şekil 4.16.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının 2. Modu



Şekil 4.16.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının 3. Modu

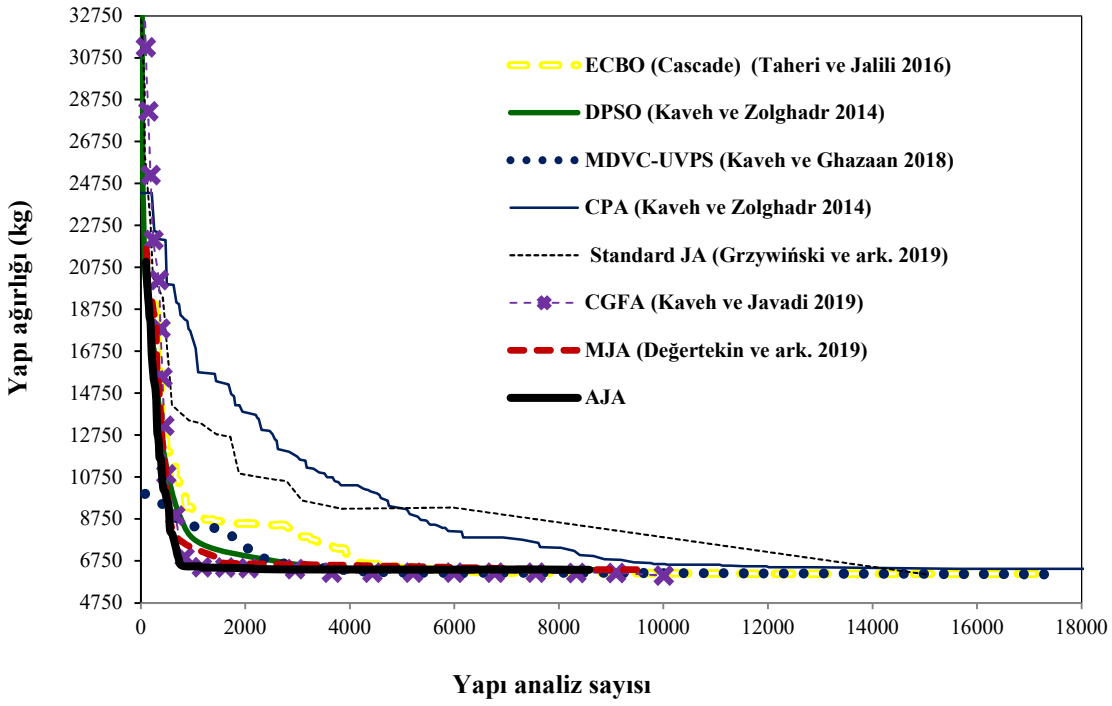


Şekil 4.16.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının 4. Modu



Şekil 4.16.(e). SAP 2000 V23 ile modellenen 600 elemanlı kubbe kafes yapının 5. Modu

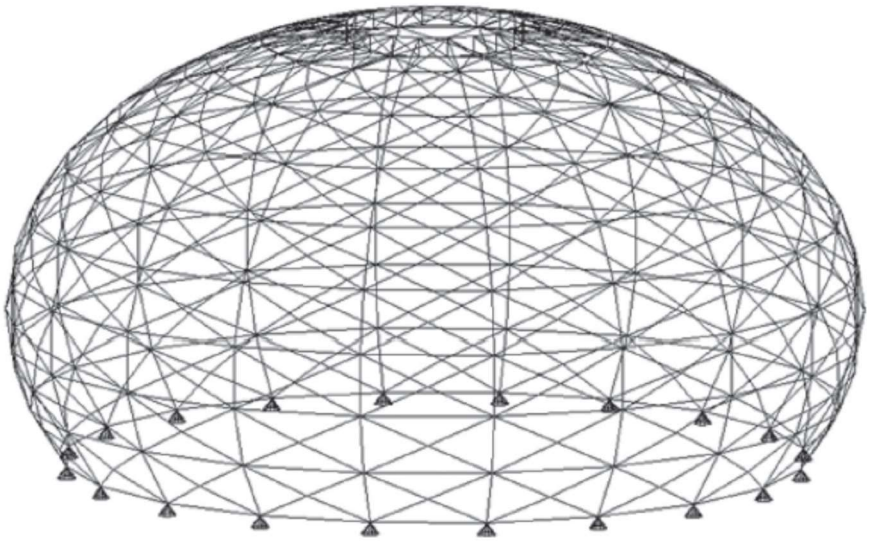
AJA, MJA (Değertekin ve ark. 2019) ve diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.17.'de gösterilmektedir. Sunulan yakınsama eğrisi AJA'nın ve MJA'nın (Değertekin ve ark.2019) başlangıçtan itibaren diğer yöntemlerden daha hızlı olduğunu ve güçlü bir yakınsama kabiliyetinin olduğunu kanıtlamaktadır.



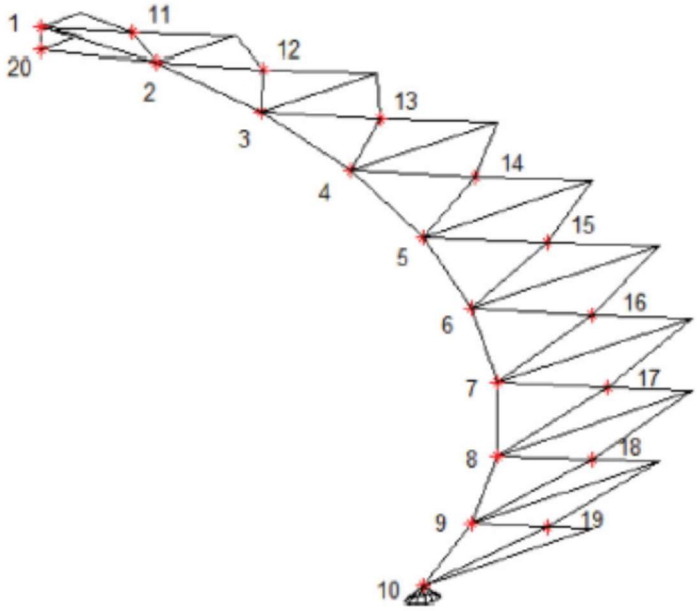
Şekil 4.17. 600 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

4.1.6. 1180 Elemanlı Kubbe Kafes Yapı

Bu tez çalışmasında optimize edilen yedinci test problemi olan 1180 elemanlı kubbe kafes yapı Şekil 4.18.(a)'da gösterilmiştir. Kubbe kafes yapı, 18° 'lik aralıkla eksenel simetrik olarak yerleştirilmiş 20 kafes yapıdan oluşur. Her kafes yapının 20 düğüm noktası ve 59 elemanı vardır (Şekil 18 (b)). Kafes yapıdaki her elemanın enkesit alanları, bu test probleminin 59 enkesit tasarım değişkenini temsil eder. Bir kafes yapının düğüm noktalarının kartezyen koordinatları Çizelge 4.14.'te listelenirken , eleman bağlantı detayları Çizelge 4.15.'te verilmiştir. Kubbe kafes yapının mesnet noktaları dışındaki tüm düğüm noktalarına 100 kg kütle eklenmiştir. Bu tasarım problemi daha önce Çizelge 4.15.'te belirtilen ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016), MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018), CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018) ve MJA (Değertekin ve ark. 2019) yöntemleri ile çözülmüştür. Çizelge 4.16.'da AJA ile yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen ilk beş doğal frekans değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.18. 1180 elemanlı kubbe kafes yapının şekli (a) Yapının üç boyutlu görünüşü (b) Kubbe yapının bir alt yapısının detay görünüşü (Kaveh ve Ghazaan 2018)

Çizelge 4.14. 1180 elemanlı kubbe kafes yapının bir alt yapısının düğüm noktası koordinatları

Düğüm noktası numarası	**Koordinatlar (*x, y, z*)**	**Düğüm noktası numarası**	**Koordinatlar (*x, y, z*)**
1	(3.1181, 0.0, 14.6723)	11	(4.5788, 0.7252, 14.2657)
2	(6.1013, 0.0, 13.7031)	12	(7.4077, 1.1733, 12.9904)
3	(8.8166, 0.0, 12.1354)	13	(9.9130, 1.5701, 11.1476)
4	(11.1476, 0.0, 10.0365)	14	(11.9860, 1.8984, 8.8165)
5	(12.9904, 0.0, 7.5000)	15	(13.5344, 2.1436, 6.1013)
6	(14.2657, 0.0, 4.6358)	16	(14.4917, 2.2953, 3.1180)
7	(14.9179, 0.0, 1.5676)	17	(14.8153, 2.3465, 0.0)
8	(14.9179, 0.0, −1.5677)	18	(14.4917, 2.2953, −3.1181)
9	(14.2656, 0.0, −4.6359)	19	(13.5343, 2.1436, −6.1014)
10	(12.9903, 0.0, −7.5001)	20	(3.1181, 0.0, 13.7031)

Çizelge 4.15. 1180 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2) (Düğüm noktaları)	ECBO (Cascade) (Kaveh ve Ghazaan 2016)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016)	MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1 (1 –2)	8.011	7.926	7.3691	7.877	**7.891**	**7.952**
2 (1 –11)	8.7028	10.426	9.3399	11.025	**9.797**	**10.466**
3 (1 –20)	3.1616	2.115	2.7203	3.325	**2.276**	**2.089**
4 (1 –21)	13.682	14.287	13.2822	14.672	**14.255**	**14.219**
5 (1-40)	3.2865	3.846	3.6758	2.894	**3.709**	**3.944**
6 (2-3)	6.0397	5.921	6.1391	5.872	**6.019**	**5.979**
7 (2-11)	8.437	7.955	7.0964	7.026	**7.749**	**7.775**
8 (2-12)	6.4122	6.697	6.0208	6.746	**6.892**	**6.351**
9 (2-20)	2.6346	1.889	2.1225	1.608	**1.941**	**1.896**
10 (2-22)	11.744	11.881	12.3488	11.696	**11.893**	**11.908**
11 (3-4)	7.9272	7.121	6.8578	7.523	**7.100**	**7.241**
12 (3-12)	5.4548	6.080	5.7773	6.162	**6.138**	**5.647**
13 (3-13)	6.7221	6.559	6.9931	6.769	**6.802**	**6.700**
14 (3-23)	8.1544	7.772	7.3355	7.671	**7.783**	**7.799**
15 (4-5)	9.756	9.358	10.5664	8.732	**9.410**	**9.198**
16 (4-13)	6.5905	6.213	6.9589	5.841	**6.166**	**6.282**
17 (4-14)	7.0392	8.200	8.0977	8.545	**8.060**	**7.695**
18 (4-24)	6.9219	7.799	7.7738	7.386	**7.656**	**7.520**
19 (5-6)	11.6919	11.752	12.4614	12.668	**11.928**	**11.840**
20 (5-14)	9.889	7.494	7.8154	8.733	**7.541**	**7.230**
21 (5-15)	9.3316	9.696	10.2039	9.037	**10.268**	**10.211**
22 (5-25)	9.1093	9.177	8.9262	8.903	**9.085**	**9.252**
23 (6-7)	18.1212	17.326	16.5275	17.013	**17.134**	**17.222**
24 (6-15)	10.6725	11.797	9.0166	10.048	**11.402**	**11.417**
25 (6-16)	13.534	14.002	13.8204	14.057	**14.000**	**14.196**

Çizelge 4.15. 1180 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (devamı)

26 (6-26)	12.0248	11.562	11.4021	12.154	**11.562**	**11.639**
27 (7-8)	23.1245	23.981	24.2631	24.024	**23.818**	**24.065**
28 (7-16)	15.263	12.996	14.5494	14.143	**12.985**	**13.377**
29 (7-17)	18.3075	16.591	17.7753	17.894	**17.163**	**16.469**
30 (7-27)	15.2361	15.910	15.4594	15.276	**15.908**	**16.057**
31 (8-9)	40.0749	34.642	34.1372	36.006	**34.607**	**34.125**
32 (8-17)	18.4775	19.860	19.1254	18.409	**19.903**	**18.866**
33 (8-18)	26.0689	25.079	24.1954	22.644	**24.946**	**24.600**
34 (8-28)	21.2213	18.965	21.5899	22.121	**19.668**	**21.103**
35 (9-10)	46.3724	47.514	49.4717	48.973	**46.551**	**47.696**
36 (9-18)	23.6689	28.133	26.2915	25.396	**28.076**	**27.760**
37 (9-19)	35.0703	33.023	33.7558	33.599	**33.495**	**33.518**
38 (9-29)	27.9369	32.263	29.7608	31.724	**32.084**	**31.773**
39 (10-19)	34.2912	33.401	34.0489	36.419	**33.178**	**33.592**
40 (10-30)	1.0726	1.344	1.0024	1.004	**1.073**	**1.000**
41 (11-21)	8.5106	9.327	9.0344	10.624	**9.498**	**9.455**
42 (11-22)	6.8664	7.202	7.5316	6.909	**7.220**	**7.189**
43 (12-22)	5.8229	6.792	6.3726	5.644	**6.607**	**6.767**
44 (12-23)	5.3986	6.228	5.7643	5.301	**6.274**	**6.322**
45 (13-23)	8.0669	6.601	6.727	7.370	**6.580**	**6.720**
46 (13-24)	6.9797	6.584	6.7021	6.301	**6.523**	**6.425**
47 (14-24)	7.2735	8.320	7.8082	7.853	**8.415**	**8.451**
48 (14-25)	9.1827	8.844	8.1225	7.987	**8.861**	**8.176**
49 (15-15)	10.6227	11.254	10.1777	10.460	**11.394**	**10.069**
50 (15-26)	11.574	12.162	10.1825	11.446	**11.384**	**12.219**
51 (16-26)	15.5194	13.854	13.459	13.918	**13.362**	**13.257**
52 (16-27)	14.1342	13.844	13.9788	14.694	**13.709**	**13.782**
53 (17-27)	17.1612	17.536	18.1070	18.227	**17.683**	**17.573**
54 (17-28)	19.0798	20.551	19.2212	19.235	**19.595**	**19.909**
55 (18-28)	23.4414	24.072	23.4359	24.421	**24.525**	**24.019**
56 (18-29)	26.5726	27.287	27.6479	22.866	**26.882**	**27.701**
57 (19-29)	33.4104	32.965	33.6805	34.344	**33.687**	**32.918**
58 (19-30)	37.1198	36.940	35.7035	36.964	**36.732**	**37.001**
59 (20-40)	4.7593	3.837	4.7617	5.269	**4.306**	**3.864**
En iyi ağırlık (kg)	37 770.710	37 779.810	37 451.770	37 739.570	**37 703.22**	**37 695.59 [37 779.810][1] [37 739.570][2] [37 703.22][3]**
Ortalama ağırlık (kg)	37 885.150	38 294.450	37 545.530	37 813.340	**37 824.47**	**37 755.05**
SD (kg)	133.840	550.500	64.850	61.500	**75.717**	**58.025**
CV (%)	0.836	0.0000	0.951	0.0000	**0.0000**	**0.0000**
NSA	19180	50000	19391	80000	**19760**	**18650**

[1]AJA ECBO-Cascade'nin (Kaveh ve Ghazaan 2016) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 15610. analizde elde etmiştir
[2]AJA MDVC-UVPS'nin (Kaveh ve Ghazaan 2018) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 16540. analizde elde etmiştir
[3]AJA MJA'nın (Değertekin ve ark. 2019) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 1666. analizde elde etmiştir

Çizelge 4.16. 1180 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

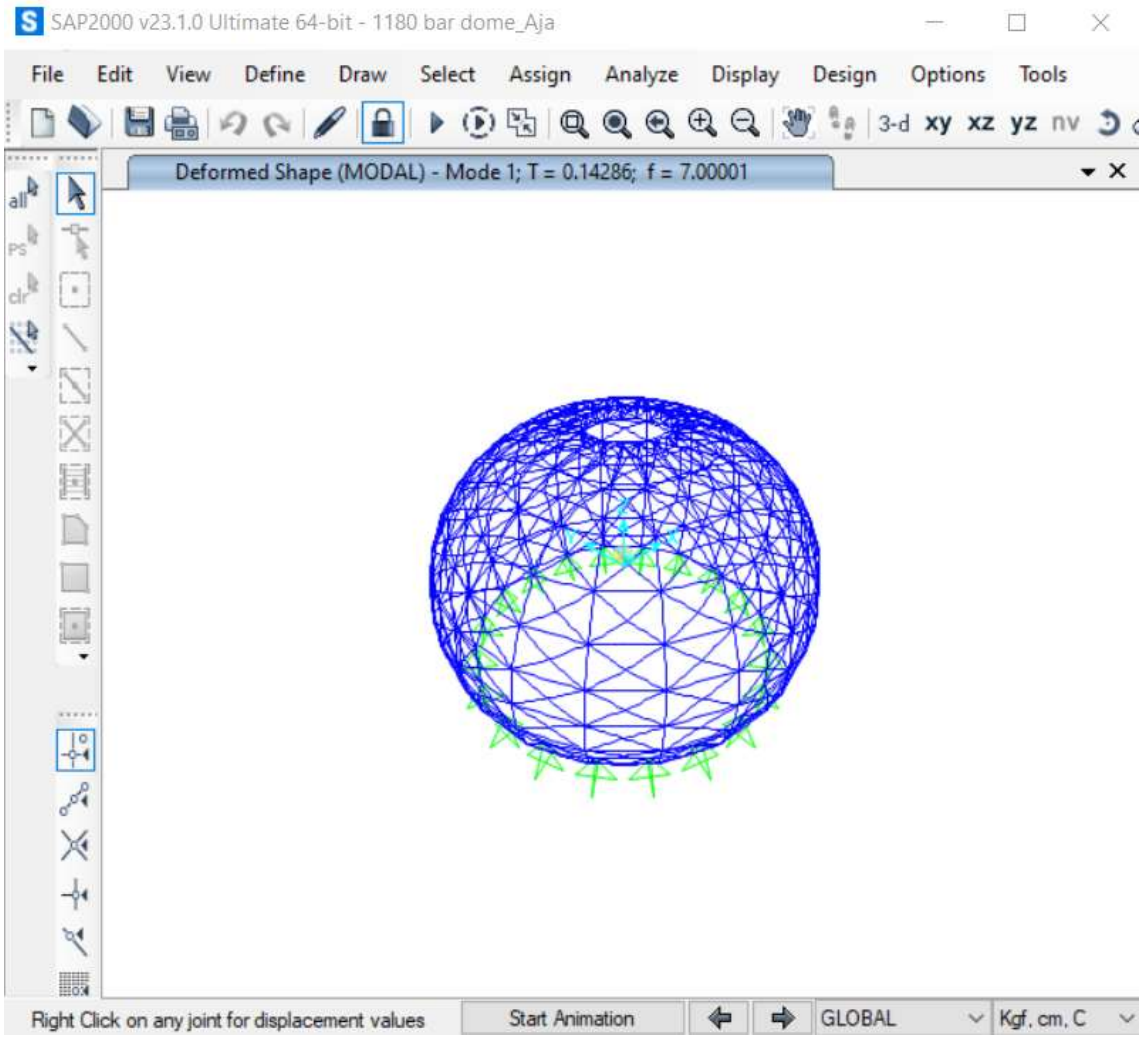
Frekans Numarası (Hz)	ECBO (Cascade) (Kaveh ve Ghazaan 2016)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016)	MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018)	**MJA (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	7.000	7.000	7.000	7.000	**7.0000**	**7.0000**
1*	**6.9932**	**7.0001**	**6.9931**	**7.0000**	**7.0000**	**7.0000**
2	7.001	7.001	7.001	7.000	**7.0000**	**7.0000**
2*	**6.9932**	**7.0001**	**6.9931**	**7.0000**	**7.0000**	**7.0000**
3	9.002	9.000	9.000	9.000	**9.0019**	**9.0024**
3*	**8.9247**	**9.0015**	**8.9144**	**9.0013**	**9.0019**	**9.0024**
4	9.002	9.000	9.000	9.000	**9.0019**	**9.0024**
5	9.062	9.005	9.005	9.000	**9.0154**	**9.0129**

** SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

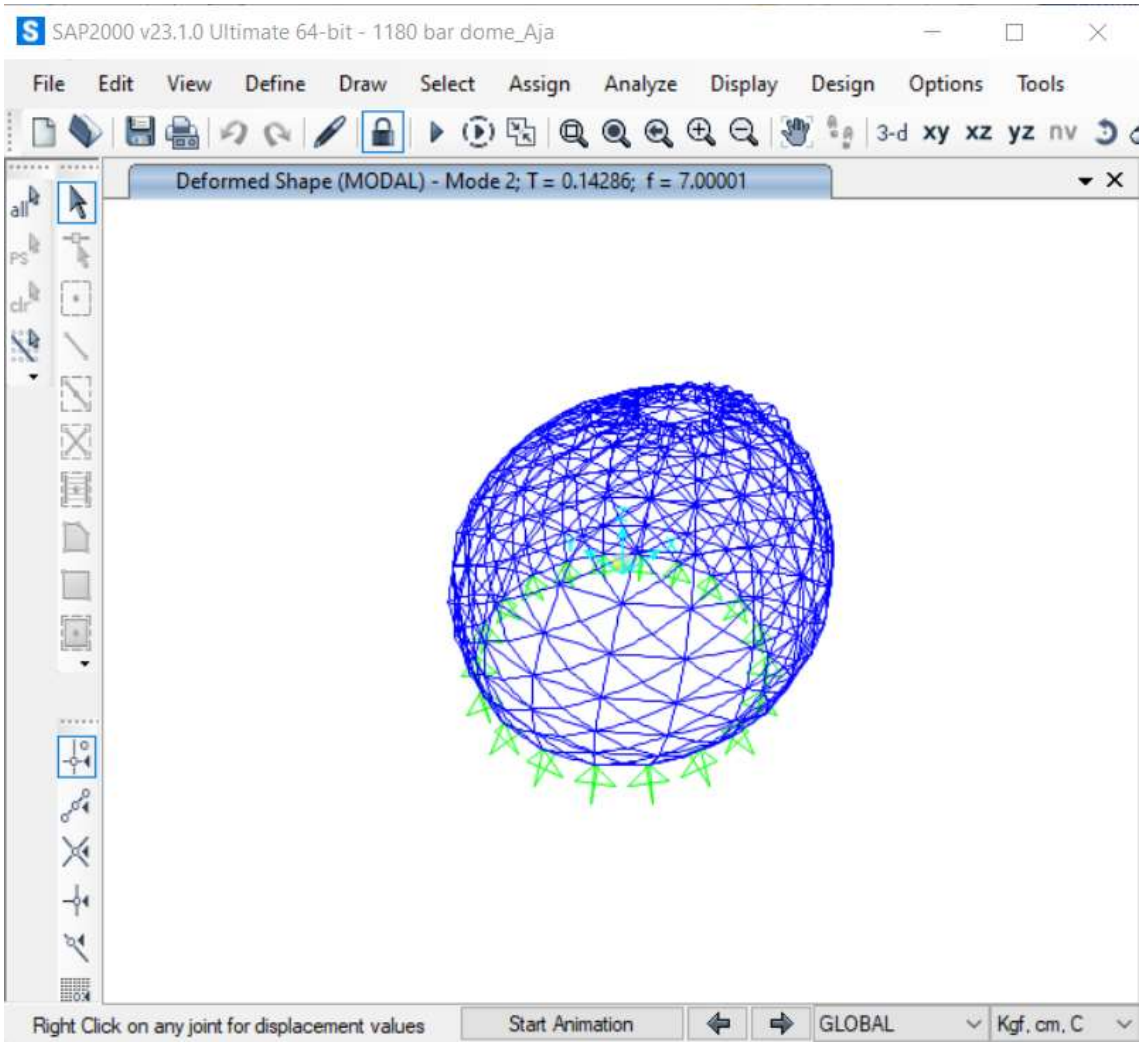
Çizelge 4.15.'te, ECBO ve MDVC-UVPS dışındaki tüm algoritmalar ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan tasarımlar elde edildiği görülmektedir. AJA, 37695.59 kg ağırlığındaki sınırlayıcıları sağlayan çözümler arasında en iyi tasarımı elde etmiştir. MJA (Değertekin ve ark. 2019), AJA ile elde edilen optimum tasarımdan sadece % 0,02 daha ağır olan, en iyi 2. tasarımı elde etmiştir.

AJA'nın bu optimizasyondaki hesaplama süresi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında en hızlı algoritma olduğu görülmektedir. AJA'nın 18650 yapı analizine karşın ECBO-Cascade'nin (Kaveh ve Ghazaan 2016) 19180 analiz, MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018) 193910 analiz ve MJA (Değertekin ve ark. 2019) 19760 yapı analizi ile optimum sonuca ulaşmıştır. Bununla birlikte, DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016) 50000 ve CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018) 80000 analiz ile, diğer yöntemlerden çok daha fazla analiz gerektirmiştir.

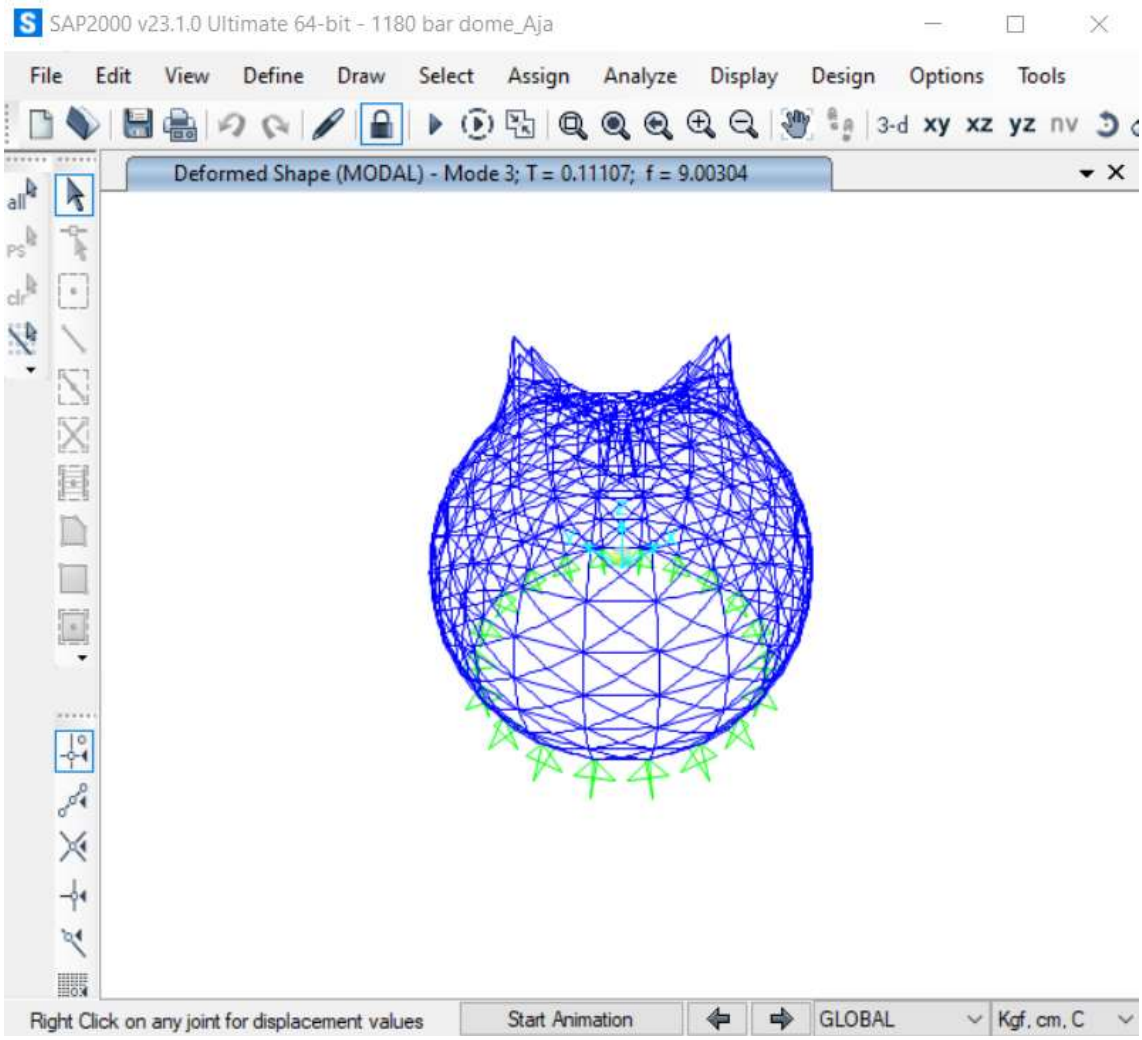
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk beş moduna ait sonuçlar Şekil 4.19.(a-e)'de sunulmuştur. Şekil 4.19.'dan görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



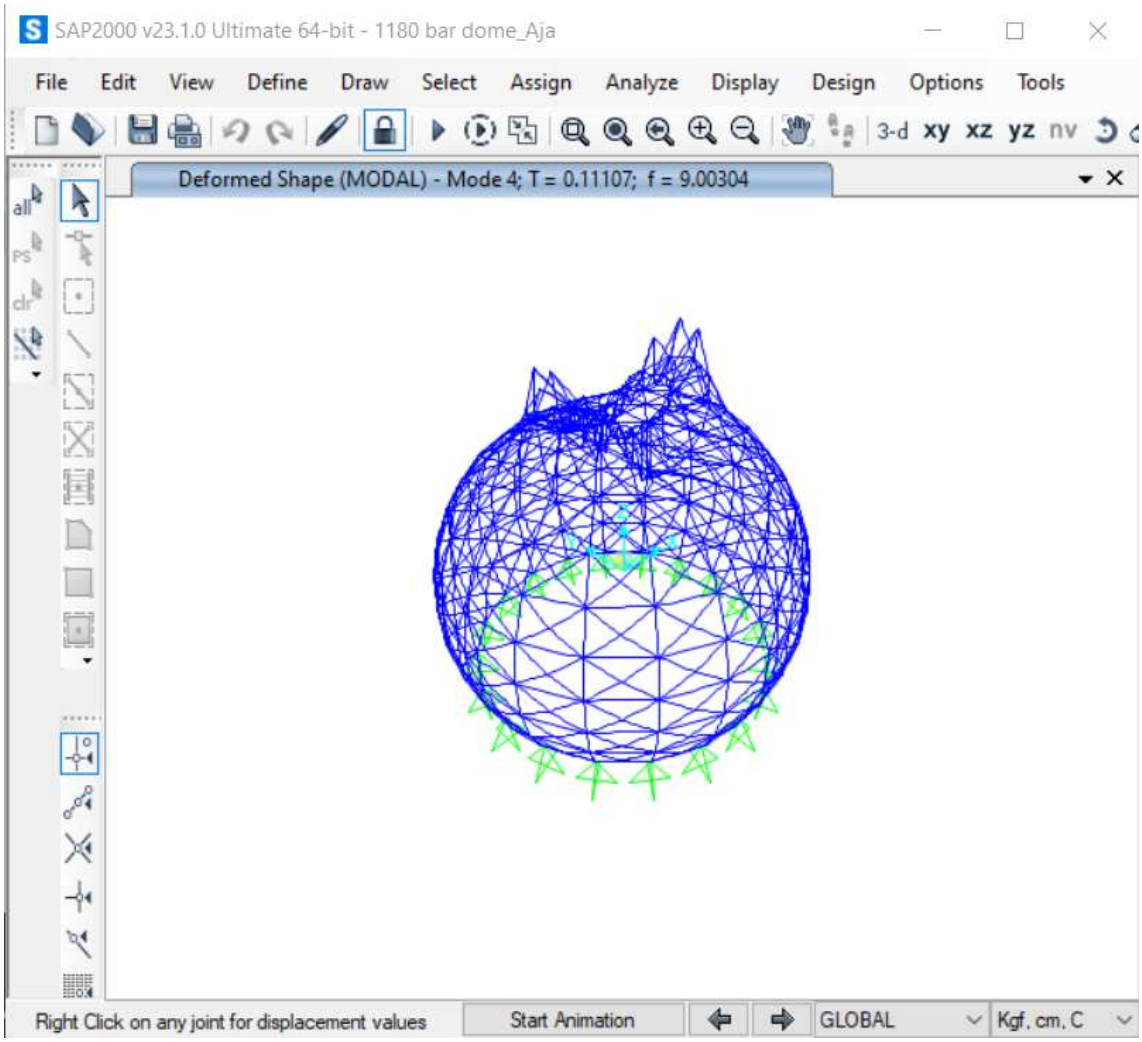
Şekil 4.19.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının 1. Modu



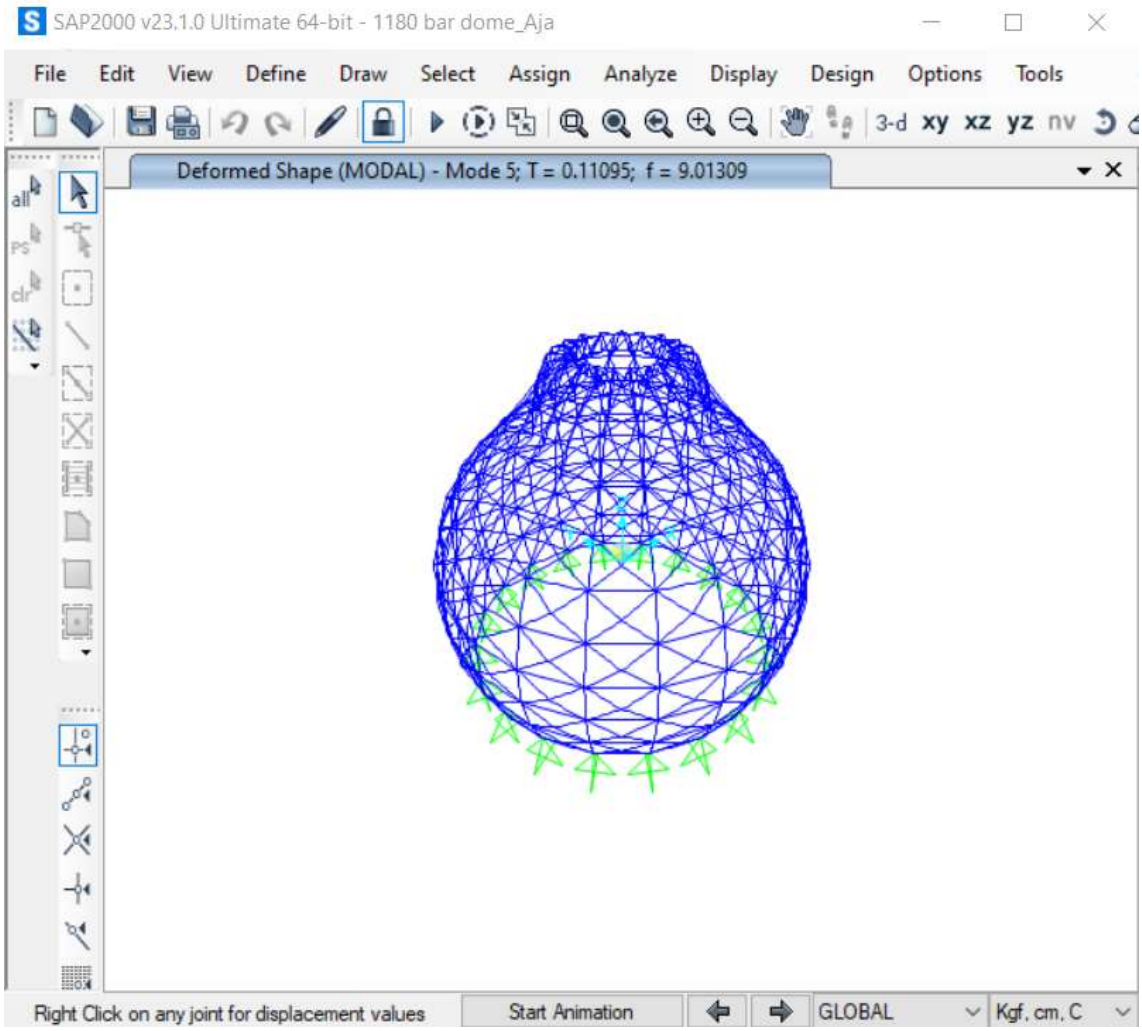
Şekil 4.19.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının 2. Modu



Şekil 4.19.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının 3. Modu

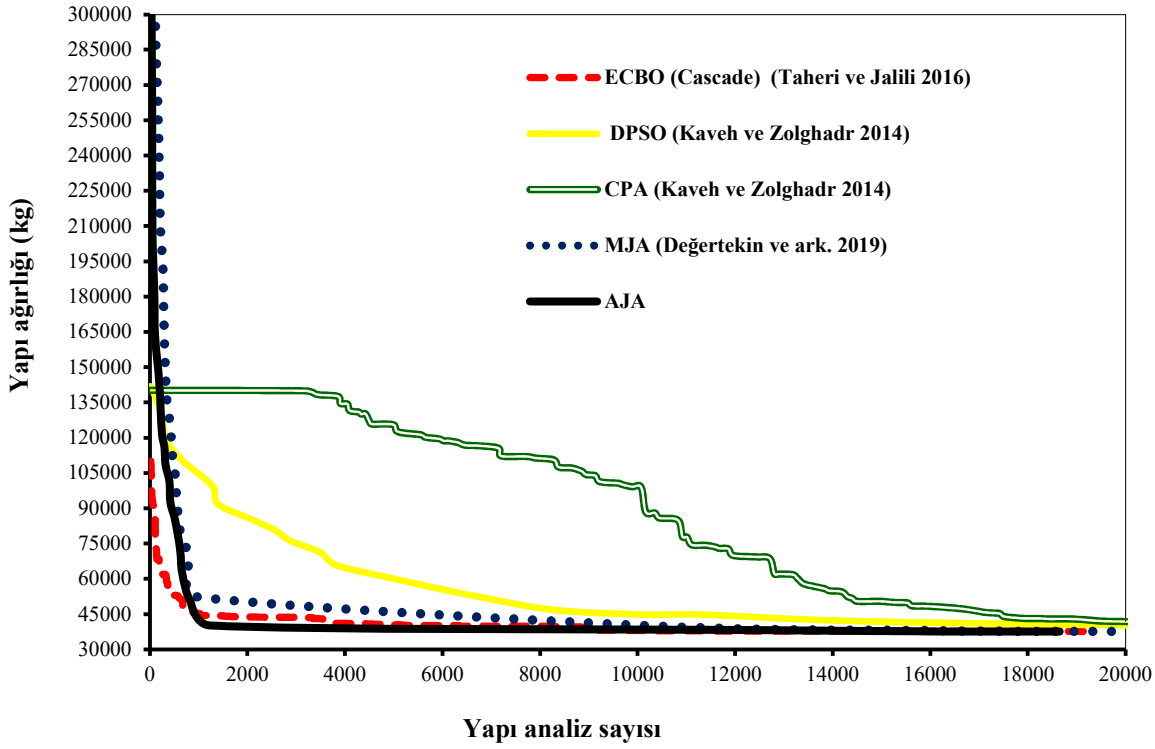


Şekil 4.19.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının 4. Modu



Şekil 4.19.(e). SAP 2000 V23 ile modellenen 1180 elemanlı kubbe kafes yapının 5. Modu

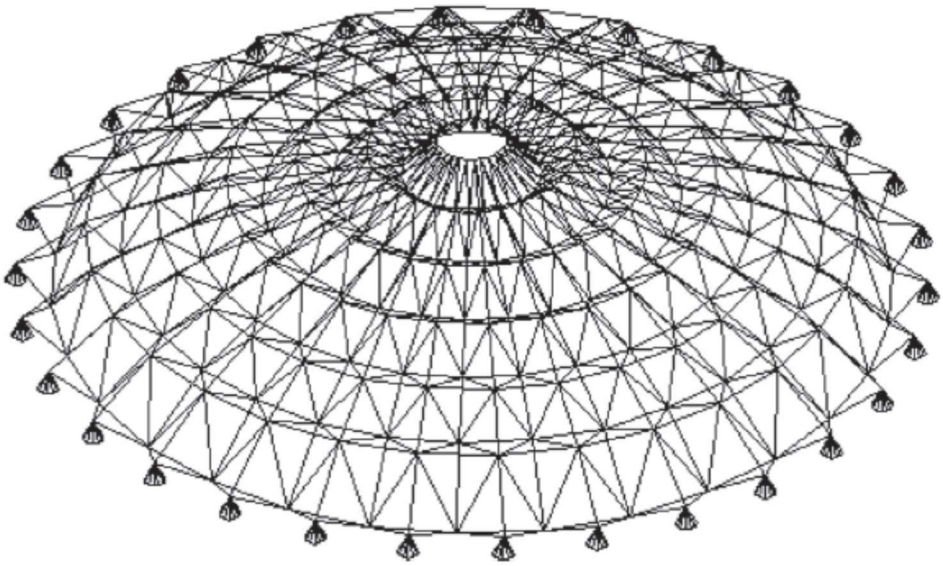
AJA, MJA (Değertekin ve ark.2019) ve diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.20.'de gösterilmektedir. Bu eğriden, AJA'nın optimizasyon işleminin başlangıcından itibaren diğer yöntemlerden daha hızlı bir biçimde optimum çözüme yakınsadığı görülmektedir.



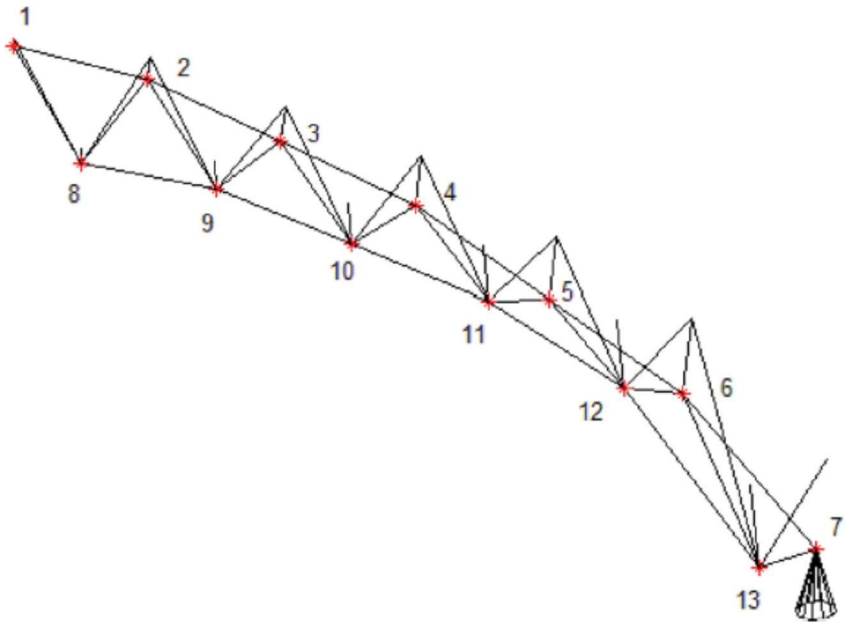
Şekil 4.20. 1180 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

4.1.7. 1410 Elemanlı Kubbe Kafes Yapı

Bu tez çalışmasında ele alınan son kafes yapı tasarım örneği, Şekil 4.21. (a) 'da gösterilen 1410 elemanlı kubbe kafes yapıdır. Kubbe kafes yapı, 12° 'lik aralıkla simetrik olarak yerleştirilmiş 30 kafes yapıdan oluşur. Her kafes yapının 13 düğüm noktası ve 47 elemana sahiptir (Şekil 4.21. (b)); her elemanın enkesit alanları, bu test probleminin 47 enkesit tasarım değişkenini temsil eder. İlk kafes yapının düğüm noktalarının koordinatları Çizelge 4.17.'de listelenmiş, eleman bağlantı detayları Çizelge 4.18.'de verilmiştir. Kubbe kafes yapının mesnet noktaları dışındaki tüm düğüm noktalarına 100 kg kütle eklenmiştir. Bu büyük ölçekli kubbe yapının optimum tasarımı daha önce ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016), MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018), CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018), CRPSO (Carvalho ve ark. 2018), CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)ve MJA (Değertekin ve ark. 2019) yöntemleri ile çözülmüştür. Çizelge 4.19.'da AJA ile yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen ilk beş doğal frekans değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.21. 1410 elemanlı kubbe kafes yapının şekli (a) Yapının üç boyutlu görünüşü (b) Kubbe yapının bir alt yapısının detay görünüşü (Kaveh ve Ghazaan 2018)

Çizelge 4.17. 1410 elemanlı kubbe kafes yapının bir alt yapısının düğüm noktası koordinatları

Düğüm noktası	Koordinatlar (*x, y, z*)	Düğüm noktası	Koordinatlar (*x, y, z*)
1	(1.0, 0.0, 4.0)	8	(1.989, 0.209, 3.0)
2	(3.0, 0.0, 3.75)	9	(3.978, 0.418, 2.75)
3	(5.0, 0.0, 3.25)	10	(5.967, 0.627, 2.25)
4	(7.0, 0.0, 2.75)	11	(7.956, 0.836, 1.75)
5	(9.0, 0.0, 2.0)	12	(9.945, 1.0453, 1.0)
6	(11.0, 0.0, 1.25)	13	(11.934, 1.2543, −0.5)
7	(13.0, 0.0, 0.0)		

Çizelge 4.18. 1410 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2) (düğüm noktaları)	CRPSO (Carvalho ve ark. 2018)	ECBO (Cascade) (Kaveh ve Ghazaan 2016)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016)	MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018)	CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)]	**MJA- (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1 (1 –2)	2.5000	7.9969	7.209	5.8499	7.416	5.149	**7.3465**	**6.1902**
2 (1 –8)	6.0000	6.1723	5.006	4.5115	4.768	4.406	**4.2998**	**4.4036**
3 (1 –14)	18.0000	35.5011	38.446	19.4823	38.993	24.590	**31.8485**	**31.2253**
4 (2-3)	9.5000	10.2510	9.438	8.8480	8.966	9.166	**8.8767**	**8.4715**
5 (2-8)	6.0000	5.3727	4.313	5.0084	4.511	5.800	**4.9778**	**4.8590**
6 (2-9)	1.0000	1.3488	1.494	1.3568	1.544	1.883	**1.7469**	**1.5759**
7 (2-15)	29.5000	11.4427	8.455	17.4331	8.371	21.073	**11.6099**	**12.9451**
8 (3-4)	8.0000	9.7157	9.488	9.1098	9.276	8.739	**9.2972**	**9.3263**
9 (3-9)	2.0000	1.3005	3.480	2.8712	3.583	2.005	**3.3406**	**3.2716**
10 (3-10)	1.5000	2.5046	3.495	3.5473	3.476	2.398	**3.2006**	**3.2878**
11(3-16)	1.0000	10.7849	16.037	12.3768	15.531	7.655	**12.1131**	**12.6719**
12 (4-5)	7.5000	10.1954	9.796	10.1099	10.285	9.971	**9.7121**	**10.0979**
13 (4-10)	1.0000	2.2300	2.413	2.5797	2.497	2.350	**2.5294**	**2.5803**
14 (4-11)	6.0000	5.1186	5.681	5.8381	5.397	5.024	**5.8102**	**5.3769**
15 (4-17)	14.5000	14.0053	15.806	13.6402	16.503	18.234	**16.5566**	**16.0581**
16 (5-6)	9.0000	8.9713	8.078	9.9096	8.193	8.825	**8.3162**	**8.6789**
17 (5-11)	1.0000	4.0756	3.931	3.6543	3.829	3.763	**3.2415**	**3.3199**
18 (5-12)	8.0000	5.9211	6.099	6.1529	6.151	5.723	**6.4539**	**6.4966**
19 (5-18)	19.5000	10.6915	10.771	11.2448	10.465	10.207	**10.7040**	**10.8804**
20 (6-7)	16.5000	10.6220	13.775	13.1071	13.925	13.046	**13.8031**	**14.0056**
21 (6-12)	5.0000	4.5064	4.231	5.2361	4.415	5.118	**5.0161**	**5.0843**
22 (6-13)	9.0000	8.4086	6.995	7.0691	6.863	7.340	**7.6509**	**6.9952**
23(6-19)	1.0000	5.8405	1.837	2.0015	1.769	1.029	**1.0762**	**1.0270**
24 (7-13)	5.0000	5.0342	4.397	4.7178	4.339	4.479	**4.3282**	**4.3788**
25 (8-9)	6.5000	3.8932	2.115	2.6101	2.115	2.962	**2.2062**	**2.1951**
26 (8-14)	5.5000	6.1647	4.923	4.5434	4.951	4.519	**4.8730**	**4.2562**
27 (8-15)	7.0000	6.8990	4.047	4.6174	4.147	5.847	**4.8202**	**4.6605**
28 (8-21)	15.5000	11.6387	5.906	9.6758	6.044	11.750	**9.0166**	**8.8694**
29 (9-10)	4.5000	3.8343	3.392	3.6296	3.222	3.925	**3.4591**	**3.2333**

Çizelge 4.18. 1410 elemanlı kubbe kafes yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

30 (9-15)	2.5000	1.4772	1.902	1.4891	1.970	1.697	**1.9876**	**1.7611**
31 (9-16)	2.5000	1.3075	4.381	3.4020	4.290	1.811	**3.4317**	**3.2831**
32 (9-22)	1.0000	4.4876	8.442	6.2153	8.020	3.698	**7.7208**	**7.1936**
33 (10-11)	6.0000	6.0196	5.011	5.9308	4.857	5.396	**4.8261**	**4.9840**
34 (10-16)	1.0000	2.6729	3.577	3.2334	3.689	2.392	**2.9942**	**3.6672**
35 (10-17)	1.0000	1.6342	2.805	2.7173	2.831	2.203	**2.5166**	**2.4062**
36 (10-23)	1.0000	1.8410	2.024	1.3932	1.985	2.718	**1.8493**	**2.1576**
37 (11-12)	10.0000	6.8841	6.709	6.5660	6.373	7.498	**7.1007**	**7.1043**
38 (11-17)	5.5000	4.1393	5.054	4.8170	4.865	4.840	**5.1141**	**5.2070**
39 (11-18)	3.5000	3.3264	3.259	3.2626	3.412	3.457	**4.0067**	**3.6853**
40 (11-24)	1.0000	1.0000	1.063	1.0165	1.027	1.005	**1.0270**	**1.0007**
41 (12-13)	7.5000	6.9373	5.934	7.2529	6.218	6.440	**6.3676**	**6.6302**
42 (12-18)	8.5000	4.4568	7.057	5.9226	7.342	5.787	**6.3443**	**6.6773**
43 (12-19)	7.5000	4.6758	5.745	5.3115	5.458	5.138	**5.2791**	**5.2167**
44 (12-25)	1.0000	1.0084	1.185	1.0010	1.140	1.000	**1.0086**	**1.0016**
45 (13-19)	7.5000	7.5103	7.274	7.7499	7.401	7.239	**7.2667**	**8.1289**
46 (13-20)	6.5000	5.2449	4.798	4.7836	4.578	4.424	**4.3730**	**4.5151**
47 (13-26)	1.0000	1.0550	1.515	1.0035	1.561	1.001	**1.0761**	**1.0010**
En iyi ağırlık (kg)	11 044.617	10 504.200	10 453.840	10 345.120	10 435.470	10 101.360	**10 334.852**	**10 326.296 [10 345.120][1] [10 334.852][2]**
Ortalama ağırlık (kg)	13 017.900	10 590.670	11 100.570	10 393.830	10 658.480	10 175.250	**10 420.668**	**10 399.828**
SD (kg)	1454.813	52.510	334.200	39.150	129.900	51.120	**79.966**	**75.441**
CV (%)	0.389	0.32	0.0000	0.34	0.0000	1.55	**0.0000**	**0.0000**
NSA	20000	19460	50000	17750	80000	10000	**17500**	**16900**

[1]AJA MDVC-UVPS'nin (Kaveh ve Ghazaan 2018) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 14200. analizde elde etmiştir
[2]AJA MJA'nın (Değertekin ve ark. 2019) optimizasyonu sonucu elde ettiği ağırlığı 15000. analizde elde etmiştir

Çizelge 4.19. 1410 elemanlı kubbe kafes yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

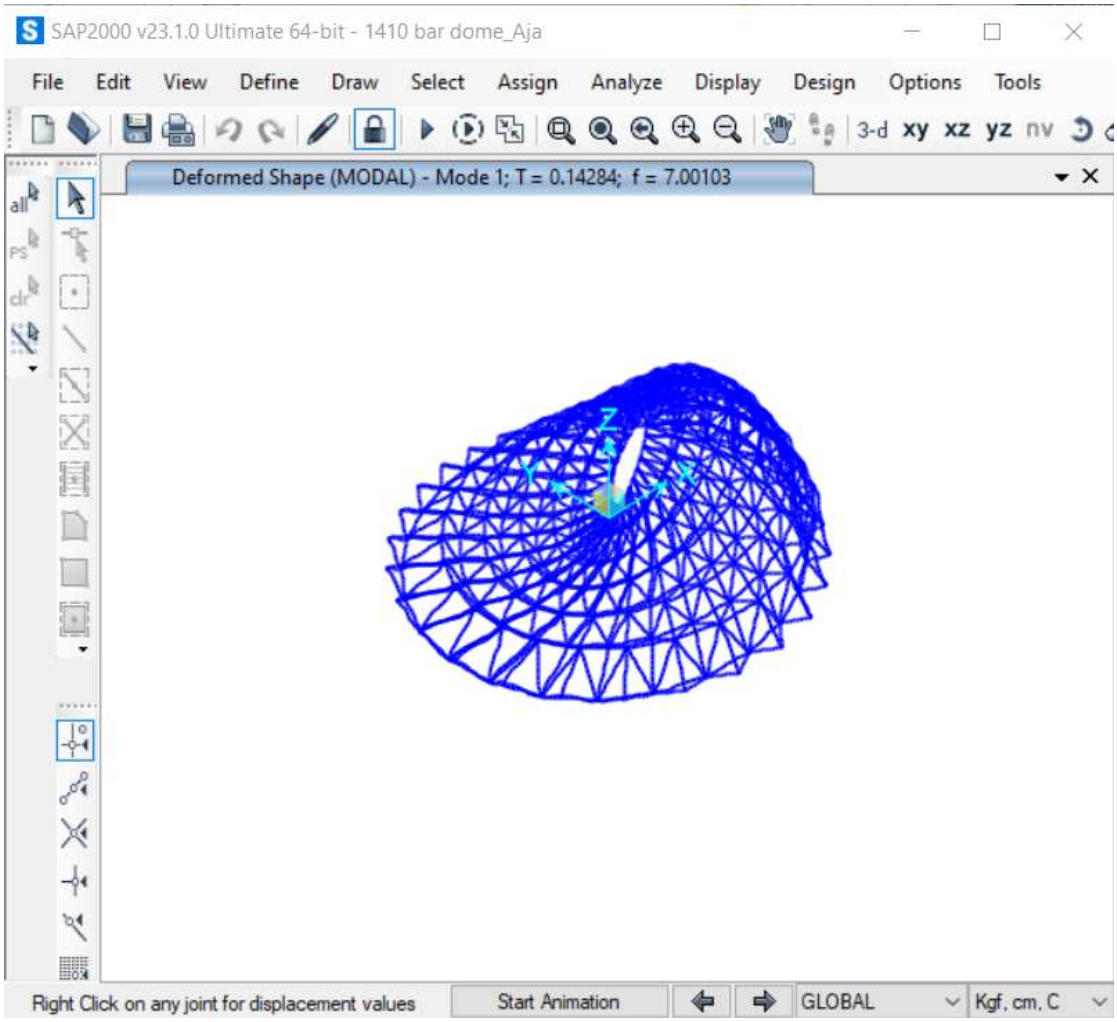
Frekans Numarası (Hz)	CRPSO (Carvalho ve ark. 2018)	ECBO (Cascade) (Kaveh ve Ghazaan 2016)	DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016)	MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018)	CPA (Kaveh ve Zolghadr 2018)	CGFA (Kaveh ve Javadi 2019)]	**MJA- (Değertekin ve ark. 2019)**	**AJA**
1	7.0008	7.0020	7.0010	7.0000	7.0000	7.0020	**7.0003**	**7.0009**
1*	**6.9880**	**6.9930**	**7.0015**	**6.9911**	**7.0000**	**6.9581**	**7.0003**	**7.0009**
2	**	7.0030	7.0010	7.0010	7.0000	7.0040	**7.0003**	**7.0009**
3	9.0068	9.0010	9.0030	9.0000	9.0000	9.0020	**9.0000**	**9.0001**
3*	**8.9650**	**8.9710**	**9.0026**	**8.9690**	**9.0012**	**8.8608**	**9.0000**	**9.0001**
4	**	9.0010	9.0050	9.0000	9.0020	9.0080	**9.0002**	**9.0002**
5	**	9.0030	9.0050	9.0000	9.0020	9.0090	**9.0002**	**9.0002**

[*] SAP 2000 v23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri
[**]Mevcut değil

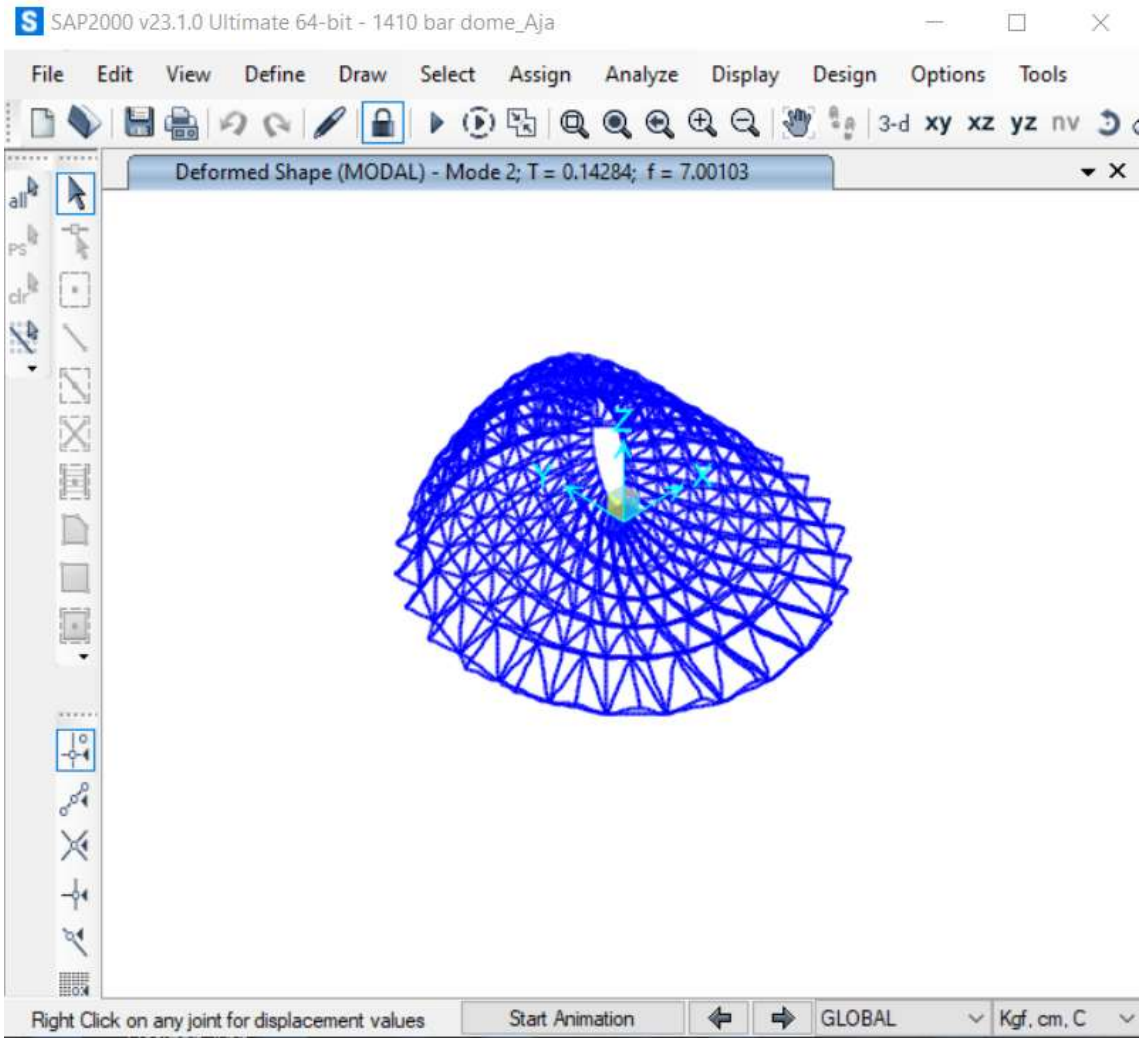
Çizelge 4.18.'de CRPSO (Carvalho ve ark. 2018) , ECBO (Kaveh ve Ghazaan 2016), MDVC-UVPS (Kaveh ve Ghazaan 2018) ve CGFA (Kaveh ve Javadi 2019), yöntemleri ile elde edilen tasarımlar frekans sınırlayıcılarını ihlal ederken AJA, MJA (Değertekin ve ark. 2019), DPSO (Kaveh ve Zolghadr 2016) ve CPA(Kaveh ve Zolghadr 2018) yöntemleri ile bulunan tasarımlar frekans sınırlayıcılarını sağlamaktadır. Çizelge 4.18.'de AJA 10326.296 kg ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi optimum çözümü elde etmiştir.

Ayrıca Çizelge 4.18.'de AJA'nın, 16900 yapı analizine karşın, 10000 yapısal analiz gerektiren, CGFA'dan sonra en hızlı ikinci optimizasyon yöntemi olduğunu göstermektedir. Diğer yöntemler 17750 ile 80000 arasında analiz gerektirmiştir.

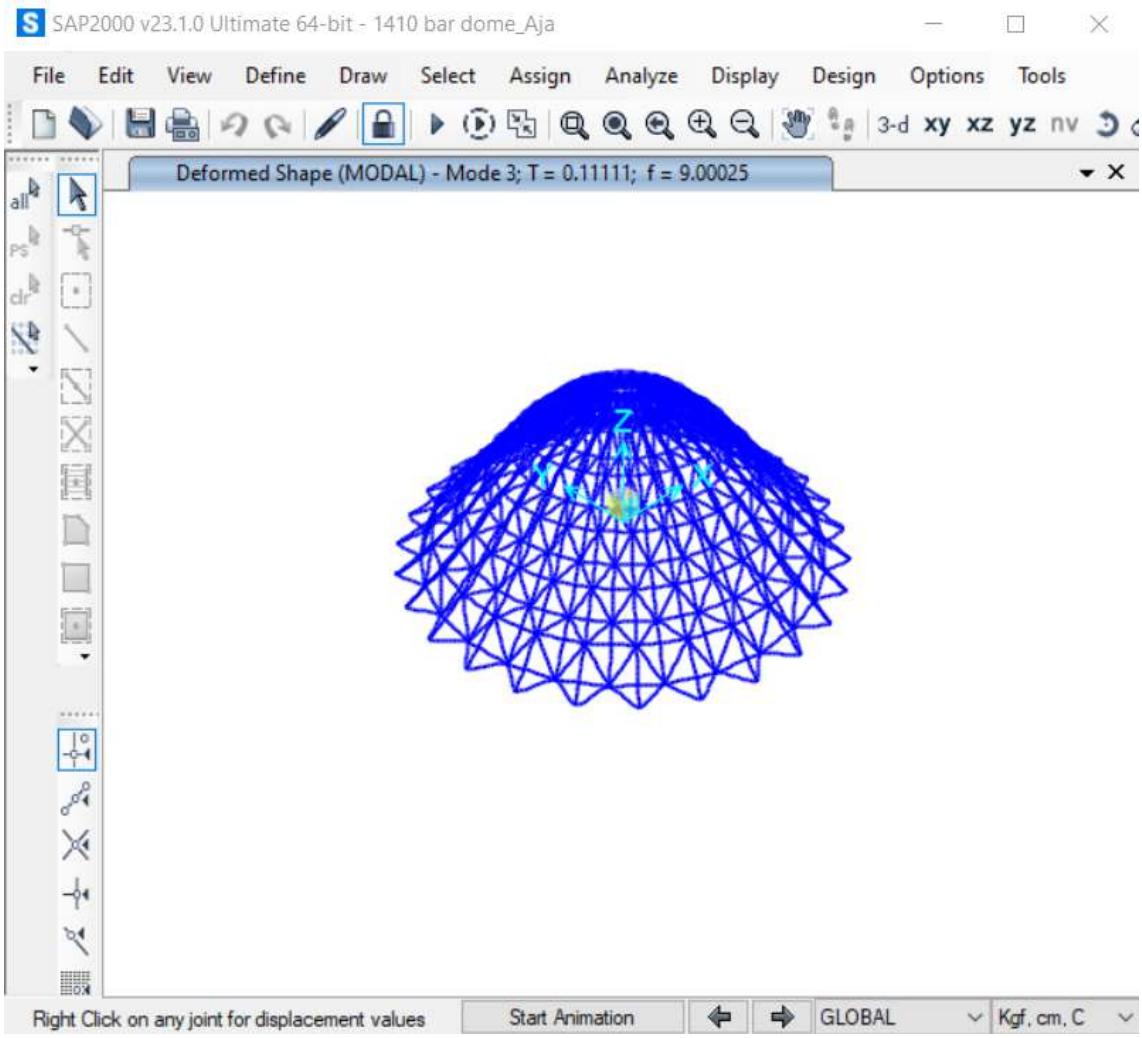
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk beş moduna ait sonuçlar Şekil 4.22.(a-e)'de sunulmuştur. Şekil 4.22.'den görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



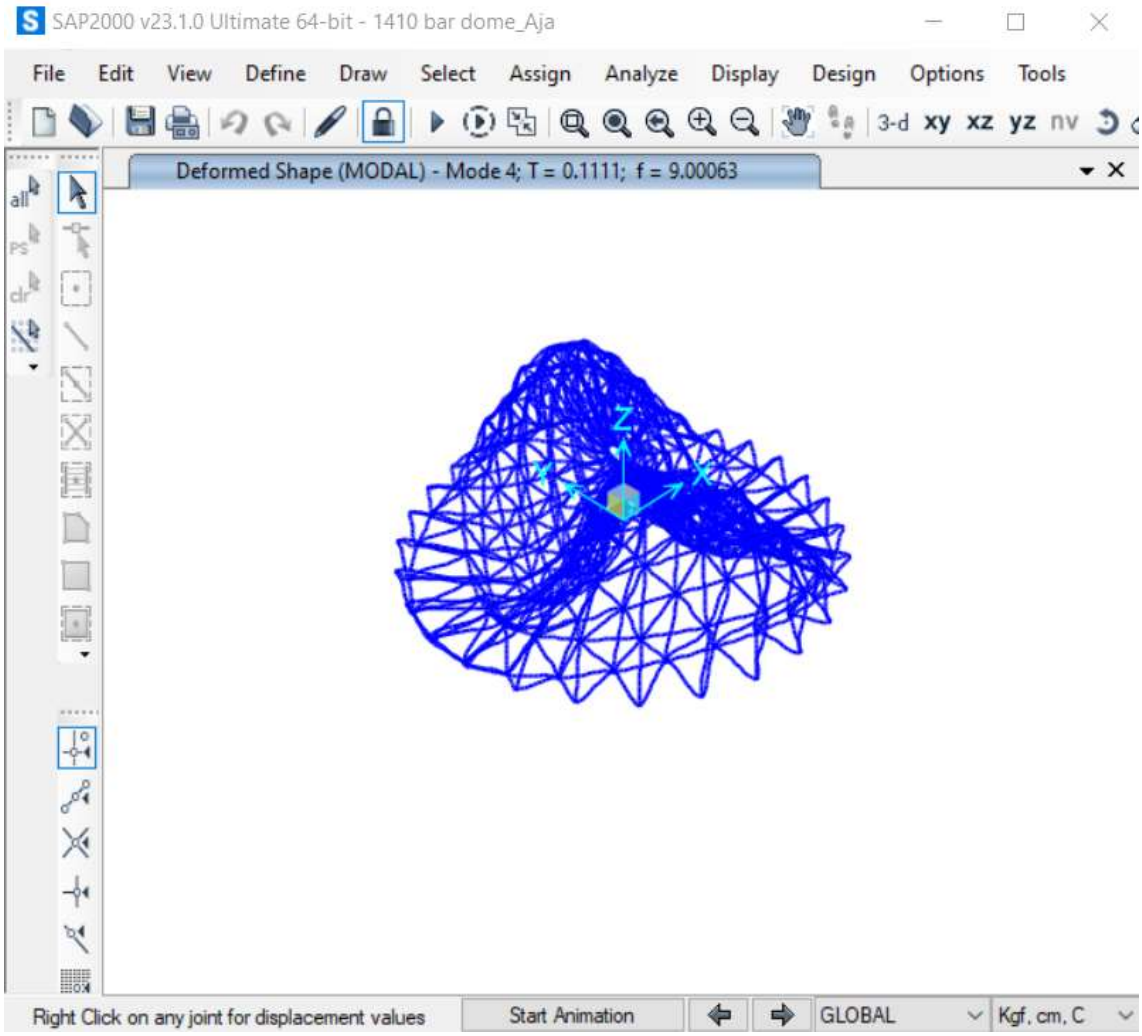
Şekil 4.22.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının 1. Modu



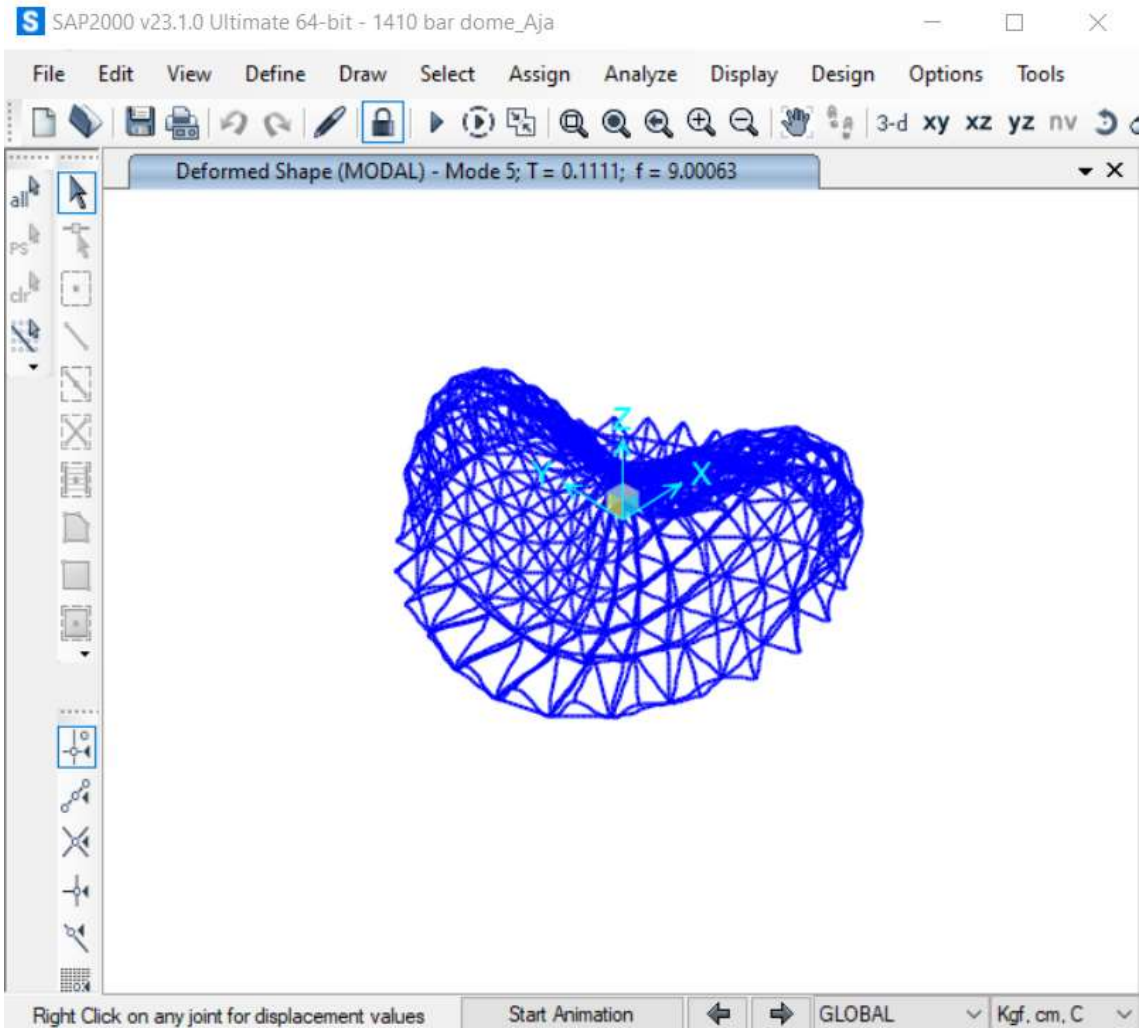
Şekil 4.22.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının 2. Modu



Şekil 4.22.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının 3. Modu

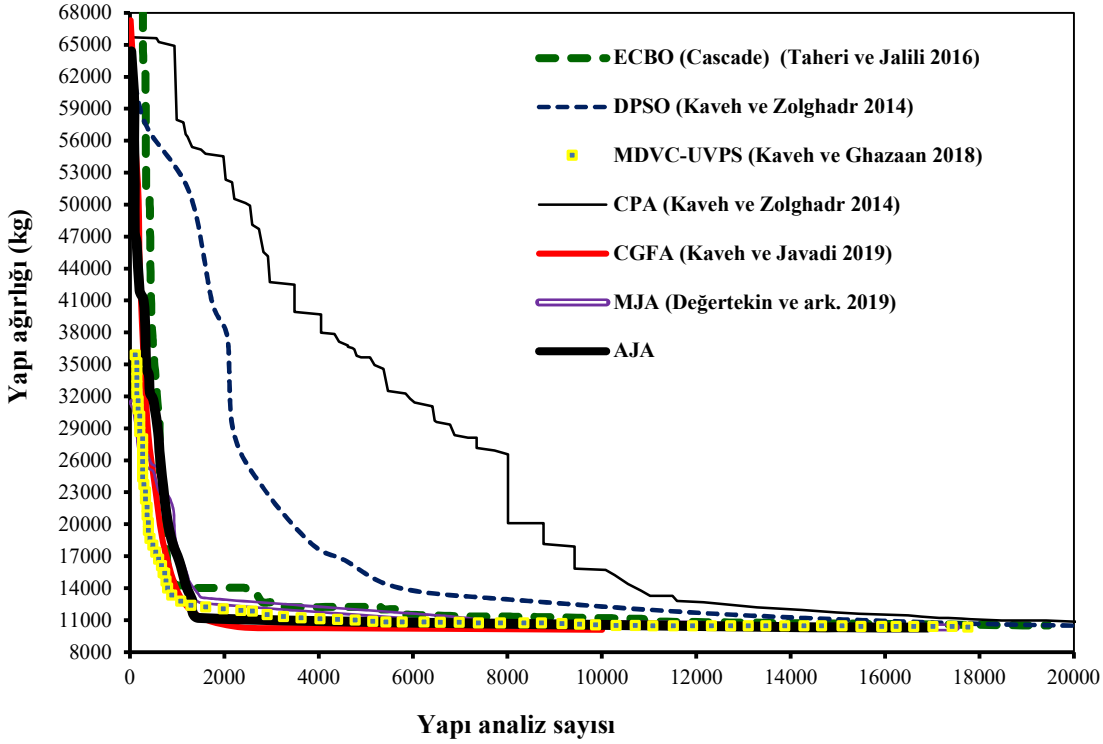


Şekil 4.22.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının 4. Modu



Şekil 4.22.(e). SAP 2000 V23 ile modellenen 1410 elemanlı kubbe kafes yapının 5. Modu

AJA ve diğer yöntemlere ait yakınsama eğrileri Şekil 4.23.'de gösterilmektedir. Şekil 4.23.'deki yakınsama eğrisi AJA'nın başlangıçtan itibaren diğer yöntemlerden daha hızlı olduğunu ve güçlü bir yakınsama kabiliyetinin olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.23. 1410 elemanlı uzay kubbe kafes yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

4.2. Çerçeve Yapılar

Bu doktora tez çalışmasında doğal frekans sınırlayıcıları altında yapıların optimizasyonu konusunda kafes ve kubbe yapılar dışında optimize edilen bir diğer yapı sistemi çerçeve yapılar olup, bu konuda yapılan çalışmalar kafes ve kubbe yapılara kıyasla oldukça azdır. Düzlem ve uzay çelik çerçeve sistemlerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimizasyonu konusunda optimumluk kriteri (McGee ve Phan 1992), rayleigh yaklaşımı (Salajegheh 2000), döngüsel programlama (Sedagahati 2005) yöntemleri kullanılmıştır. Ancak bu çalışmalarda eleman gruplarına ait enkesitler başta olmak üzere bazı önemli çıktıların verilmediği görülmüştür. Bu konuda sezgisel optimizasyon yöntemleri (PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO) kullanılarak Zakian (2019) tarafından yapılan ve sonuçların sunulduğu sadece bir çalışma mevcuttur. Bu tez çalışmasında önerilen yöntemlerin geçerliliği üç adet düzlem ve iki adet uzay çerçeve yapı üzerinde test edilmiştir. Kafes sistemlere benzer şekilde tüm yapı analiz ve Optimizasyon işlemleri MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. AJA ve MJA'dan elde edilen optimum tasarımlar SAP 2000 V23'te modellenmiş ve aynı doğal Frekans

değerleri elde edilmiştir. Böylece MATLAB'ta yapılan kodlamanın doğruluğu sağlanmıştır.

Çalışmada önerilen algoritmalar, her tasarım örneği için farklı başlangıç popülasyonları için 20 kez icra edilmiştir. Bu yirmi farklı icra sonunda en hafif çerçeve yapının elde edildiği icra sonucundaki optimum ağırlık ve bu ağırlığı elde etmek için gerekli yapı analiz sayısı (NSA) çizelgelerde sunulmuştur. Ayrıca, yirmi farklı icra sonucunda elde edilen tasarımlara ait ortalama ağırlık, en kötü ağırlık ve standart sapma (SD) gibi bazı istatistiksel parametrelerde çizelgelerde verilmiştir.

Önerilen yöntemlerden elde edilen sonuçlarla doğru bir kıyaslama yapılabilmesi için literatürdeki çalışmalarla aynı malzeme özellikleri ile yük değerleri kullanılmıştır ve bu değerler Çizelge 4.20.'de özetlenmiştir. Çelik çerçeve yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımı konusunda daha önce yapılan tüm çalışmalardaki tüm girdiler ve sonuçlar "Amerikan Birim Sistemi'ne" göre verildiğinden, literatürle tam bir uyum olması ve yuvarlatma hatalarının önüne geçilmesi için sonuçlar "Amerikan Birim Sistemi'ne" göre verilmiştir.

Çizelge 4.20. Çerçeve yapıların malzeme özellikleri, kesit alanlarının alt-üst sınır değerleri ve doğal frekans sınır değerleri

Test örnekleri	**Elastisite modülü E (lb/in^2)**	**Malzeme yoğunluğu ρ (lb/in^3)**	**Poisson oranı**	**Kesit alanı sınırları (in^2)**	**Doğal frekans sınırlamaları (Hz)**
6 elemanlı düzlem	3×10^7	0.28	0.3	$3<A<88.28$	$\omega_1\geq 5$, $\omega_2\geq 18$, $\omega_3\geq 35$
21 elemanlı düzlem	3×10^7	0.28	0.3	$7.9187\leq A\leq 88.28$	$\omega_1=1.6234$
70 elemanlı düzlem	3×10^7	0.28	0.3	$3<A<88.28$	$\omega_1\geq 2$, $\omega_2\geq 7$, $\omega_3\geq 15$
8 elemanlı uzay	3×10^7	0.28	0.3	$0.1\leq A\leq 88.3$	$\omega_1\geq 5$, $\omega_2\geq 9$, $\omega_3\geq 15$
180 elemanlı uzay (sürekli değişken)	3×10^7	0.28	0.3	$0.1\leq A\leq 88.3$	$\omega_1\geq 0.5$, $\omega_2\geq 0.8$, $\omega_3\geq 1.2$
180 elemanlı uzay (ayrık değişken)	3×10^7	0.28	0.3	$0.1\leq A\leq 88.3$	$\omega_1\geq 0.5$, $\omega_2\geq 0.8$, $\omega_3\geq 1.2$

* 1 in=2.54 cm
** 1lb=4.45x10^{-3} kN

Kafes ve kubbe yapılarda farklı olarak I_z, I_y ve J değerleri enkesit alanına bağlı olarak şu şekilde tanımlanırlar (Zakian 2019):

$$I_z = \begin{cases} 4.6248\,X^2, & 0 < x < 44.2\ in^2 \\ 256x - 2300, & 44.2 < x < 88.3\ in^2 \end{cases} \quad \textbf{(4.1)}$$

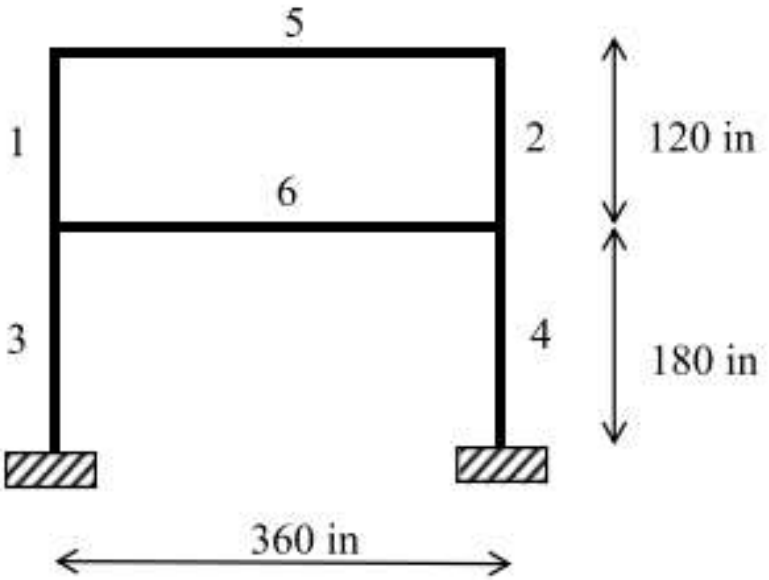
$$\boldsymbol{I_y = \begin{cases} 0.1248\,X^2, & 0 < x < 61.8\ in^2 \\ 91.207x - 5225.59, & 61.8 < x < 67.6\ in^2 \\ 17.618x - 255.29, & 67.6 < x < 88.3\ in^2 \end{cases}} \quad \textbf{(4.2)}$$

$$J = 0.0072x^2, \quad 0 < x < 88.3in^2 \qquad (1\ \text{in}^2 = 6.4516\ \text{cm}^2) \quad \textbf{(4.3)}$$

Burada I_z ; z eksenine göre enkesit atalet momentini, I_y ; y eksenine göre enkesit atalet momentini, J;burulma momentini ve x; enkesit alanını ifade etmektedir.

4.2.1. 6 Elemanlı Düzlem Çelik Çerçeve

Bu tez çalışmasındaki ilk çelik çerçeve tasarım örneği, Şekil 4.24.'te verilen 6 elemanlı düzlem çerçeve yapıdır. Yapı Şekil 4.24.'te gösterilen ve Çizelge 4.21.'de verilen 6 tasarım değişkenine sahiptir. Çerçeve sistemin tüm kirişlerine 10 lb/in (1 lb/in= 0.00011298 kN/m) düzgün yayılı yük ilave edilmiştir. Yapı daha önce Zakian (2019) tarafından farklı yöntemlerle (PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO) optimize edilmiştir. Çizelge 4.21.'de AJA, MJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.22.'de ise Çizelge 4.21.'deki tasarım sonuçlarına ait ilk üç doğal frekans değeri verilmiştir.



Şekil 4.24. 6 elemanlı düzlem çerçeve (Zakian 2019) (1 in = 2.54 cm)

Çizelge 4.21. 6 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri(in^2) *	PSO (Zakian 2019)	CSS (Zakian 2019)	TLBO (Zakian 2019)	GWO (Zakian 2019)	IGWO (Zakian 2019)	**MJA**	**AJA**
1	10.4830	3.7755	10.4979	3.8064	10.7295	**3.0000**	**3.0000**
2	3.7418	10.4271	3.7411	10.5934	3.7342	**10.5818**	**10.6221**
3	29.7480	3.0065	29.7384	3.0000	29.5943	**3.8320**	**3.8315**
4	3.0000	29.7753	3.0000	29.7558	3.0002	**30.2273**	**30.1994**
5	3.0000	3.0017	3.0000	3.0225	3.0011	**3.0000**	**3.0000**
6	3.0000	3.0034	3.0000	3.0000	3.0000	**3.0000**	**3.0000**
En iyi Ağırlık (lb) **	2733.2520	2734.7324	2733.2460	2741.7958	2733.6560	**2777.7406**	**2777.6554**
Ortalama Ağ. (lb) **	2795.2559	2778.2240	2733.5099	2795.5196	2736.7087	**2787.9090**	**2787.73820**
SD (lb) **	126.1530	145.6291	0.3566	27.1642	4.9400	**11.1924**	**9.99500**
CV (%)	**7.7976**	**7.6703**	**7.7985**	**7.7267**	**7.7828**	**0.00000**	**0.00000**
NSA	2000	2000	2000	2000	2000	**2070**	**1960**

* 1 in^2 = 6.4516 cm^2
** 1lb=0.4536kg

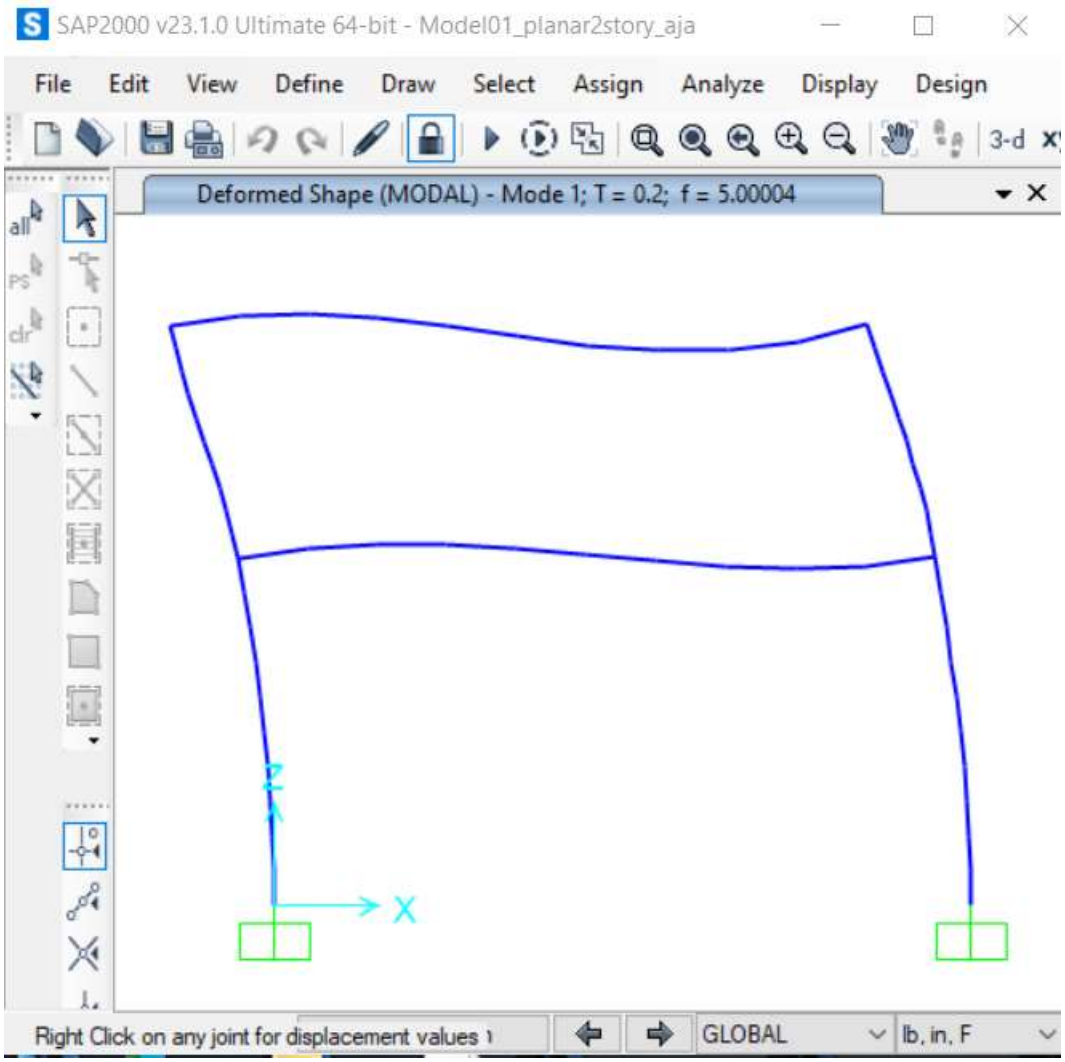
Çizelge 4.22. 6 elemanlı düzlem çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

Frekans No (Hz)	PSO (Zakian 2019)	CSS (Zakian 2019)	TLBO (Zakian 2019)	GWO (Zakian 2019)	IGWO (Zakian 2019)	**MJA**	**AJA**
1	5.0000	5.0002	5.0000	5.0122	4.9999	**5.0001**	**5.0000**
1*	**4.9488**	**4.9491**	**4.9488**	**4.9606**	**4.9482**	**5.0002**	**5.0000**
2	18.7548	18.7198	18.7648	18.8507	18.9200	**18.5433**	**18.5698**
2*	**18.3309**	**18.2960**	**18.3409**	**18.4281**	**18.4973**	**18.5434**	**18.5698**
3	35.0011	35.0113	35.0001	35.1406	35.0068	**35.0028**	**35.0009**
3*	**32.2709**	**32.3154**	**32.2705**	**32.2957**	**32.2760**	**35.0030**	**35.0010**

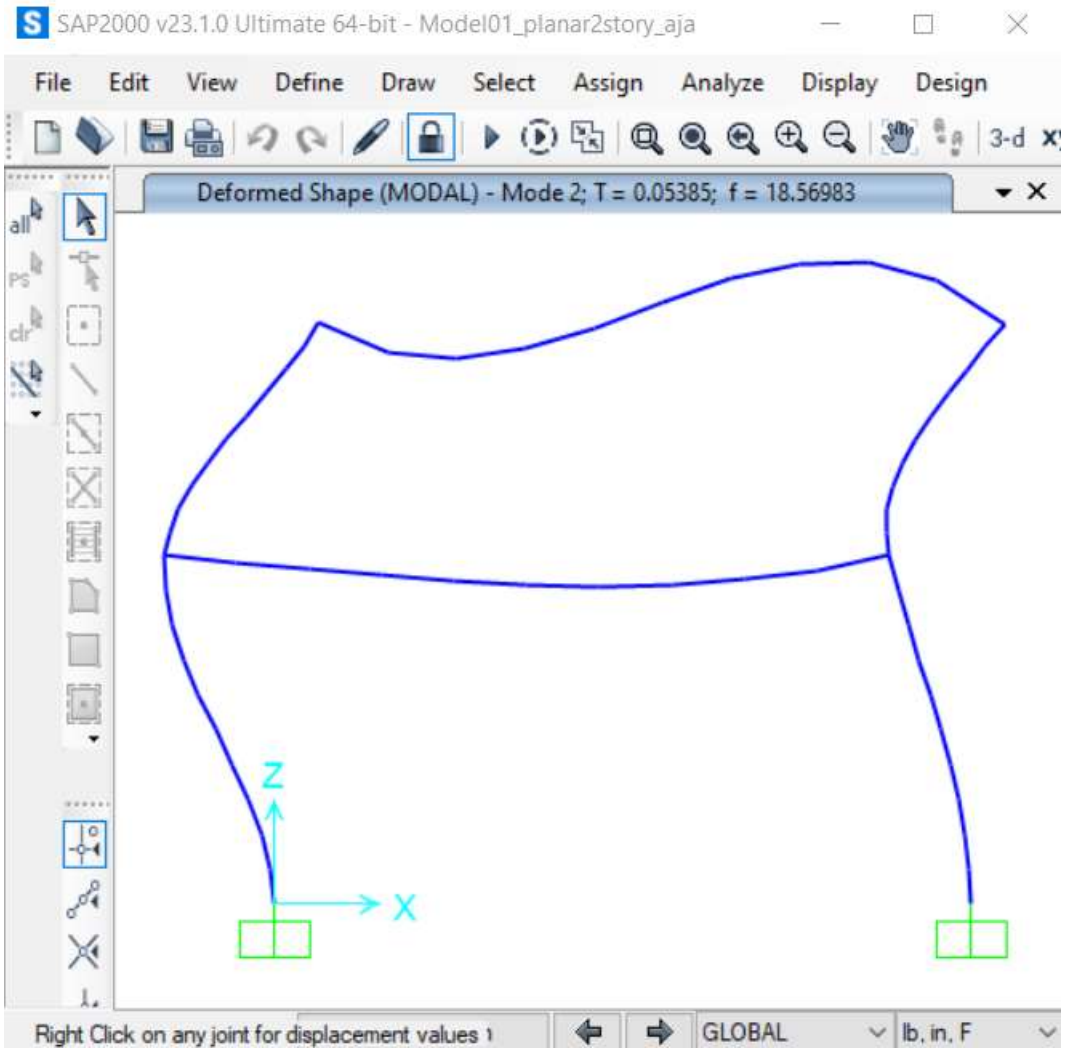
* SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

Çizelge 4.21.'de Zakian (2019) tarafından kullanılan tüm yöntemlerin (PSO, CSS, TLBO, GWO, IGWO) doğal frekans sınırlayıcılarını %7.6703-%7.7985 arasında değişen oranlarda ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın, AJA 2777.6554 lb (1lb=0.4536kg) yapı ağırlığı ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi tasarımı elde etmiştir. Bu durumda tüm sınırlayıcıları sağlayan AJA'nın en başarılı yöntem olduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.21.'de AJA'nın, 1960 yapı analizine karşın, diğer yöntemler 2000 yapı analizi gerektirmiştir.

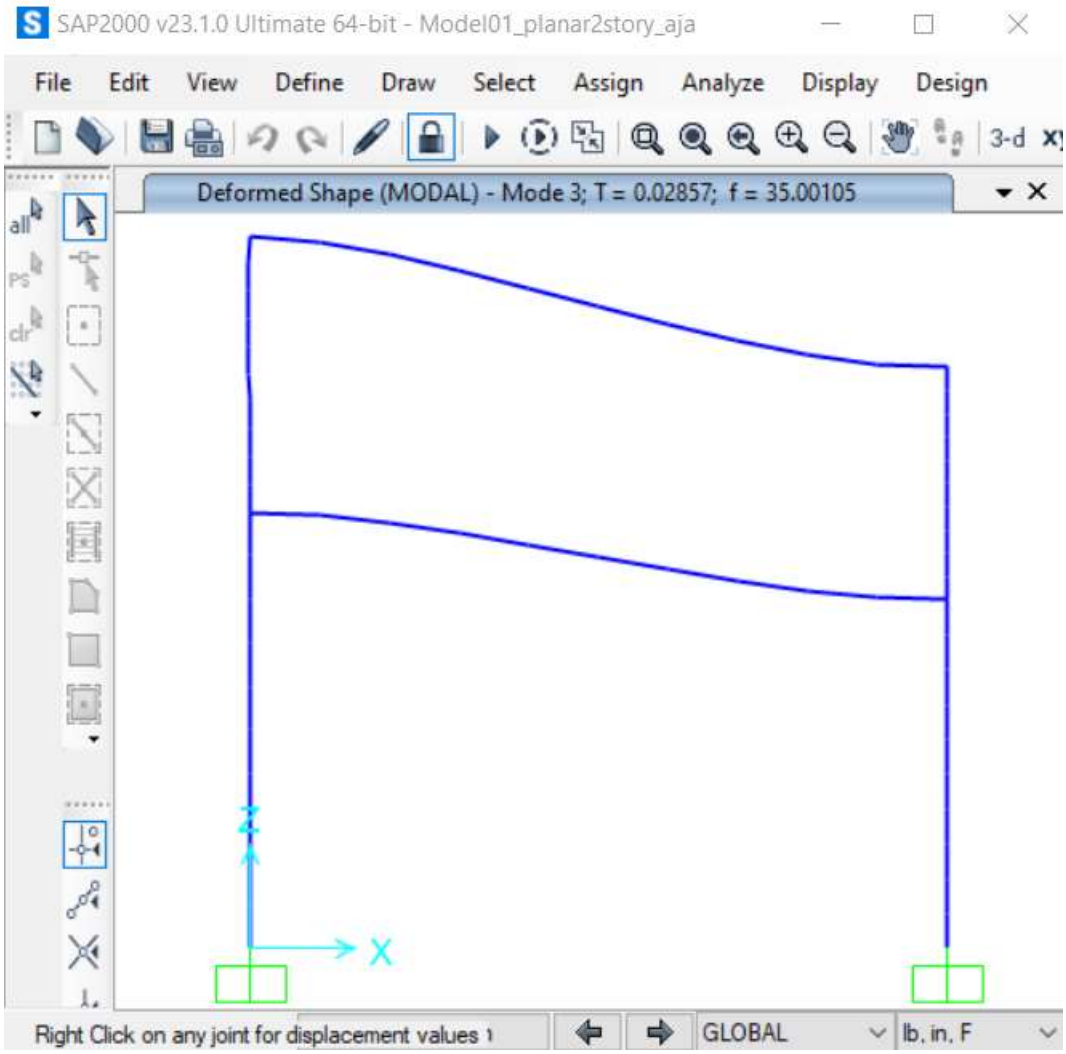
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk üç moduna ait sonuçlar Şekil 4.25.(a-c)'de sunulmuştur. Şekil 4.25.'ten görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



Şekil 4.25.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 6 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 1. Modu

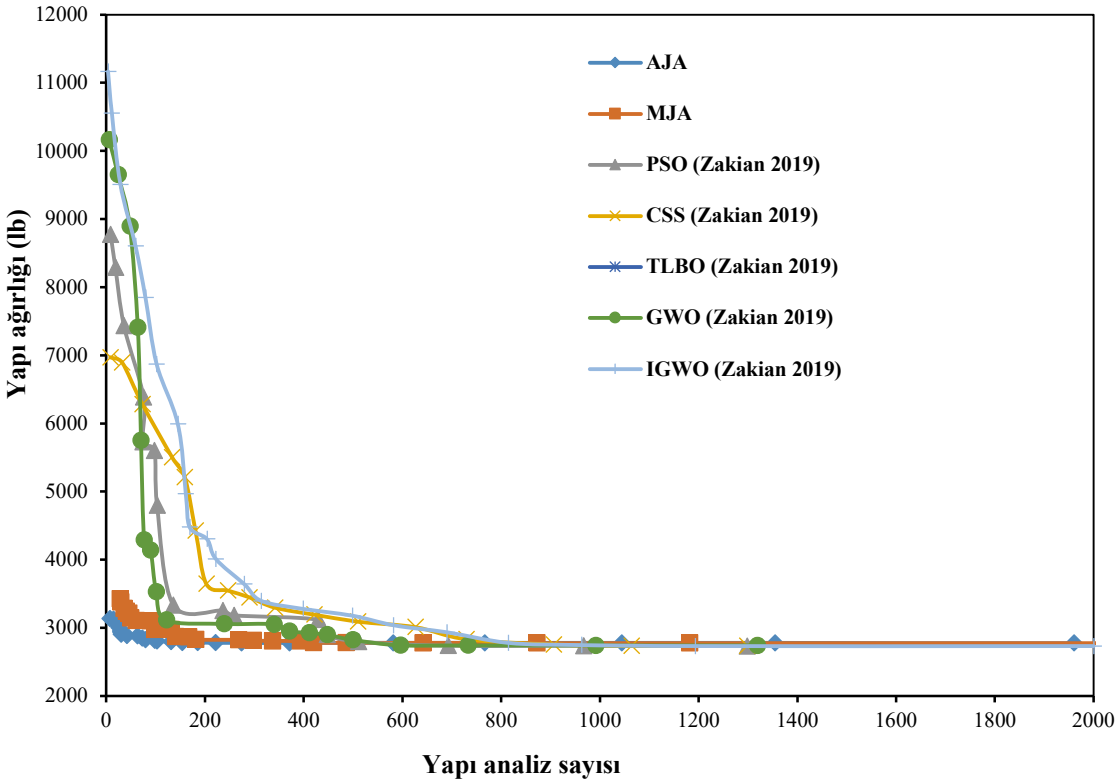


Şekil 4.25.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 6 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 2. Modu



Şekil 4.25.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 6 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 3. Modu

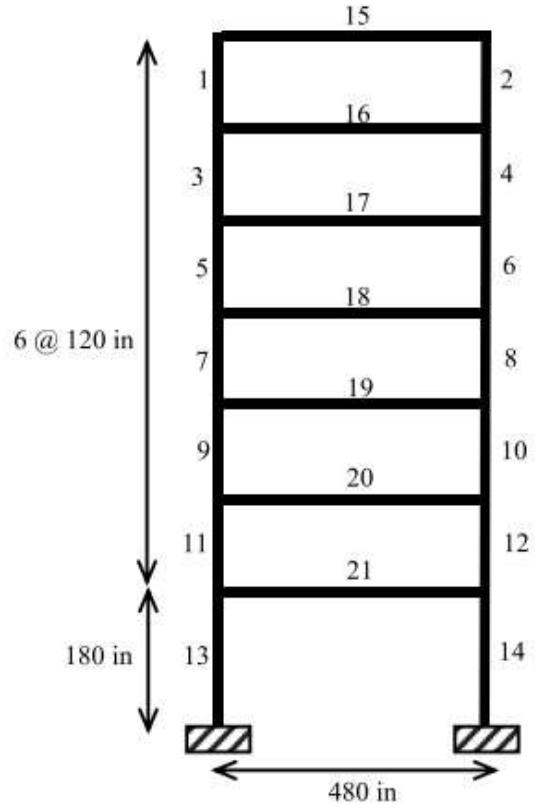
AJA ve MJA'nın diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.26.'da gösterilmektedir. Sunulan yakınsama eğrileri AJA'nın ve MJA'nın başlangıçtan itibaren diğer yöntemlerden daha hızlı olduğunu ve güçlü bir yakınsama kabiliyeti olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.26. 6 elemanlı düzlem çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (1lb=0.4536kg)

4.2.2. 21 Elemanlı Düzlem Çelik Çerçeve

Bu tez çalışmasındaki çelik çerçeve tasarım problemlerinden ikincisi, Şekil 4.27.'de verilen 21 elemanlı düzlem çerçevedir. Yapı Şekil 4.27.'de gösterilen ve Çizelge 4.23.'te verilen 21 tasarım değişkenine sahiptir. Çerçeve sistemin tüm kirişlerine 10 lb/in (1 lb/in= 0.00011298 kN/m) düzgün yayılı yük ilave edilmiştir. Düzlem çerçeve yapı daha önce Zakian (2019) tarafından PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 4.23.'te AJA, MJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.24.'te ise Çizelge 4.23.'teki tasarım sonuçlarına ait ilk üç doğal frekans değeri verilmiştir.



Şekil 4.27. 21 elemanlı düzlem çerçeve (Zakian 2019) (1 in = 2.54 cm)

Çizelge 4.23.'te Zakian (2019) tarafından kullanılan yöntemlerin (PSO, CSS, TLBO, GWO, IGWO) %0.073-%0.224 arasında değişen oranlarda frekans sınırlayıcılarını ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın, AJA 16114.418 lb (1lb=0.4536kg) yapı ağırlığı ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi tasarımı elde etmiştir. Ayrıca Çizelge 4.23.'te AJA'nın, 3600 yapı analizine karşın, diğer yöntemler 2000 ile 4000 yapısal analizi gerektirmiştir.

Çizelge 4.23. 21 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri (in^2) *	PSO (Zakian 2019)	CSS (Zakian 2019)	TLBO (Zakian 2019)	GWO (Zakian 2019)	IGWO (Zakian 2019)	**MJA**	**AJA**
1	7.919	7.970	7.919	7.919	7.920	**7.919**	**7.919**
2	7.919	7.954	7.920	7.919	7.919	**7.919**	**7.919**
3	7.919	7.951	7.920	7.919	8.099	**7.919**	**7.919**
4	7.919	7.940	7.919	7.919	7.937	**7.919**	**7.919**
5	7.919	8.159	7.921	7.919	7.977	**7.919**	**7.923**
6	15.969	8.030	7.919	8.802	8.733	**7.919**	**7.919**
7	7.919	8.014	9.494	7.919	9.716	**7.924**	**7.919**
8	11.134	9.196	7.920	14.193	8.061	**9.486**	**9.478**
9	26.711	11.869	7.919	7.919	8.456	**11.429**	**11.326**
10	7.919	8.026	11.166	7.999	10.099	**7.939**	**7.966**
11	44.194	8.009	13.746	14.397	14.256	**7.919**	**7.919**
12	7.919	13.415	7.919	10.512	7.923	**14.071**	**14.074**
13	71.522	7.992	40.479	8.983	41.524	**7.919**	**7.919**
14	7.919	41.860	7.919	46.167	7.919	**41.238**	**41.121**
15	7.919	7.922	7.919	7.919	7.920	**7.919**	**7.919**
16	7.919	7.926	7.920	7.919	7.919	**7.919**	**7.919**
17	16.399	8.677	9.515	7.919	9.251	**9.540**	**9.588**
18	7.919	13.187	13.002	14.785	12.849	**12.896**	**12.845**
19	7.919	14.160	14.337	12.640	14.860	**14.437**	**14.395**
20	7.919	14.860	14.651	16.087	13.937	**14.266**	**14.376**
21	7.919	8.049	7.919	7.919	7.919	**7.919**	**7.919**
En iyi Ağırlık (lb) **	18015.072	16142.397	16105.118	16625.483	16123.887	**16114.502**	**16114.418**
Ortalama Ağ. (lb) **	21748.073	16193.186	16141.284	16.845.6255	16148.840	**16133.946**	**16136.586**
SD (lb) **	3144.883	45.698	55.752	151.195	20.660	**22.076**	**19.727**
CV (%)	**0.086**	**0.073**	**0.075**	**0.224**	**0.075**	**0.000**	**0.000**
NSA	4000	2000	2200	4000	4000	**3800**	**3600**

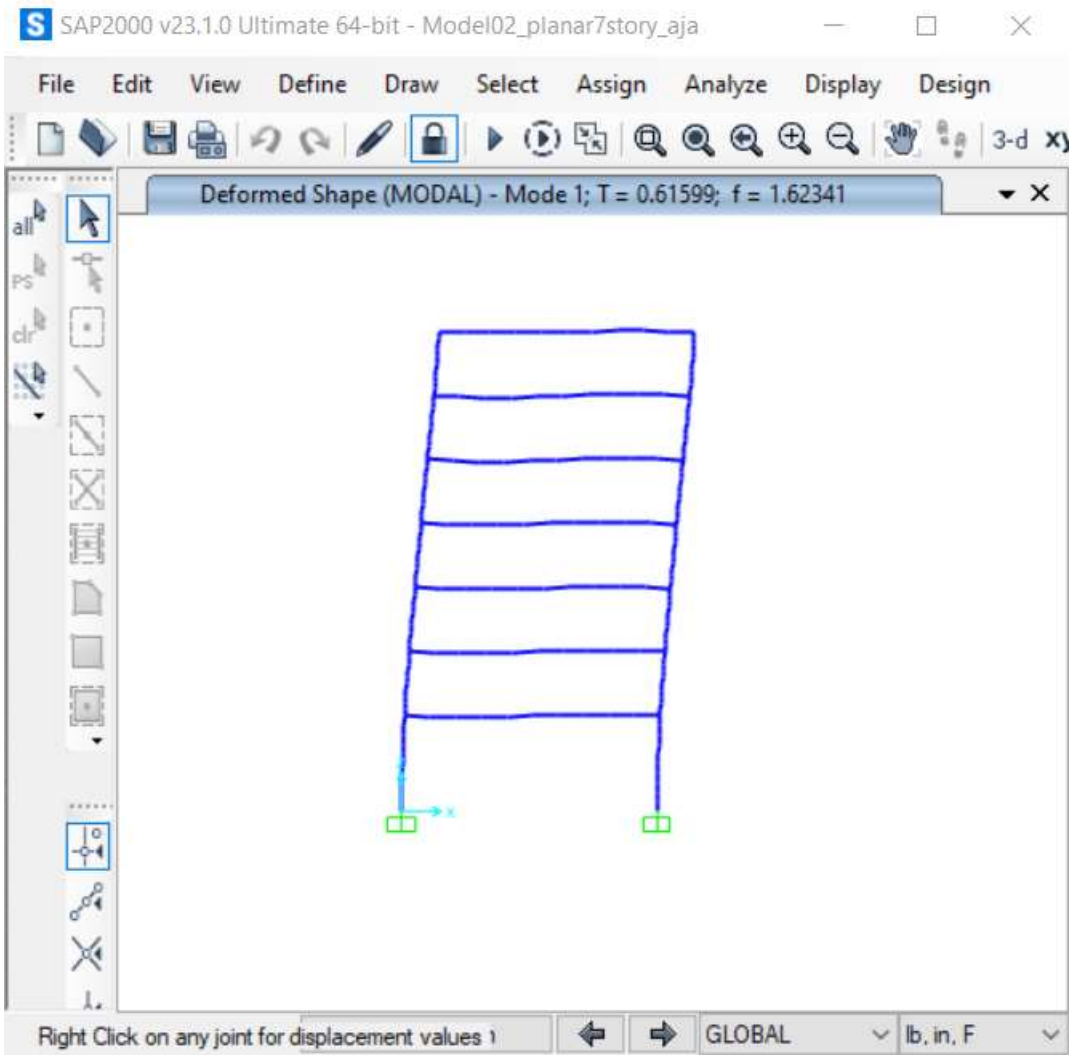
* 1 in^2 = 6.4516 cm^2
** 1lb=0.4536kg

Çizelge 4.24. 21 elemanlı düzlem çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

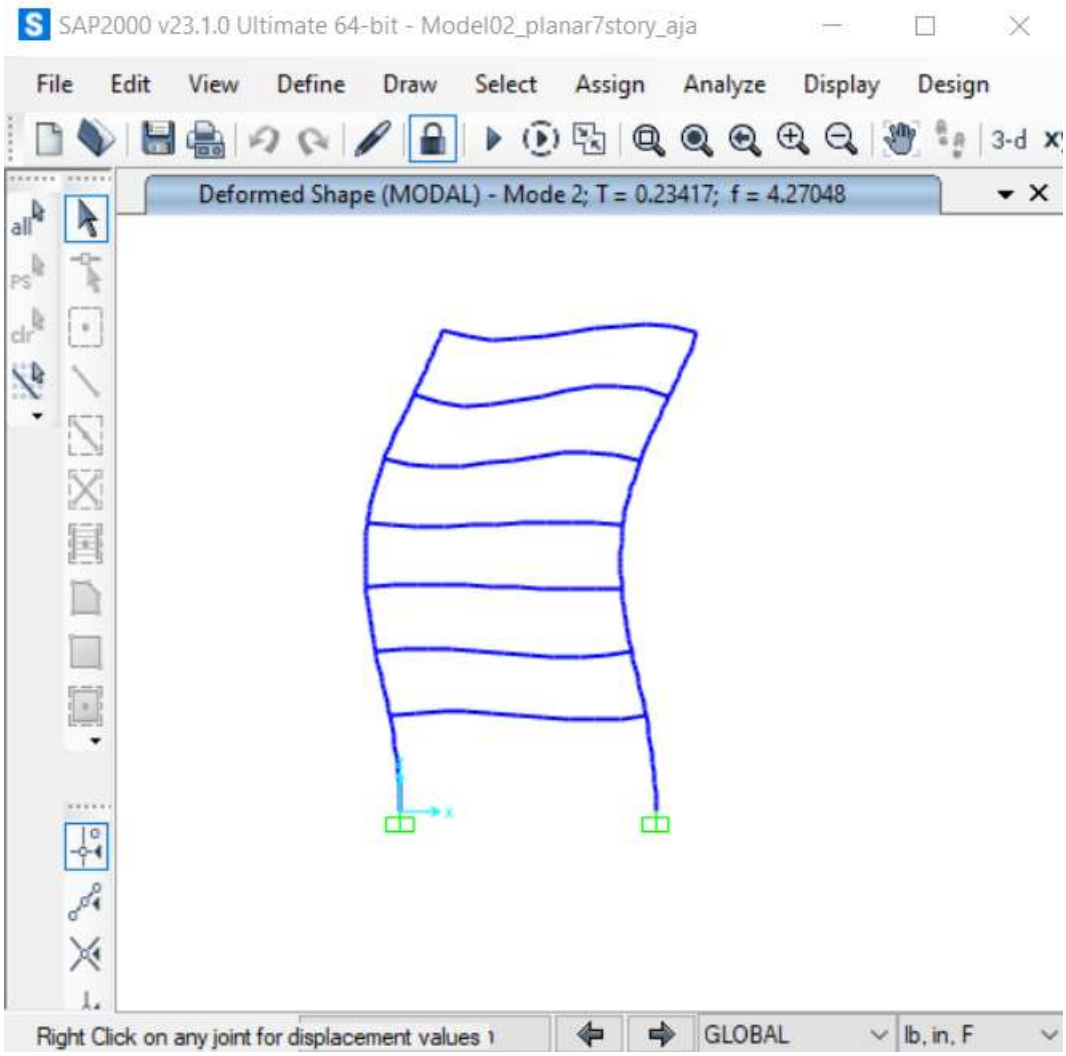
Frekans No (Hz)	PSO (Zakian 2019)	CSS (Zakian 2019)	TLBO (Zakian 2019)	GWO (Zakian 2019)	IGWO (Zakian 2019)	**MJA**	**AJA**
1	1.6234	1.6234	1.6234	1.6282	1.6234	**1.6234**	**1.6234**
1*	**1.6220**	**1.6222**	**1.6222**	**1.6270**	**1.6222**	**1.6234**	**1.6234**
2	4.9392	4.2478	4.2602	4.2784	4.2616	**4.2671**	**4.2705**
2*	**4.9304**	**4.2450**	**4.2569**	**4.2765**	**4.2585**	**4.2671**	**4.2705**
3	8.6486	8.1862	8.1026	8.4829	8.2172	**8.1309**	**8.1189**
3*	**8.6599**	**8.1884**	**8.1044**	**8.4795**	**8.2191**	**8.1309**	**8.1189**

* SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

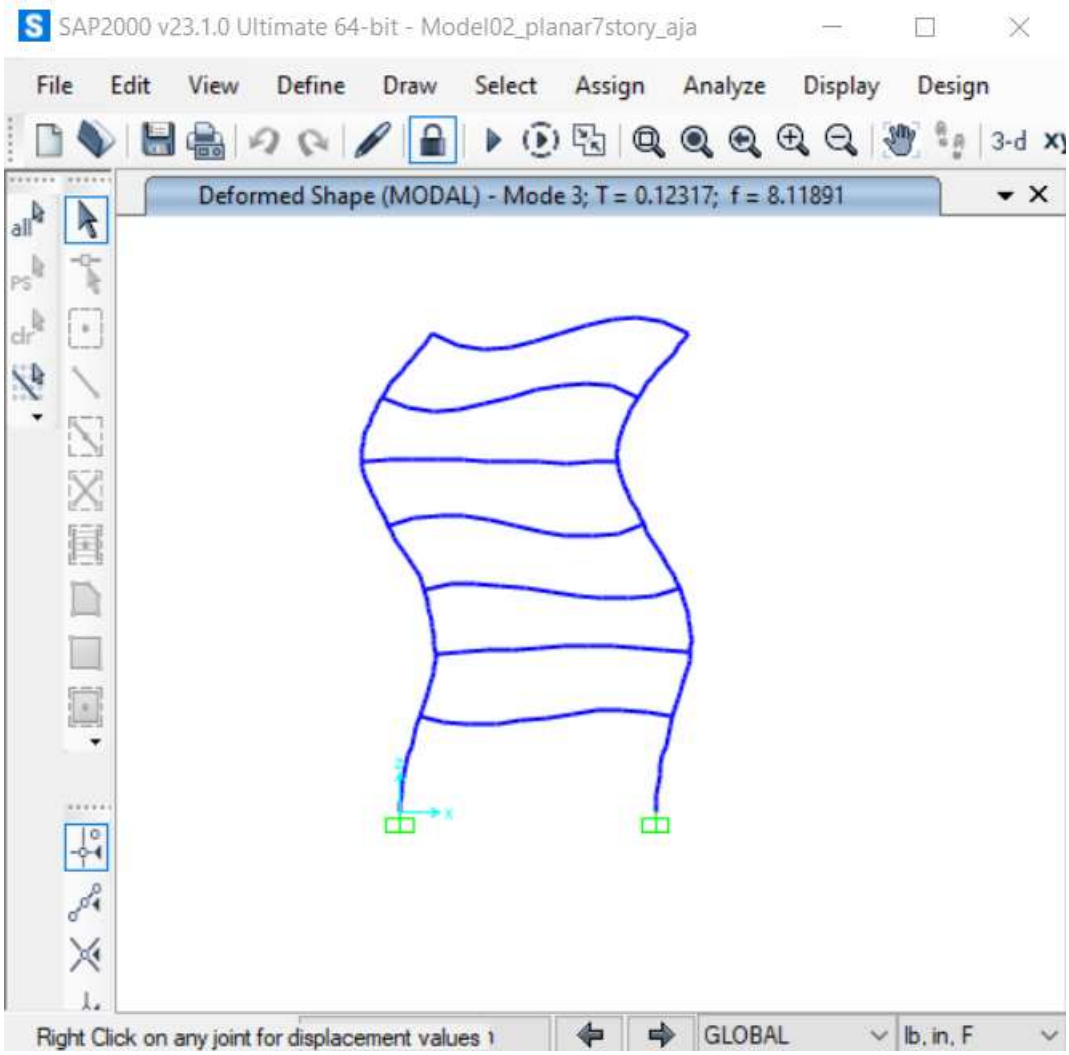
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk üç moduna ait sonuçlar Şekil 4.28.(a-c)'de sunulmuştur. Şekil 4.28.'den görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



Şekil 4.28.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 21 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 1. Modu

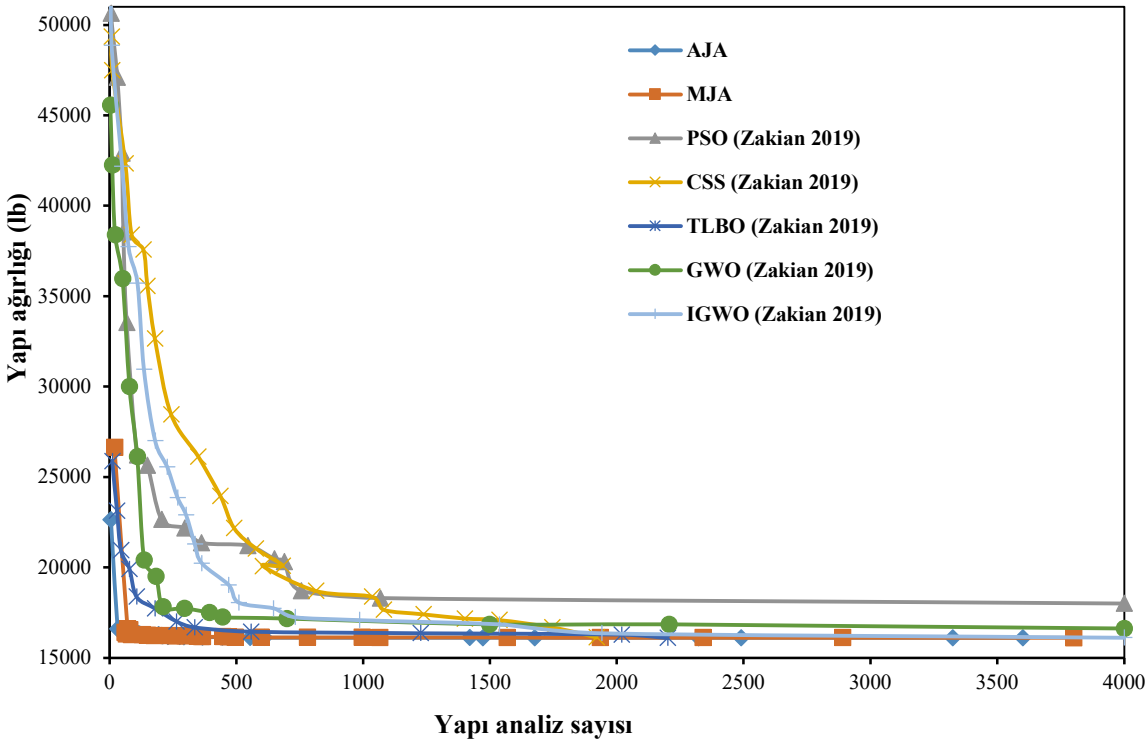


Şekil 4.28.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 21 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 2. Modu



Şekil 4.28.(d). SAP 2000 V23 ile modellenen 21 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 3. Modu

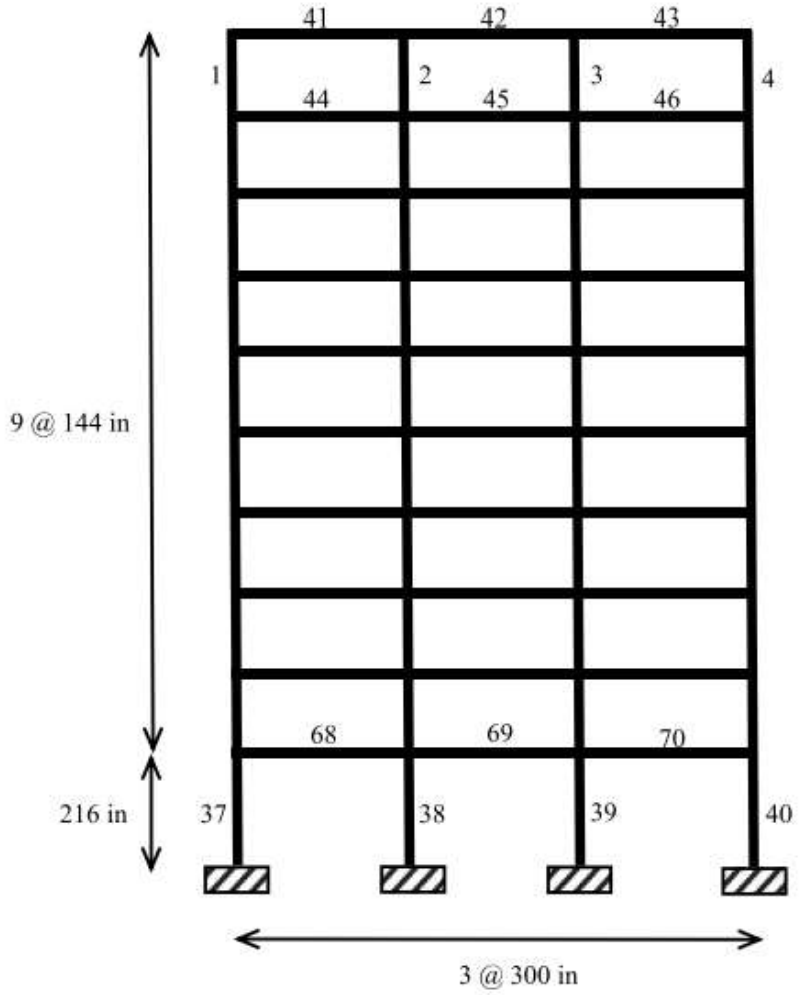
AJA ve MJA'nın diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.29.'da gösterilmektedir. Şekil 4.29.'dan AJA'nın diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı bir yakınsama kabiliyetinin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.29. 21 elemanlı düzlem çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (1lb=0.4536kg)

4.2.3. 70 Elemanlı Düzlem Çelik Çerçeve

Bu tez çalışmasındaki çelik çerçeve tasarım problemlerinden üçüncüsü, Şekil 4.30.'da verilen 70 elemanlı düzlem çerçevedir. Yapı Şekil 4.30.'da gösterilen ve Çizelge 4.25.'te verilen 70 tasarım değişkenine sahiptir. Çerçeve sistemin tüm kirişlerine 10 lb/in (1 lb/in= 0.00011298 kN/m) düzgün yayılı yük ilave edilmiştir. Düzlem çerçeve yapı daha önce Zakian (2019) tarafından PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 4.25.'te AJA, MJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.26.'da ise Çizelge 4.25.'teki tasarım sonuçlarına ait ilk üç doğal frekans değeri verilmiştir.



Şekil 4.30. 70 elemanlı düzlem çerçeve (Zakian 2019) (1 in = 2.54 cm)

Çizelge 4.25.'te Zakian (2019) tarafından kullanılan tüm yöntemlerin (PSO, CSS, TLBO, GWO, IGWO) %0.073-%0.224 arasında değişen oranlarda doğal frekans sınırlayıcılarını ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın AJA 16114.418 lb (1lb=0.4536kg) yapı ağırlığı ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi tasarımı elde etmiştir. Ayrıca Çizelge 4.25.'te AJA'nın, 6900 yapı analizine karşın, diğer yöntemler 8000 yapı analizi gerektirmiştir.

Çizelge 4.25. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri (in^2) *	PSO (Zakian 2019)			CSS (Zakian 2019)			TLBO (Zakian 2019)			GWO (Zakian 2019)			IGWO (Zakian 2019)			**MJA**			**AJA**		
1	29.5197	36	33.6549	1 9.0595	36	37.4742	1 3.0015	36	22.1005	1 3.0000	36	14.8100	1 4.6338	36	41.9878	1 **3.3129**	36	**16.7501**	1 **3.0082**	36	**25.8040**
2	56.0686	37	62.3277	2 44.9220	37	42.6536	2 42.8000	37	45.5537	2 76.7831	37	88.2800	2 45.9518	37	59.9886	2 **41.8869**	37	**49.1688**	2 **37.0039**	37	**47.1140**
3	51.0850	38	53.8149	3 29.8205	38	45.6266	3 36.1444	38	80.1003	3 88.2800	38	74.1726	3 57.3066	38	49.3658	3 **43.2773**	38	**84.2163**	3 **42.6459**	38	**60.4385**
4	30.3950	39	54.6463	4 10.2679	39	82.4349	4 3.0323	39	50.4617	4 3.1957	39	88.2800	4 8.6656	39	74.2058	4 **3.0000**	39	**50.9946**	4 **3.0027**	39	**52.1542**
5	37.4872	40	57.4868	5 30.3284	40	62.4833	5 47.5447	40	44.5336	5 36.4190	40	74.3477	5 7.0983	40	54.4365	5 **44.9053**	40	**44.2629**	5 **43.5854**	40	**57.3217**
6	24.6963	41	3.0000	6 39.1328	41	3.5698	6 25.1435	41	3.0044	6 41.6098	41	5.4863	6 35.8760	41	5.4696	6 **27.8314**	41	**3.0067**	6 **36.8292**	41	**3.0020**
7	44.4298	42	3.0000	7 62.0522	42	33.2252	7 44.1524	42	29.0885	7 48.4907	42	3.6124	7 46.7428	42	3.1025	7 **26.0135**	42	**39.6594**	7 **25.3845**	42	**32.9056**
8	25.5762	43	3.0000	8 39.0820	43	5.4702	8 39.7907	43	3.0000	8 10.1905	43	4.4459	8 44.3974	43	3.0778	8 **43.5606**	43	**3.0021**	8 **42.5670**	43	**3.0761**
9	51.6692	44	33.3543	9 21.2109	44	37.4164	9 16.1085	44	38.1968	9 34.4618	44	63.0352	9 4.3259	44	3.4710	9 **29.0917**	44	**44.1722**	9 **27.8891**	44	**43.9596**
10	26.0943	45	47.4641	10 47.7581	45	42.9331	10 39.7181	45	39.4737	10 77.7641	45	82.7444	10 41.3986	45	68.9757	10 **41.3880**	45	**3.0006**	10 **44.1616**	45	**26.1155**
11	46.1273	46	41.0117	11 43.5721	46	43.6959	11 43.8141	46	39.9570	11 82.8627	46	3.0000	11 45.9778	46	47.1158	11 **43.8907**	46	**45.0015**	11 **43.3562**	46	**44.3488**
12	39.0085	47	38.9506	12 50.1162	47	40.0182	12 34.8891	47	44.1926	12 4.9180	47	31.9705	12 41.7316	47	9.1771	12 **26.2513**	47	**50.3804**	12 **19.6232**	47	**51.3927**
13	42.2062	48	48.4108	13 15.5862	48	6.1057	13 17.3102	48	3.0024	13 45.7692	48	56.0556	13 5.6217	48	48.0278	13 **29.8628**	48	**3.0000**	13 **32.5899**	48	**3.0000**
14	45.3889	49	44.2000	14 34.1207	49	69.4682	14 38.1008	49	47.9975	14 18.7481	49	8.5576	14 43.8835	49	53.0359	14 **41.9788**	49	**50.2901**	14 **38.0153**	49	**44.6129**
15	21.3996	50	23.1173	15 41.3569	50	16.1663	15 35.7644	50	3.0004	15 80.1337	50	34.9689	15 40.5803	50	6.1905	15 **41.6095**	50	**3.0096**	15 **43.6470**	50	**3.0149**
16	55.8747	51	25.2248	16 34.0594	51	52.8570	16 28.6058	51	43.9622	16 3.6303	51	6.0126	16 43.2366	51	3.9220	16 **28.6243**	51	**48.0994**	16 **22.3983**	51	**49.9213**
17	54.6989	52	3.0000	17 35.8065	52	4.1114	17 20.2536	52	38.5748	17 26.0943	52	16.5495	17 5.9044	52	46.7173	17 **30.1451**	52	**3.1087**	17 **32.5500**	52	**3.0007**
18	44.3630	53	3.0000	18 34.4436	53	3.4906	18 43.5231	53	3.0006	18 88.2800	53	44.3998	18 41.5151	53	9.9630	18 **43.4577**	53	**3.0005**	18 **44.6185**	53	**3.0000**
19	69.2845	54	45.0476	19 42.0667	54	10.7157	19 39.7598	54	44.1550	19 36.5706	54	3.2490	19 44.1385	54	3.0993	19 **43.3245**	54	**47.5516**	19 **42.4504**	54	**45.2440**
20	36.3042	55	33.2372	20 41.1269	55	42.6278	20 35.2746	55	3.0000	20 3.6994	55	7.2914	20 42.6853	55	44.1764	20 **29.6134**	55	**3.0183**	20 **26.4988**	55	**3.0336**
21	51.4064	56	51.3823	21 29.8335	56	20.0221	21 35.9488	56	44.1095	21 22.8482	56	50.2551	21 7.4434	56	7.8372	21 **45.7577**	56	**48.4865**	21 **43.0138**	56	**45.3739**
22	59.0334	57	34.0133	22 42.4877	57	48.5791	22 43.6314	57	5.9869	22 56.4145	57	88.2800	22 43.4209	57	50.2297	22 **33.4780**	57	**3.0687**	22 **33.4740**	57	**3.0000**
23	52.5156	58	3.0000	23 53.2635	58	21.4132	23 42.0223	58	44.0728	23 72.4224	58	3.0000	23 55.4360	58	44.1736	23 **32.6013**	58	**45.6906**	23 **33.5453**	58	**45.1681**
24	88.2800	59	52.5090	24 35.1364	59	38.1539	24 38.9425	59	38.5628	24 8.0787	59	12.4085	24 39.9090	59	3.2029	24 **43.8519**	59	**45.3846**	24 **43.8805**	59	**46.6098**
25	27.8664	60	29.8101	25 26.1959	60	15.6696	25 18.1414	60	43.2648	25 33.8972	60	68.8886	25 3.0193	60	45.1477	25 **22.6359**	60	**3.0420**	25 **26.8387**	60	**3.0004**

Çizelge 4.27. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (devamı)

26	60.8462	61	37.8282	26	44.6208	61	50.2004	26	38.7693	61	44.4428	26	62.3369	61	5.0984	26	21.8692	61	44.8072	26	**46.1230**	61	**47.0565**	26	**41.7481**	61	**44.1848**
27	49.4879	62	35.9664	27	33.7693	62	7.9297	27	43.7478	62	3.1884	27	52.1827	62	50.7306	27	45.1819	62	3.0598	27	**43.9085**	62	**3.0070**	27	**43.8663**	62	**3.0011**
28	35.6458	63	3.0000	28	49.6919	63	43.6860	28	25.4297	63	43.5943	28	4.8242	63	10.9981	28	44.3409	63	7.8814	28	**20.5754**	63	**44.1680**	28	**19.8762**	63	**43.8899**
29	35.2384	64	3.0000	29	8.3112	64	3.6401	29	21.5336	64	3.0000	29	27.3140	64	3.0000	29	3.0256	64	42.1576	29	**22.4167**	64	**3.0000**	29	**27.6589**	64	**3.0004**
30	50.7653	65	3.0000	30	45.7488	65	5.8682	30	21.4388	65	16.0365	30	28.0415	65	3.0000	30	30.4577	65	3.4860	30	**35.5686**	65	**3.0341**	30	**29.8719**	65	**3.0000**
31	26.9287	66	3.0000	31	24.8783	66	9.8094	31	43.4149	66	3.0055	31	31.4979	66	47.0715	31	23.9756	66	3.2132	31	**42.9410**	66	**3.0000**	31	**43.4160**	66	**3.0000**
32	25.1350	67	4.3747	32	42.9816	67	3.4524	32	24.1805	67	3.0118	32	4.4834	67	3.0000	32	43.6214	67	18.5162	32	**16.8153**	67	**3.1519**	32	**24.3275**	67	**3.0261**
33	25.7039	68	39.4951	33	12.2387	68	4.1140	33	26.9063	68	26.1270	33	22.1488	68	40.7262	33	8.8847	68	44.1659	33	**17.6170**	68	**43.0204**	33	**25.0112**	68	**44.0735**
34	30.9292	69	3.0000	34	47.3799	69	43.2039	34	24.6183	69	44.1568	34	49.5387	69	62.1344	34	34.4806	69	5.5788	34	**35.9868**	69	**44.2218**	34	**28.7345**	69	**3.5073**
35	47.1990	70	69.5588	35	26.4803	70	45.6091	35	42.6831	70	3.0597	35	49.5348	70	5.0830	35	20.9954	70	48.3381	35	**41.2733**	70	**3.0495**	35	**35.7768**	70	**44.1695**
En iyi Ağırlık (lb) **			140127.530				130115.274				122576.881				143448.734				120635.792				**119560.726**				**119250.925**
Ortala. Ağ. (lb) **			158293.304				133489.996				126179.505				153209.045				125677.080				**121062.887**				**120160.907**
SD (lb) **			7532.3112				2027.1734				2014.1626				4204.8825				2980.1319				**776.9077**				**506.4807**
CV (%)			**1.9321**				**2.3386**				**1.7731**				**14.8820**				**21.7121**				**0.0000**				**0.0000**
NSA			8000				8000				8000				8000				8000				**7200**				**6900**

* 1 in^2 = 6.4516 cm^2

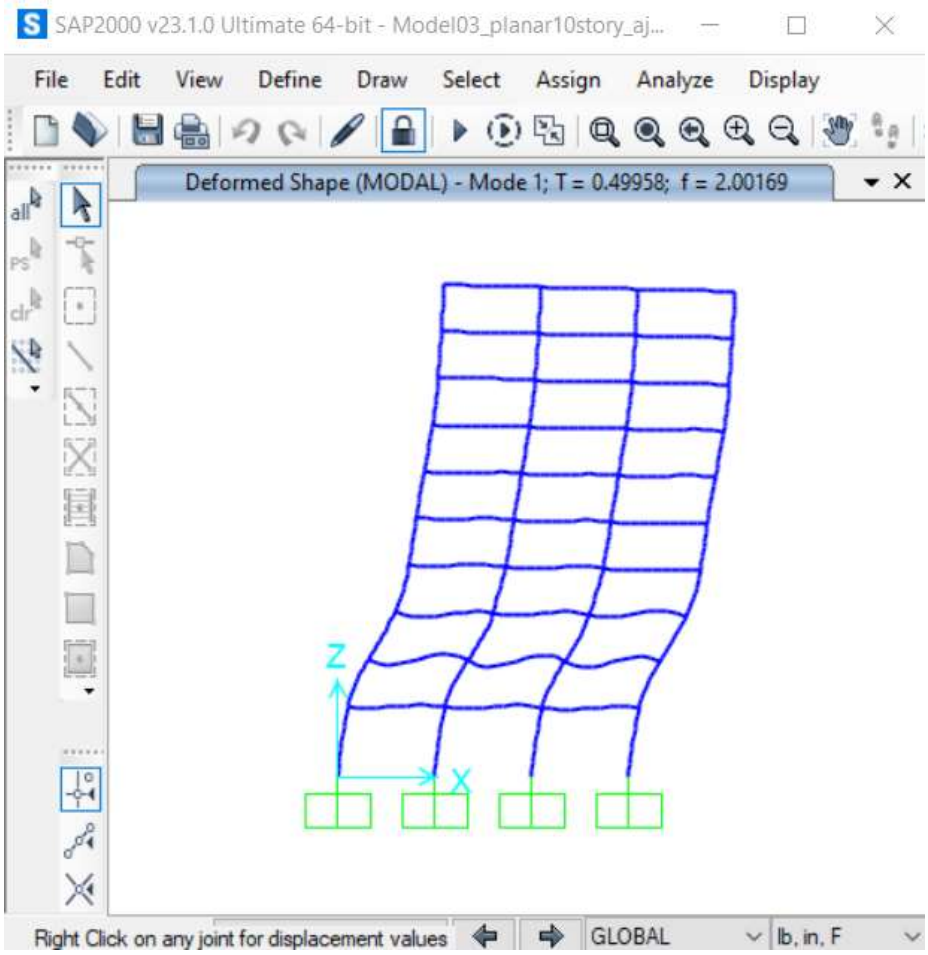
** 1lb=0.4536kg

Çizelge 4.26. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

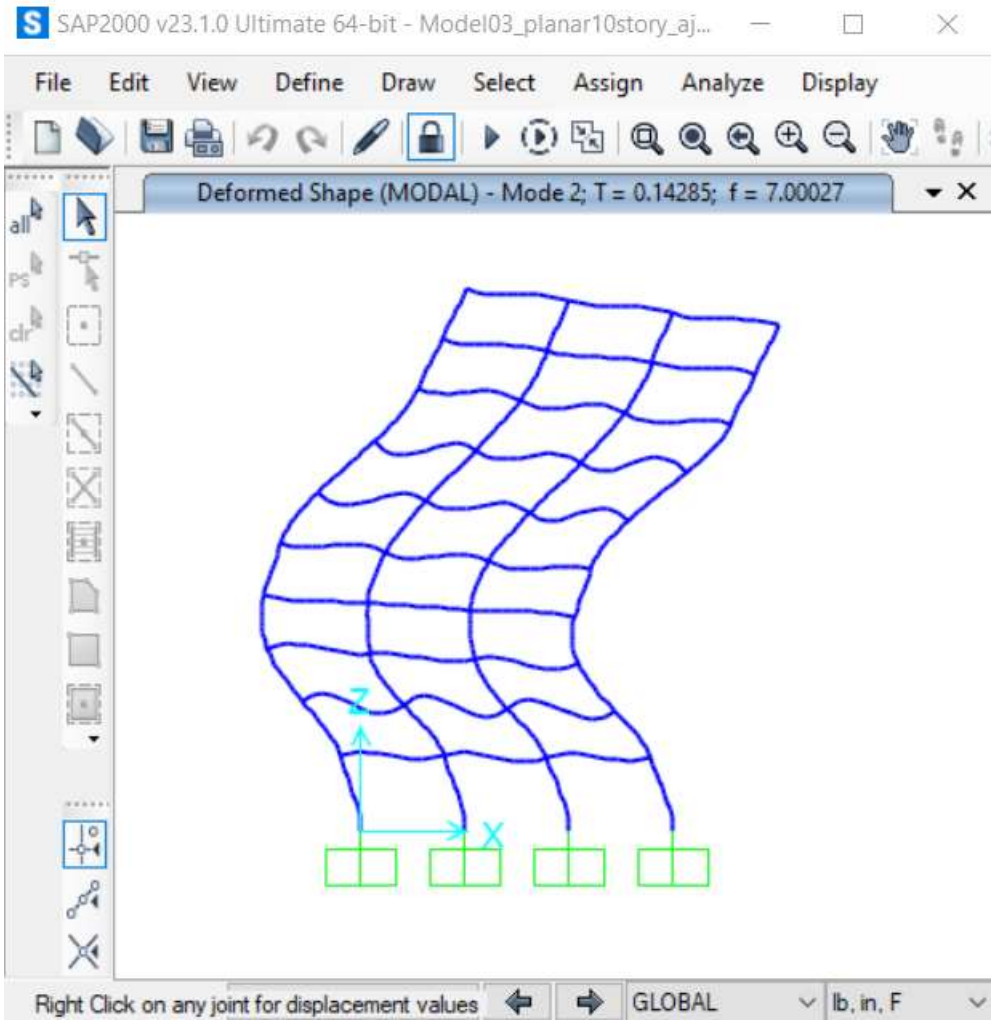
Frekans No (Hz)	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	2.0000	2.0060	2.0013	2.2755	2.0408	**2.0192**	**2.0017**
1*	**1.9975**	**2.0041**	**1.9993**	**2.2728**	**2.0385**	**2.0192**	**2.0017**
2	7.0000	7.0095	7.0004	7.0971	7.0000	**7.0001**	**7.0003**
2*	**6.9614**	**6.9684**	**6.9483**	**7.0410**	**6.9320**	**7.0001**	**7.0003**
3	15.0000	15.0006	14.9984	15.1538	15.0000	**15.0003**	**15.0002**
3*	**14.7102**	**14.6492**	**14.7340**	**12.7677**	**11.7432**	**15.0004**	**15.0002**

* SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

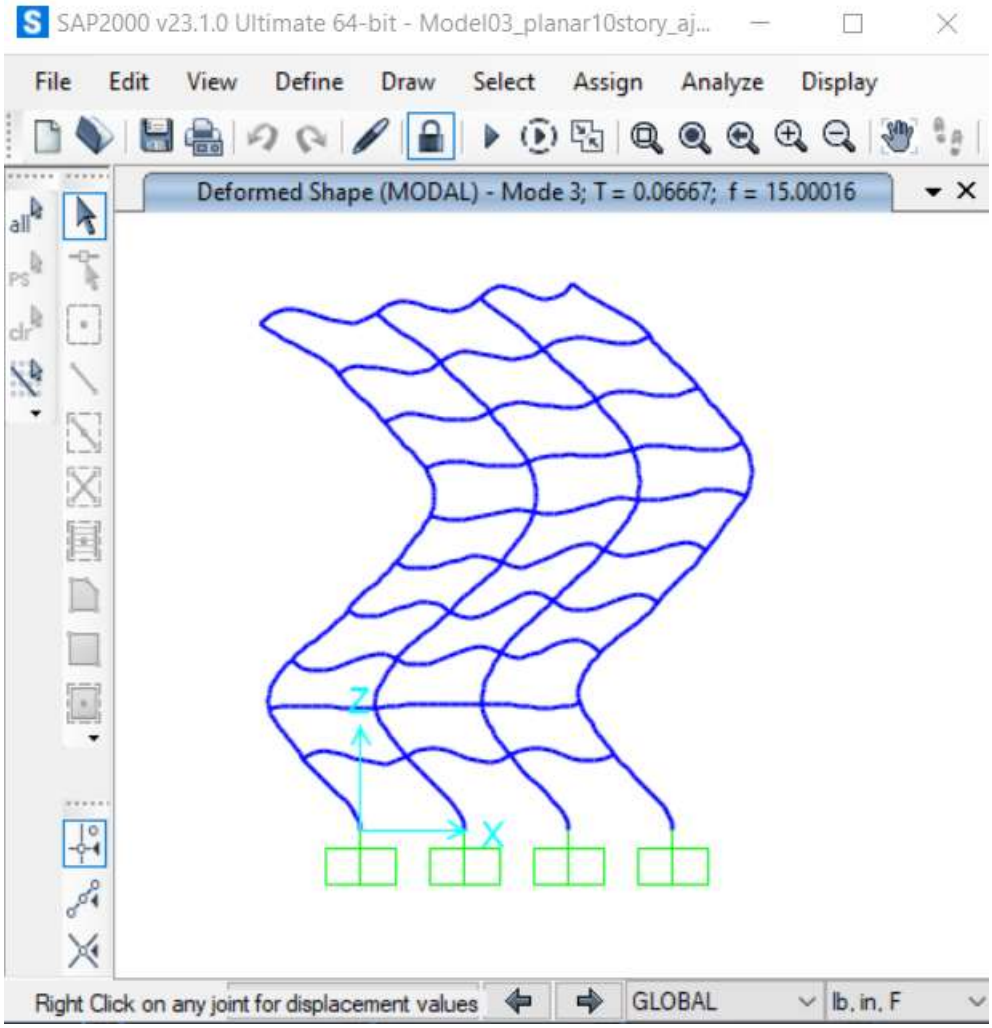
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk üç moduna ait sonuçlar Şekil 4.31.(a-c)'de sunulmuştur. Şekil 4.31.'den görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



Şekil 4.31.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 70 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 1. Modu

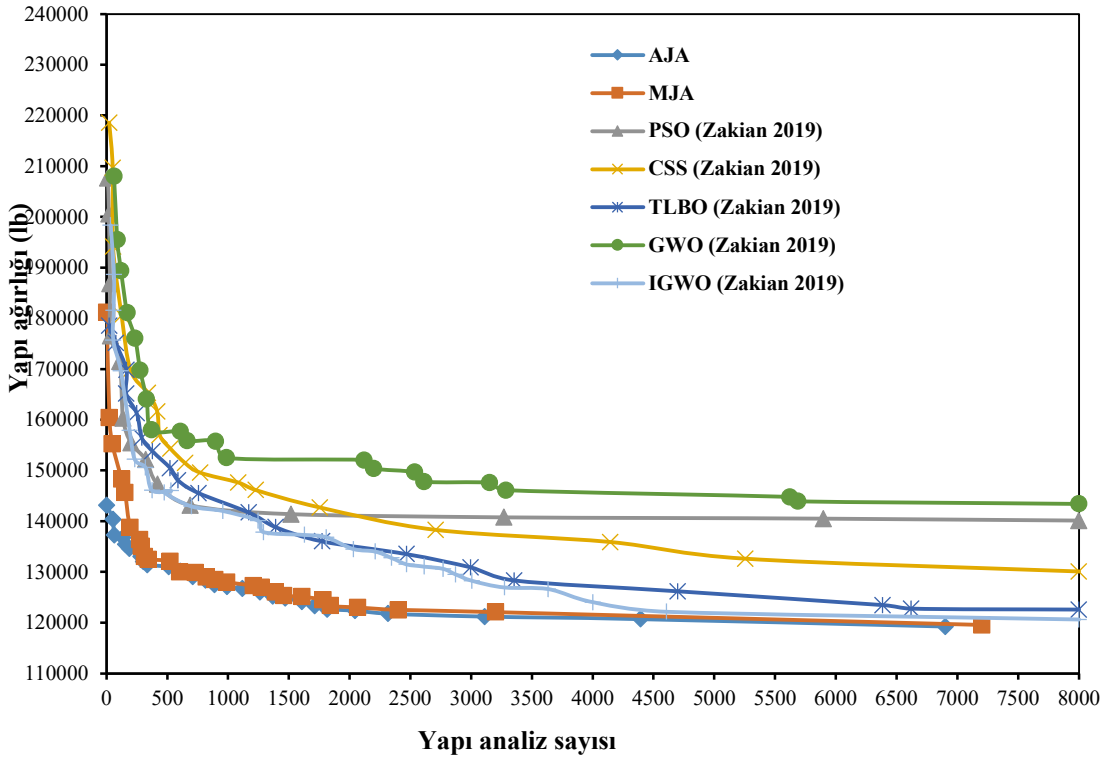


Şekil 4.31.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 70 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 2. Modu



Şekil 4.31.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 70 elemanlı düzlem çelik çerçeve yapının 3. Modu

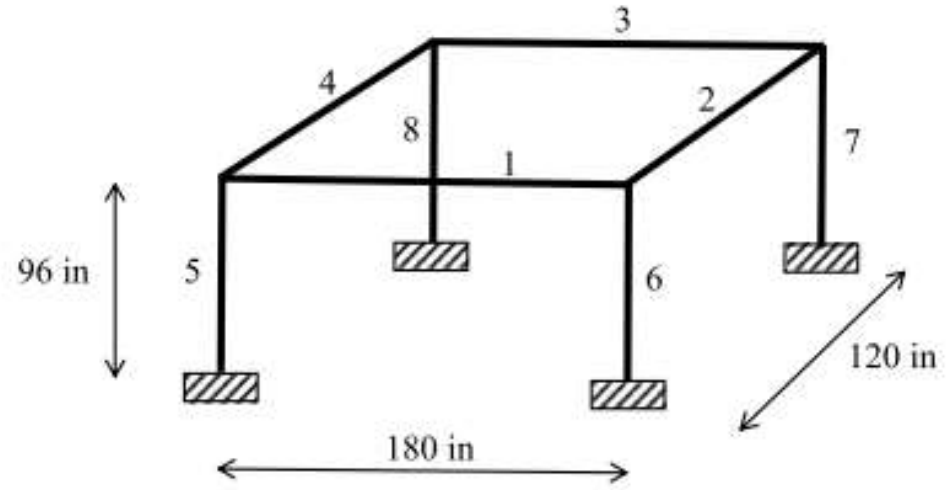
AJA ve MJA'nın diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.32.'de gösterilmektedir. Bu eğrilerin kıyaslanması sonucunda AJA'nın ve MJA'nın diğer yöntemlerden daha hızlı bir şekilde optimum tasarıma yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.32. 70 elemanlı düzlem çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (1lb=0.4536kg)

4.2.4. 8 Elemanlı Uzay Çelik Çerçeve (Sürekli Tasarım Değişkenli)

Bu tez çalışmasındaki çelik çerçeve tasarım problemlerinden dördüncüsü, Şekil 4.33.'te verilen 8 elemanlı uzay çerçevedir. Yapı Şekil 4.33.'te gösterilen ve Çizelge 4.27.'de verilen 8 tasarım değişkenine sahiptir. Çerçeve sistemin tüm kirişlerine 3 lb/in (1 lb/in= 0.00011298 kN/m) düzgün yayılı yük ilave edilmiştir. Uzay çerçeve yapı daha önce Zakian (2019) tarafından PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 4.27.'de AJA, MJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.28.'de ise Çizelge 4.27.'deki tasarım sonuçlarına ait ilk üç doğal frekans değeri verilmiştir.



Şekil 4.33. 8 elemanlı uzay çerçeve (Zakian 2019) (1 in = 2.54 cm)

Çizelge 4.27.'de Zakian (2019) tarafından kullanılan CSS, GWO, IGWO yöntemlerinin %19.33-%13.33 arasında değişen oranlarda doğal frekans sınırlayıcılarını ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın AJA 1008.8406 lb (1lb=0.4536kg) yapı ağırlığı ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi tasarımı elde etmiştir. Ayrıca Çizelge 4.27.'de AJA'nın, 1530 yapı analizine karşın, diğer yöntemler 2000 yapı analizi gerektirmiştir.

Çizelge 4.27. 8 elemanlı uzay çerçeve yapı için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri (in^2) *	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	0.1000	2.7182	0.3592	2.8164	2.3433	**0.2992**	**0.2216**
2	0.1000	2.2241	0.2105	1.9026	2.4823	**3.9858**	**2.2688**
3	0.5562	2.1025	0.1461	2.3821	2.4674	**0.1338**	**0.2820**
4	0.2573	2.2819	0.2577	2.6751	2.1192	**2.6856**	**4.5922**
5	16.4721	1.7919	30.8533	1.8398	17.9522	**0.1049**	**0.3426**
6	0.6942	19.6538	1.1417	21.4221	2.0558	**18.8305**	**9.2553**
7	30.7735	1.9471	16.3904	2.5412	15.0437	**0.3917**	**0.3970**
8	1.2797	13.6300	0.8244	13.1767	1.8691	**9.7921**	**18.0159**
En iyi Ağırlık (lb) **	1368.0990	1389.5362	1363.9561	1463.5965	1389.4987	**1028.7048**	**1008.8406**
Ortalama Ağ. (lb) **	1526.4091	1486.2002	1412.4037	1515.4149	1455.0272	**1122.9778**	**1049.7988**
SD (lb) **	144.1973	60.5297	43.4286	26.2333	53.7335	**40.6125**	**31.3452**
CV (%)	0.0000	13.9028	0.0000	12.3303	19.3331	**0.0000**	**0.0000**
NSA	2000	2000	2000	2000	2000	**1600**	**1530**

* 1 in^2 = 6.4516 cm^2

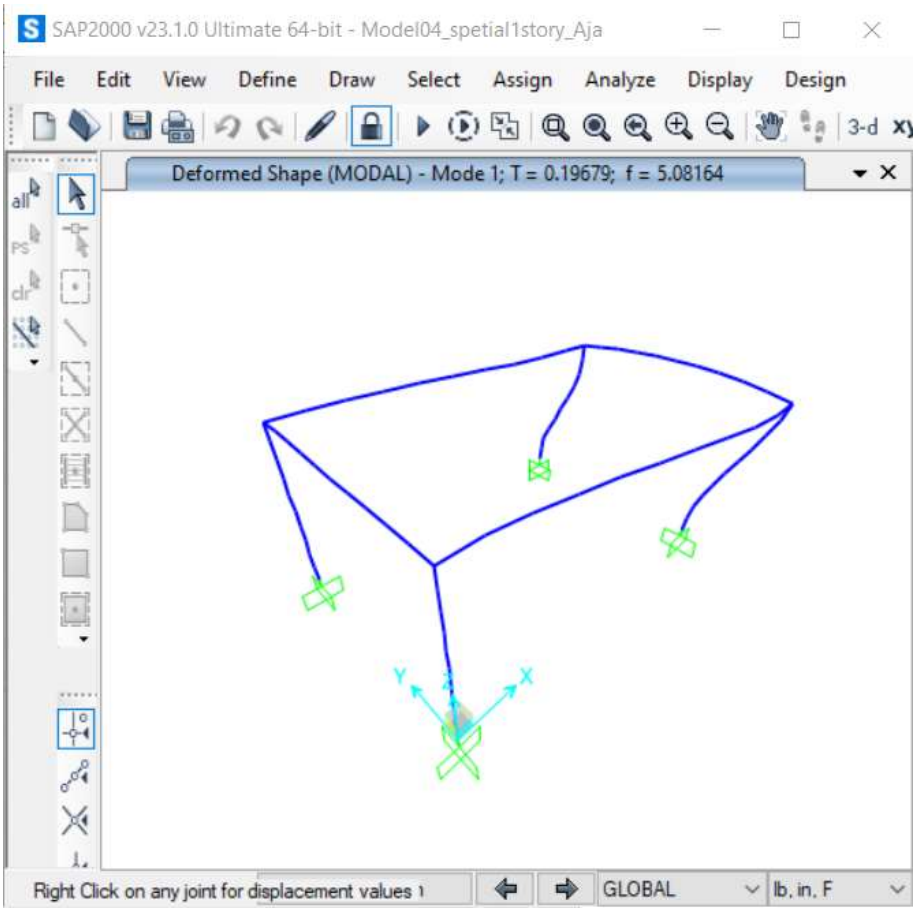
** 1lb=0.4536kg

Çizelge 4.28. 8 elemanlı uzay çerçeve yapının optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

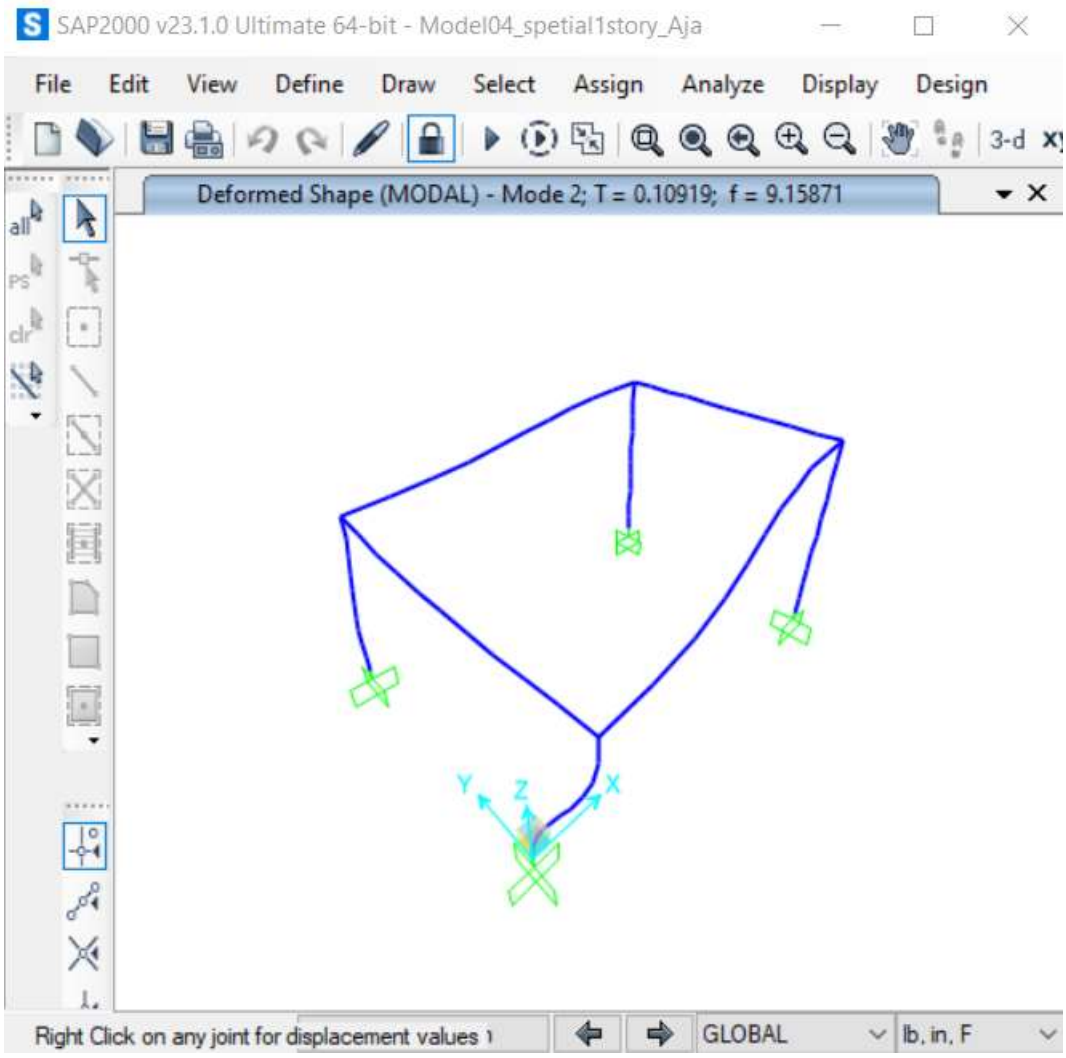
Frekans No (Hz)	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	5.0016	5.0006	5.0190	5.1761	5.0001	**5.4572**	**5.0816**
1*	**5.4747**	**6.3362**	**5.4300**	**6.4654**	**6.8913**	**5.4572**	**5.0816**
2	9.0278	9.0004	9.0070	9.3870	9.0006	**9.1361**	**9.1587**
2*	**9.0857**	**7.7488**	**9.2999**	**7.8903**	**7.2600**	**9.1361**	**9.1587**
3	15.2678	15.2127	15.0794	15.4378	15.3228	**15.4640**	**16.2633**
3*	**17.5761**	**26.4427**	**20.3347**	**26.1521**	**28.6935**	**15.4640**	**16.2633**

* SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

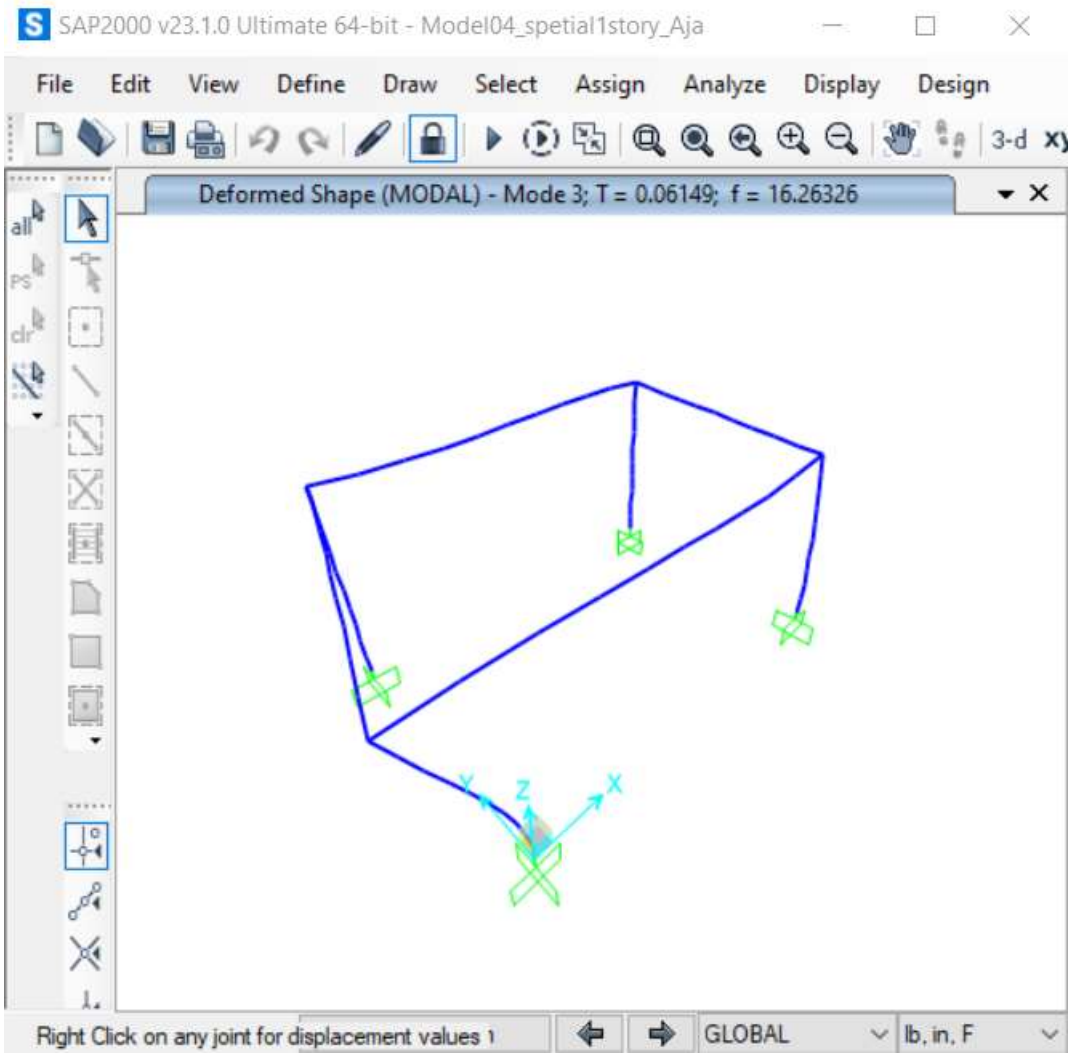
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk üç moduna ait sonuçlar Şekil 4.34.(a-c)'de sunulmuştur. Şekil 4.34.'ten görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



Şekil 4.34.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının 1. Modu

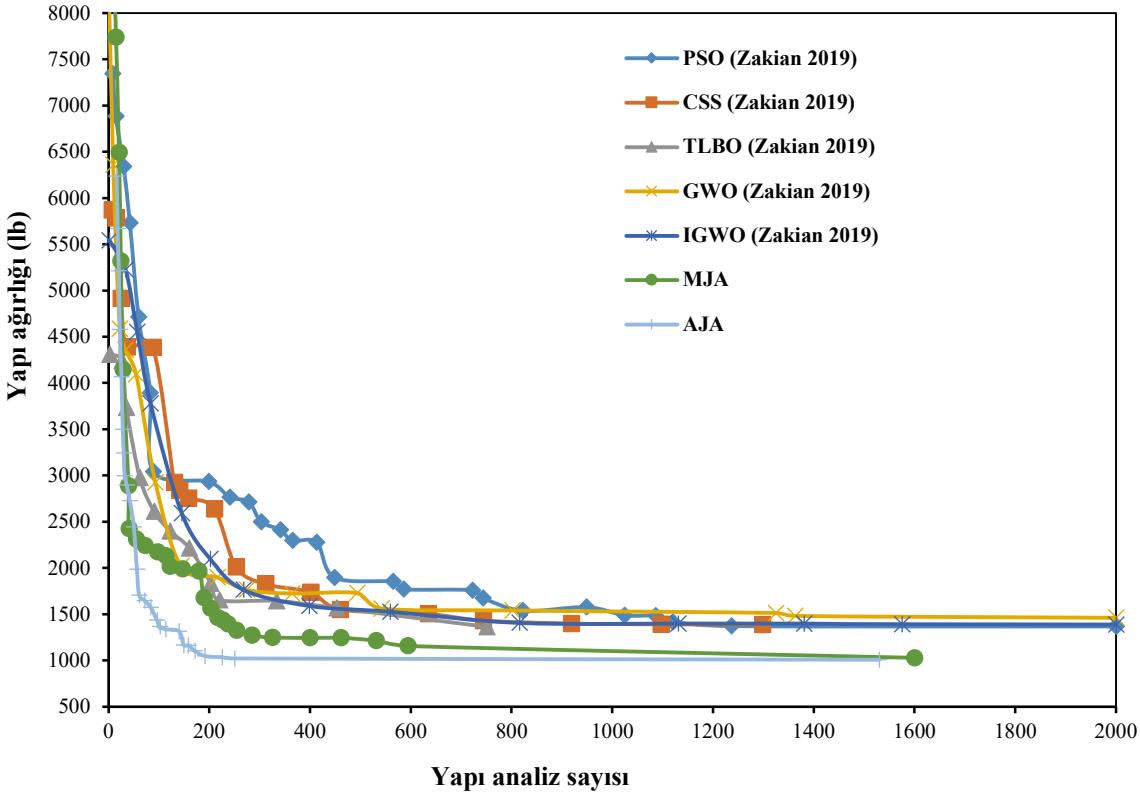


Şekil 4.34.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının 2. Modu



Şekil 4.34.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 8 elemanlı uzay çelik çerçeve yapının 3. Modu

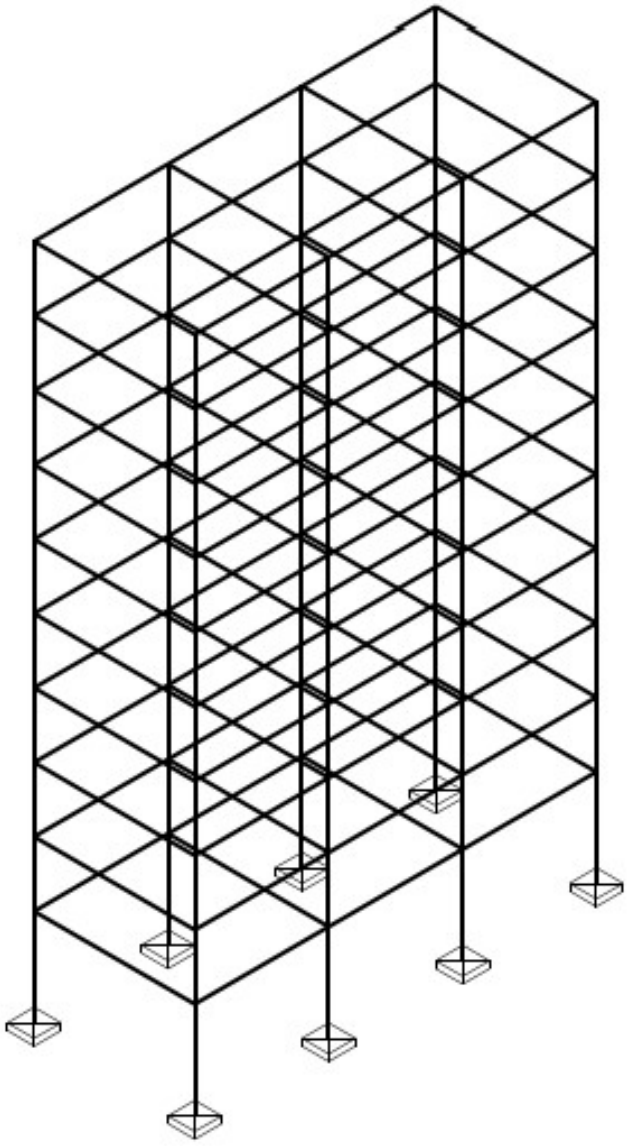
AJA ve MJA'nın diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.35.'te gösterilmektedir. Bu eğrilerin kıyaslanması sonucunda AJA'nın ve MJA'nın diğer yöntemlerden daha hızlı bir şekilde optimum tasarıma yakınsadığı görülmektedir.



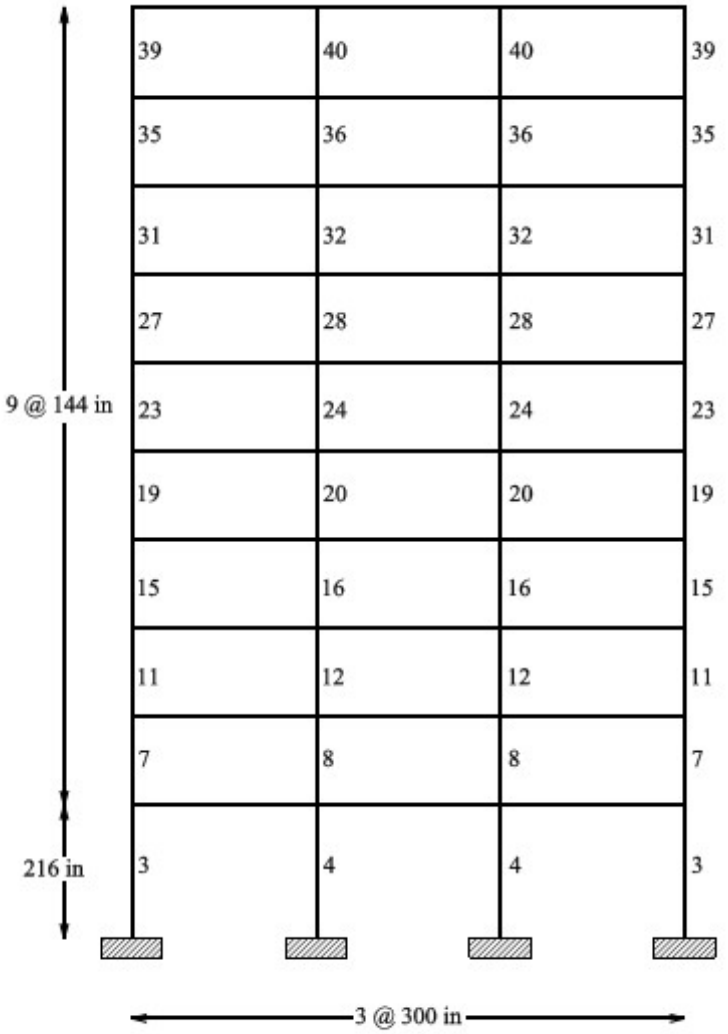
Şekil 4.35. 8 elemanlı uzay çerçeve yapının yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (1lb=0.4536kg)

4.2.5. 180 Elemanlı Uzay Çelik Çerçeve (Sürekli Tasarım Değişkenli)

Bu tez çalışmasındaki çelik çerçeve tasarım problemlerinden beşincisi, Şekil 4.36.'da verilen 180 elemanlı uzay çerçevedir. Yapı Şekil 4.36.'da gösterilen ve Çizelge 4.29.'da verilen 40 tasarım değişkenine sahiptir. Çerçeve sistemin tüm kirişlerine 1 lb/in (1 lb/in= 0.00011298 kN/m) düzgün yayılı yük ilave edilmiştir. Uzay çerçeve yapı daha önce Zakian (2019) tarafından PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 4.29.'da AJA, MJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.30.'da ise Çizelge 4.29.'daki tasarım sonuçlarına ait ilk üç doğal frekans değeri verilmiştir.



Şekil 4.36.(a). 180 elemanlı uzay çerçeve (Zakian 2019) (1 in = 2.54 cm)



Şekil 4.36.(b), (c). 180 elemanlı uzay çerçeve (Zakian 2019) (1 in = 2.54 cm)

Çizelge 4.29.'da Zakian (2019) tarafından kullanılan tüm yöntemlerin %19.75-%52.97 arasında değişen oranlarda doğal frekans sınırlayıcılarını ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın AJA 218239.4068 lb (1lb=0.4536kg) yapı ağırlığı ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi tasarımı elde etmiştir. Ayrıca Çizelge 4.29.'da AJA'nın, 1800 yapı analizine karşın, diğer yöntemler 8000 yapı analizi gerektirmiştir.

Çizelge 4.29. 180 elemanlı uzay çerçeve yapı (sürekli tasarım değişkenli) için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri (in^2) *	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	0.1000	0.1888	0.3262	0.1000	3.2273	**10.0370**	**5.5862**
2	0.1000	0.4645	0.1073	1.5761	2.0254	**16.2850**	**17.3080**
3	88.3000	86.4269	87.1440	84.3460	88.3000	**54.2500**	**83.6480**
4	88.3000	66.9769	65.2097	88.3000	67.5826	**19.3470**	**10.7830**
5	4.4972	10.7977	67.4120	0.1000	17.7627	**18.5730**	**6.1309**
6	88.3000	1.0795	0.1119	0.1000	1.2183	**8.6974**	**11.8620**
7	88.3000	75.3116	73.4420	52.2624	74.9111	**56.2750**	**69.4340**
8	88.3000	63.2388	29.1774	69.3575	27.7966	**22.5400**	**7.0990**
9	88.3000	68.5115	0.6878	69.7214	29.7388	**0.5338**	**3.9490**
10	0.1000	7.9026	0.1003	10.7183	5.4843	**18.0020**	**13.1190**
11	88.3000	72.3510	67.5503	52.8890	45.5068	**34.5720**	**45.2910**
12	12.3347	34.0518	45.7861	74.9032	26.2909	**6.3066**	**20.7510**
13	0.2699	0.6803	0.2141	0.8454	28.6634	**24.6920**	**3.6140**
14	0.1000	74.8927	0.1038	88.3000	73.4011	**13.1740**	**1.5477**
15	88.3000	8.9077	42.3125	13.3676	26.3181	**53.8820**	**38.6470**
16	88.3000	87.5720	6.0861	85.6000	39.4443	**10.8790**	**38.4690**
17	0.1000	11.8660	40.7009	3.3492	19.7496	**7.1717**	**14.4830**
18	88.3000	3.7241	68.9520	6.0605	3.0184	**15.5570**	**40.1130**
19	33.0377	50.1077	52.4054	22.1542	33.3194	**43.4570**	**82.8820**
20	39.6756	37.9478	20.5977	42.9277	20.0858	**9.6657**	**12.2770**
21	0.1000	26.5062	0.2531	26.2148	18.8967	**13.1070**	**7.9448**
22	0.1000	68.3921	67.5809	2.1890	68.7819	**17.0230**	**7.1121**
23	44.0158	14.3849	9.9608	8.3817	17.9295	**15.6410**	**39.5300**
24	17.0245	10.4721	67.4447	59.7403	20.0762	**16.7340**	**24.3680**
25	41.0508	1.9517	15.4225	19.9607	11.8798	**7.2416**	**1.9692**
26	19.5328	0.8346	0.1272	72.3724	2.6131	**9.7753**	**18.6960**
27	28.6516	39.6721	25.6752	15.3653	29.9612	**22.7560**	**44.5780**
28	37.2729	26.7773	20.2590	18.1867	24.7756	**10.6420**	**26.7530**
29	0.1000	11.5216	0.1000	14.5910	12.4219	**16.2610**	**20.6140**
30	0.1000	4.1805	0.1241	0.1100	4.8299	**28.4830**	**18.0480**
31	17.4556	20.0367	18.9098	6.7082	16.7096	**13.0680**	**13.5640**
32	67.9411	6.9156	15.3729	43.3249	15.5048	**46.0850**	**88.2670**
33	0.1000	0.5439	8.5047	11.2396	0.6683	**27.9400**	**0.5757**

Çizelge 4.29. 180 elemanlı uzay çerçeve yapı (sürekli tasarım değişkenli) için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (devamı)

34	0.1000	1.4262	5.4781	0.1008	0.8185	**18.3310**	**5.4924**
35	5.8423	8.8287	9.3272	28.4679	9.5107	**25.5210**	**13.6910**
36	88.3000	15.1104	8.0229	17.1479	17.2761	**31.6580**	**11.6330**
37	0.1000	2.3169	0.1018	0.1904	2.4683	**0.1000**	**0.1000**
38	0.1000	2.4345	0.1004	0.1000	2.8170	**1.8187**	**3.0444**
39	2.0461	3.0810	2.2411	12.2518	3.0461	**52.6190**	**16.6580**
40	14.5773	4.6380	11.5688	6.8047	4.0334	**10.4060**	**73.7530**
En iyi Ağır. (lb) **	327019.5018	265201.2994	246681.0175	290325.1730	250541.2056	**218315.5868**	**218239.4068**
Ortalama Ağ. (lb) **	387450.8623	301818.9141	273429.6439	326456.5541	263001.2203	**234500.3699**	**230811.8295**
SD (lb) **	34638.1317	18544.1334	16752.0160	19895.9107	10288.2032	**8224.5513**	**7702.1065**
CV (%)	**52.4343**	**25.0933**	**43.6953**	**52.9724**	**19.7473**	**0.0000**	**0.0000**
NSA	8000	8000	8000	8000	8000	**1950**	**1800**

* 1 in^2 = 6.4516 cm^2

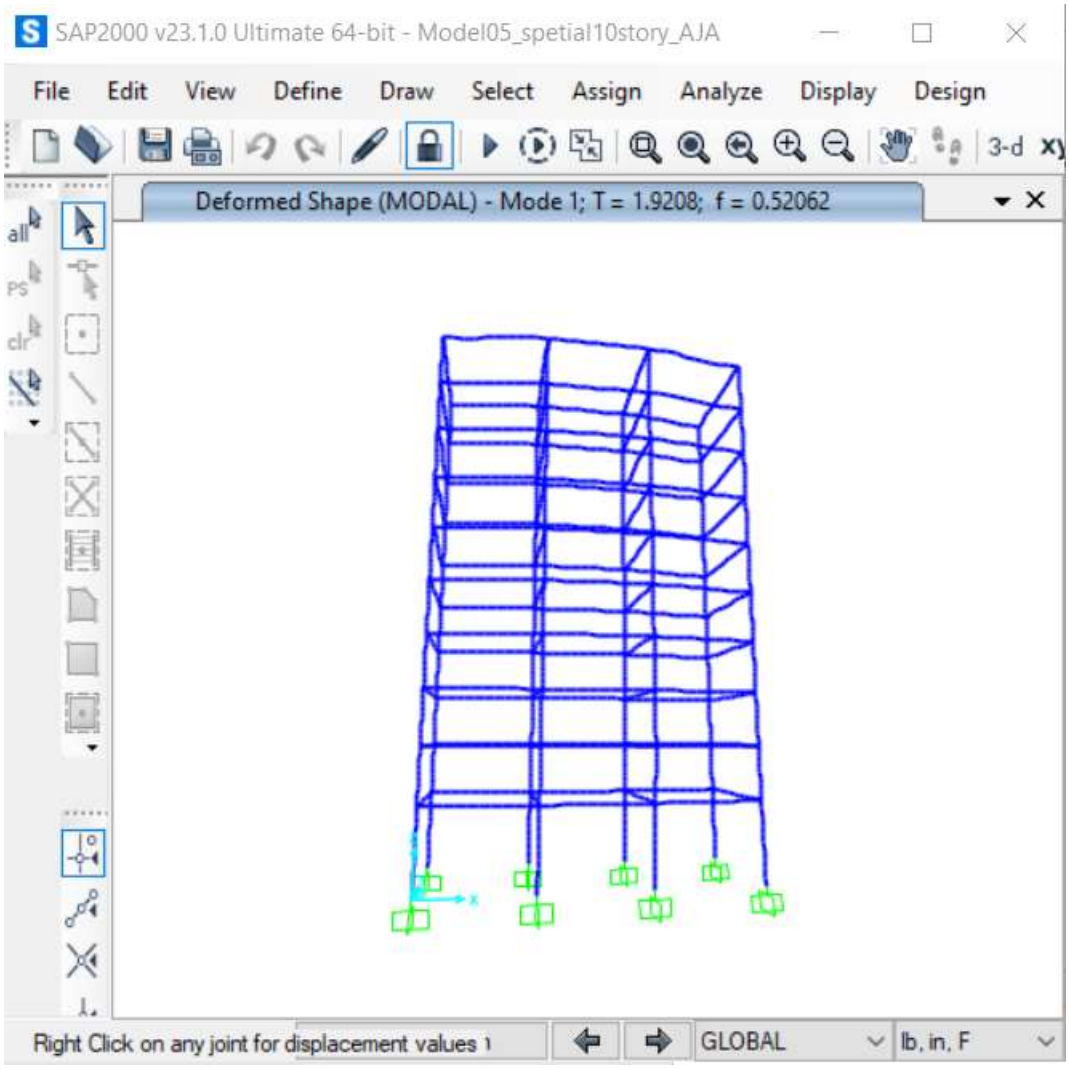
** 1lb=0.4536kg

Çizelge 4.30. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının (sürekli tasarım değişkenli) optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

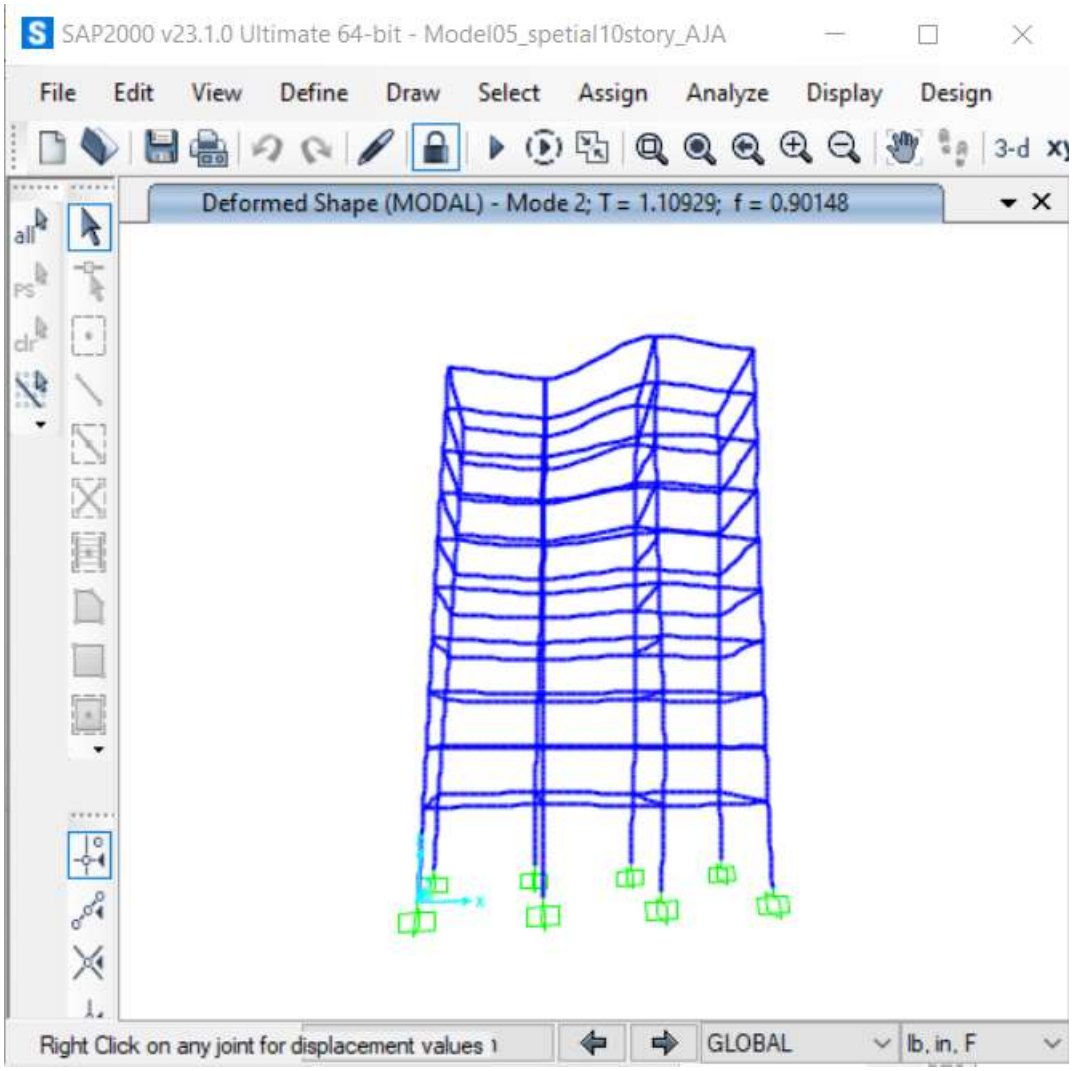
Frekans (Hz) No	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	0.5000	0.5007	0.5000	0.5287	0.5000	**0.5354**	**0.5206**
1*	**0.4481**	**0.5150**	**0.3529**	**0.3680**	**0.4972**	**0.5354**	**0.5206**
2	1.1083	0.8334	0.8649	1.0505	0.8258	**0.8301**	**0.9015**
2*	**0.4496**	**0.7224**	**0.5991**	**0.3762**	**0.7555**	**0.8301**	**0.9015**
3	1.2000	1.2012	1.2000	1.2066	1.2000	**1.2748**	**1.2202**
3*	**0.5708**	**0.8989**	**0.6757**	**0.6081**	**0.9630**	**1.2748**	**1.2202**

* SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

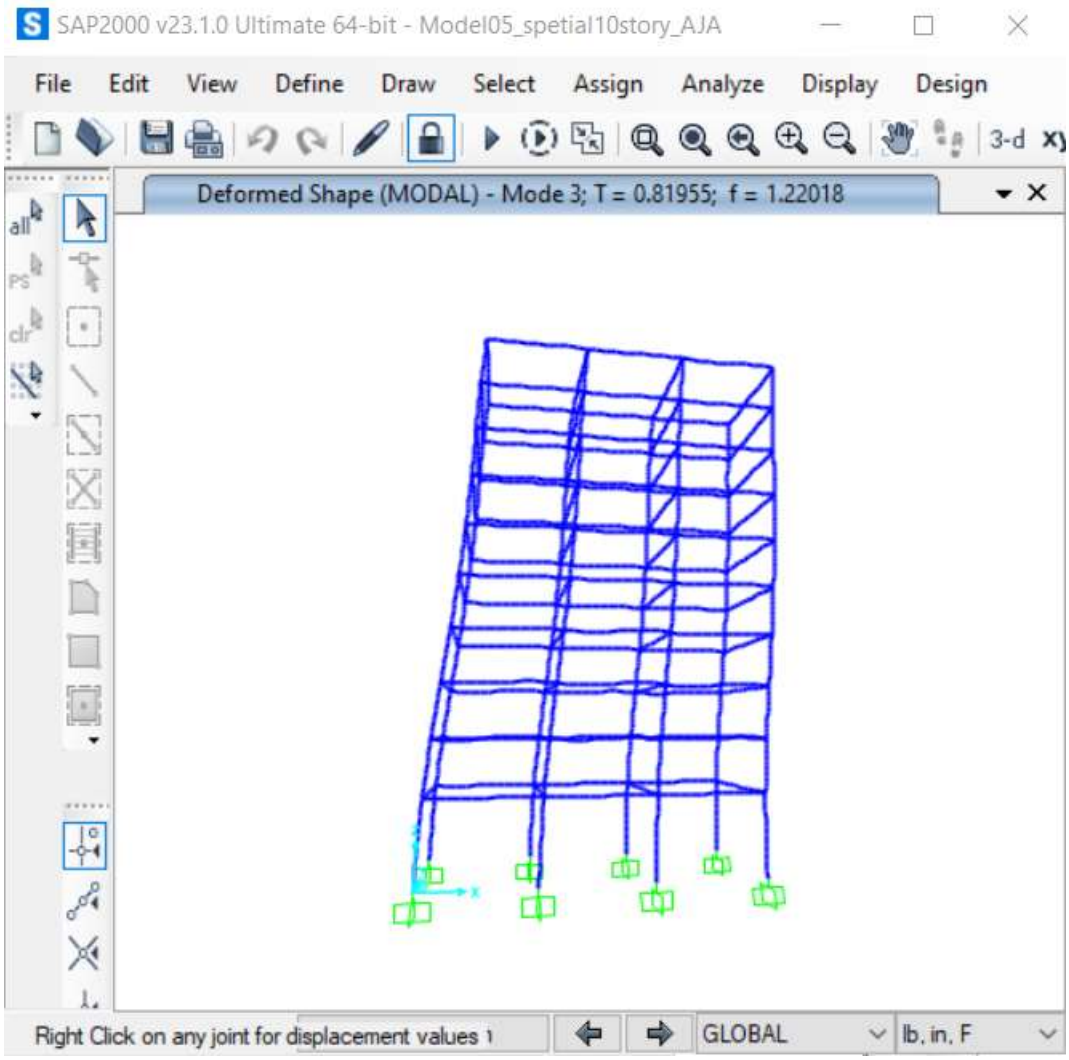
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk üç moduna ait sonuçlar Şekil 4.37.(a-c)'de sunulmuştur. Şekil 4.37.'den görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



Şekil 4.37.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 1. Modu

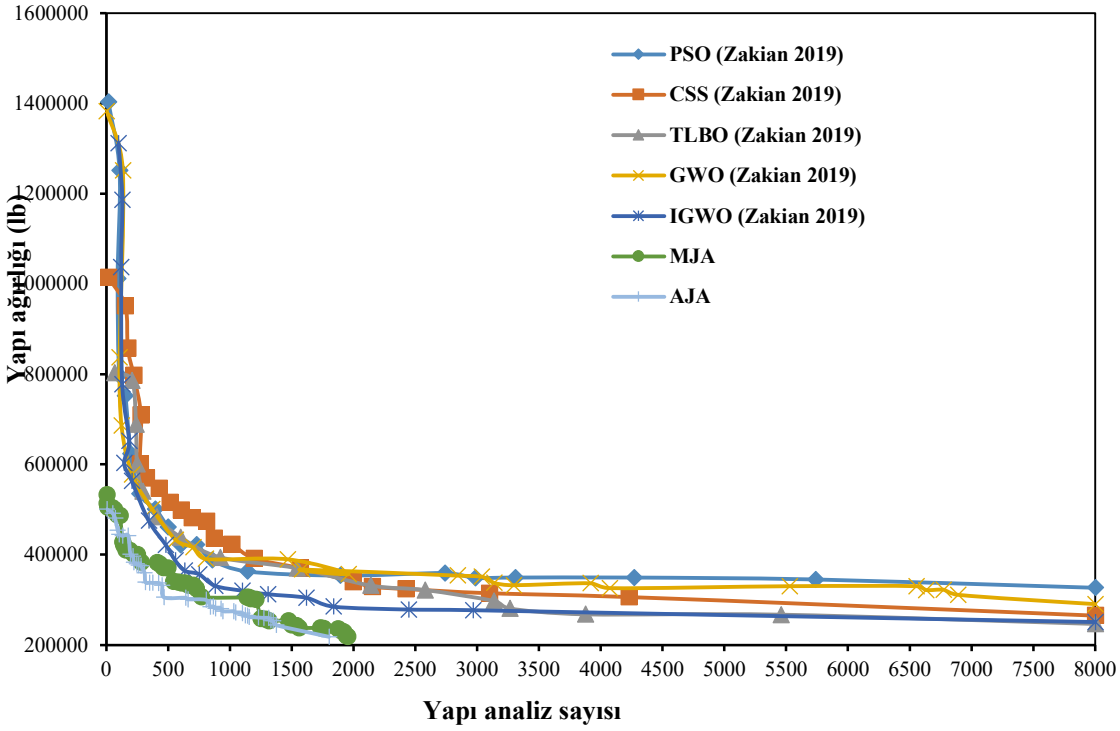


Şekil 4.37.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 2. Modu



Şekil 4.37.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 3. Modu

AJA ve MJA'nın diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.38.'de gösterilmektedir. Bu eğrilerin kıyaslanması sonucunda AJA'nın ve MJA'nın diğer yöntemlerden daha hızlı bir şekilde optimum tasarıma yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.38. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının (sürekli tasarım değişkenli) yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (1lb=0.4536kg)

4.2.6. 180 Elemanlı Uzay Çelik Çerçeve (Ayrık tasarım değişkenli)

Bu tez çalışmasındaki çelik çerçeve tasarım problemlerinden altıncısı, Şekil 4.27.'de verilen 180 elemanlı (sürekli tasarım değişkenli) uzay çerçeve ile aynıdır. Bölüm 4.2.5.'te sürekli tasarım değişkenli olarak optimize edilen yapı bu bölümde ayrık tasarım değişkenli olarak optimize edilmiştir. Yapı Şekil 4.27.'te gösterilen ve Çizelge 4.31.'de verilen 40 tasarım değişkenine sahiptir. Çerçeve sistemin tüm kirişlerine 1 lb/in (1 lb/in= 0.00011298 kN/m) düzgün yayılı yük ilave edilmiştir. Uzay çerçeve yapı daha önce Zakian (2019) tarafından PSO, CSS, TLBO, GWO ve IGWO yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 4.31.'de AJA, MJA ve diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Çizelge 4.32.'de ise Çizelge 4.31.'deki tasarım sonuçlarına ait ilk üç doğal frekans değeri verilmiştir.

Çizelge 4.31.'de Zakian (2019) tarafından kullanılan IGWO ve TLBO yöntemlerinin doğal frekans sınırlayıcılarını ihlal ettiği tespit edilmiştir. Buna karşın AJA 267435.5040 lb (1lb=0.4536kg) yapı ağırlığı ile frekans sınırlayıcılarını sağlayan en iyi

tasarımı elde etmiştir. Ayrıca Çizelge 4.31.'de AJA'nın, 3550 yapı analizine karşın, diğer yöntemler 4000 yapı analizi gerektirmiştir.

Çizelge 4.31. 180 elemanlı uzay çerçeve yapı (ayrık değişkenli) için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	W21X48	W14X48	W27X94	W24X68	W18X76	**W4X13**	**W6X9**
2	W44X230	W14X257	W10X100	W4X13	W44X335	**W4X13**	**W18X97**
3	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W44X335**	**W40X327**
4	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W30X108**	**W30X124**
5	W14X90	W18X76	W14X43	W30X90	W18X76	**W4X13**	**W24X104**
6	W14X22	W16X67	W33X201	W14X30	W44X290	**W18X55**	**W8X24**
7	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W14X211**	**W16X67**
8	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W24X84**	**W8X21**
9	W16X36	W24X117	W24X162	W14X145	W27X84	**W16X50**	**W10X15**
10	W14X311	W21X44	W12X120	W44X335	W40X183	**W18X106**	**W12X45**
11	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W18X119**	**W33X201**
12	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W21X57**	**W36X262**
13	W44X230	W27X146	W12X136	W14X61	W21X48	**W18X40**	**W18X97**
14	W18X76	W14X455	W44X335	W44X335	W44X290	**W14X145**	**W24X131**
15	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W40X324**	**W33X152**
16	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W33X118**	**W18X158**
17	W14X26	W24X62	W14X132	W18X60	W8X31	**W33X118**	**W21X50**
18	W21X44	W30X132	W14X193	W40X215	W44X335	**W4X13**	**W18X76**
19	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W30X191**	**W16X67**
20	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W33X318**	**W21X44**
21	W24X84	W16X67	W4X13	W4X13	W10X49	**W21X147**	**W6X15**
22	W36X231	W16X45	W4X13	W4X13	W6X8.5	**W18X46**	**W10X39**
23	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W10X88**	**W16X100**
24	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W14X53**	**W40X392**
25	W6X8.5	W18X46	W14X68	W4X13	W14X61	**W12X30**	**W21X44**
26	W14X145	W14X257	W14X48	W44X335	W12X14	**W5X19**	**W18X40**
27	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W6X16**	**W21X201**
28	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W16X89**	**W12X65**
29	W24X104	W14X74	W4X13	W4X13	W8X31	**W4X13**	**W4X13**
30	W21X48	W18X86	W4X13	W4X13	W10X12	**W16X77**	**W8X10**
31	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W14X74**	**W10X45**
32	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W27X102**	**W10X49**
33	W6X8.5	W14X34	W4X13	W12X87	W10X12	**W24X146**	**W8X28**
34	W6X8.5	W18X46	W4X13	W4X13	W12X14	**W8X58**	**W18X119**
35	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W21X111**	**W27X129**
36	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W40X277**	**W16X100**
37	W6X8.5	W14X34	W4X13	W8X28	W6X8.5	**W5X19**	**W4X13**
38	W16X40	W18X46	W4X13	W4X13	W6X8.5	**W4X13**	**W4X13**
39	W33X118	W36X135	W27X84	W27X146	W24X55	**W4X13**	**W30X191**
40	W36X135	W36X135	W40X199	W44X230	W33X118	**W4X13**	**W6X16**

Çizelge 4.31. 180 elemanlı uzay çerçeve yapı (ayrık değişkenli) için optimizasyon sonuçlarının karşılaştırılması (devamı)

En iyi Ağırlık (lb) **	359127.2160	411126.9120	367534.9440	429660.0000	333367.7760	**290578.1760**	**267435.5040**
Ortalama Ağ. (lb) **	445682.2256	514455.8208	416019.1541	477983.1175	425415.4022	**308344.80106**	**280026.36616**
SD (lb) **	54610.9907	68397.9754	36324.0672	27496.7118	59154.2569	**9390.08942**	**7480.07615**
CV (%)	0.0000	0.0000	5.5160	0.0000	17.5381	**0.0000**	**0.0000**
NSA	4000	4000	4000	4000	4000	**3860**	**3550**

* 1 in^2 = 6.4516 cm^2

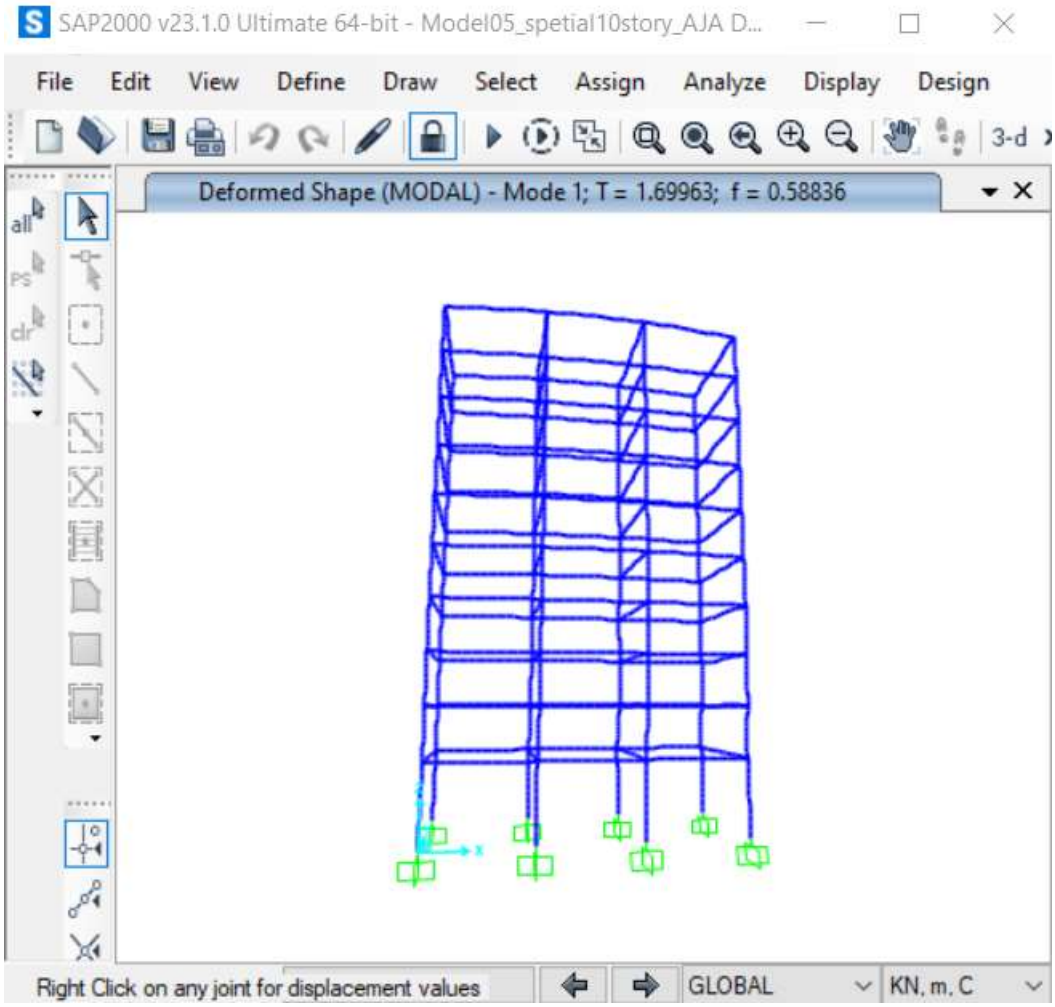
** 1lb=0.4536kg

Çizelge 4.32. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının (ayrık değişkenli) optimizasyonu sonucu elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

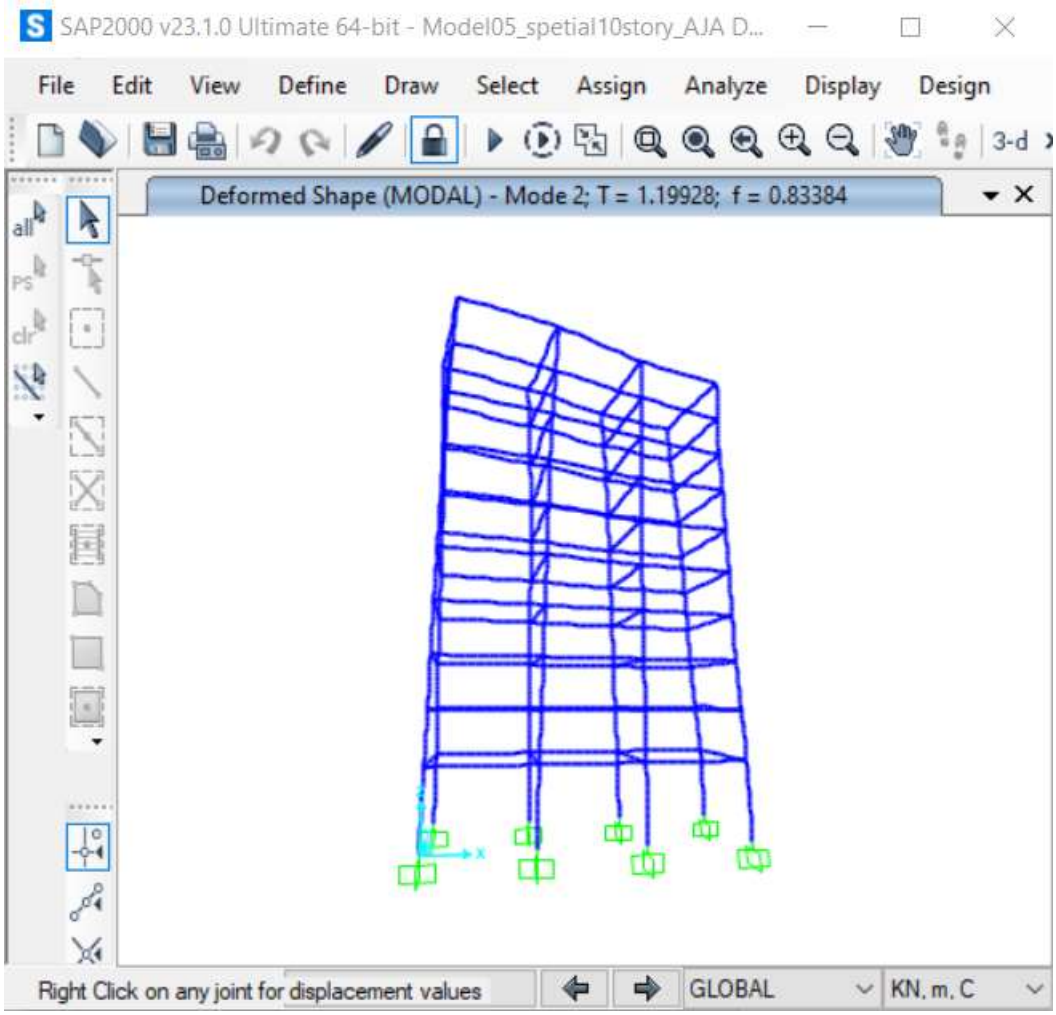
Frekans No (Hz)	Zakian (2019) PSO	Zakian (2019) CSS	Zakian (2019) TLBO	Zakian (2019) GWO	Zakian (2019) IGWO	**MJA**	**AJA**
1	0.5026	0.5021	0.6301	0.5014	0.5063	**0.5544**	**0.5884**
1*	**0.7321**	**0.7366**	**0.8282**	**0.6424**	**0.6127**	**0.5544**	**0.5884**
2	1.1220	1.1434	1.0678	0.9645	1.1108	**0.8012**	**0.8338**
2*	**0.9118**	**1.0194**	**0.8895**	**0.8817**	**0.6597**	**0.8012**	**0.8338**
3	1.2051	1.2107	1.1999	1.2494	1.2120	**1.2375**	**1.2547**
3*	**1.5895**	**1.7736**	**1.1338**	**1.4179**	**1.0411**	**1.2375**	**1.2547**

* SAP 2000 V23 ile elde edilen ilk üç doğal frekans değeri

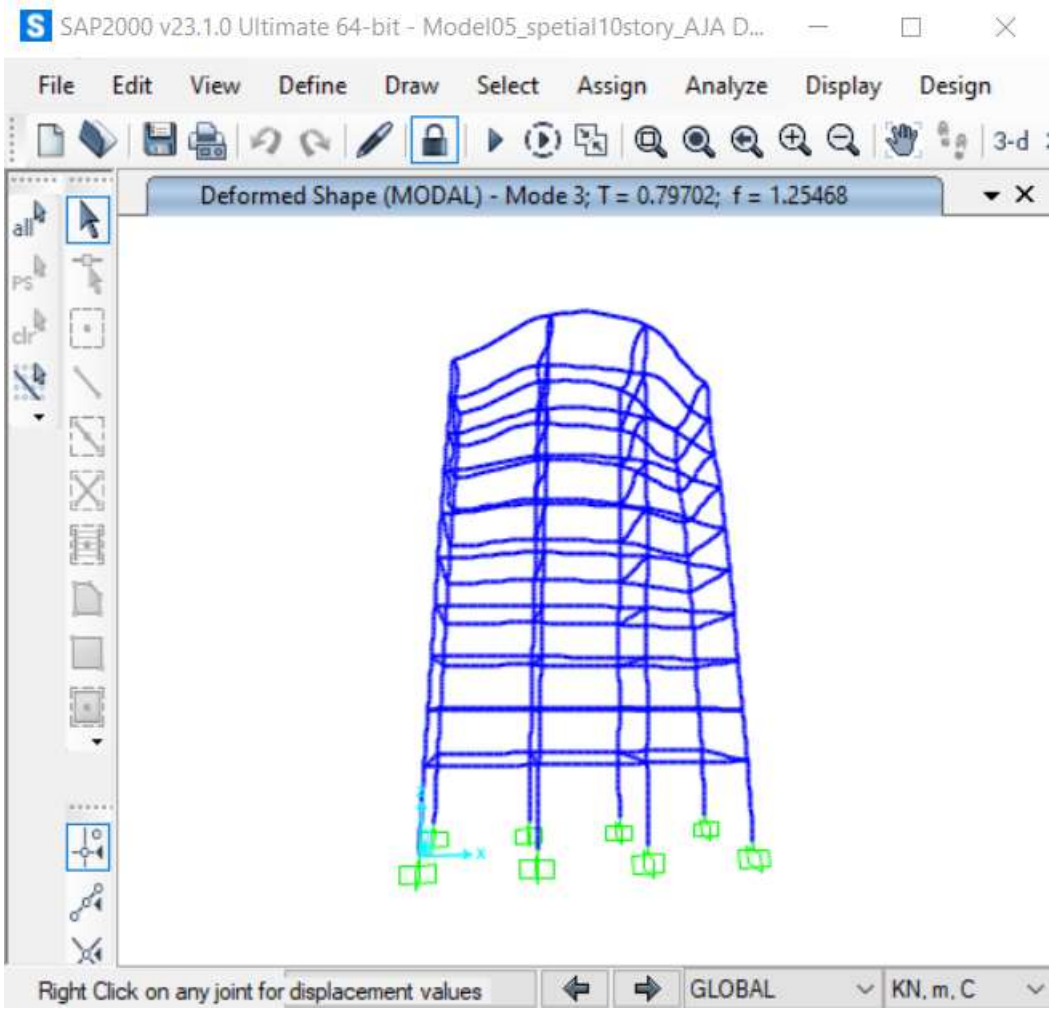
AJA ile elde edilen optimum tasarım, SAP 2000 V23'te modellenmiş ilk üç moduna ait sonuçlar Şekil 4.39.(a-c)'de sunulmuştur. Şekil 4.39.'dan görüleceği üzere SAP 2000 V23 sonuçları ile AJA'dan elde edilen mod değerleri aynıdır.



Şekil 4.39.(a). SAP 2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (ayrık tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 1. Modu

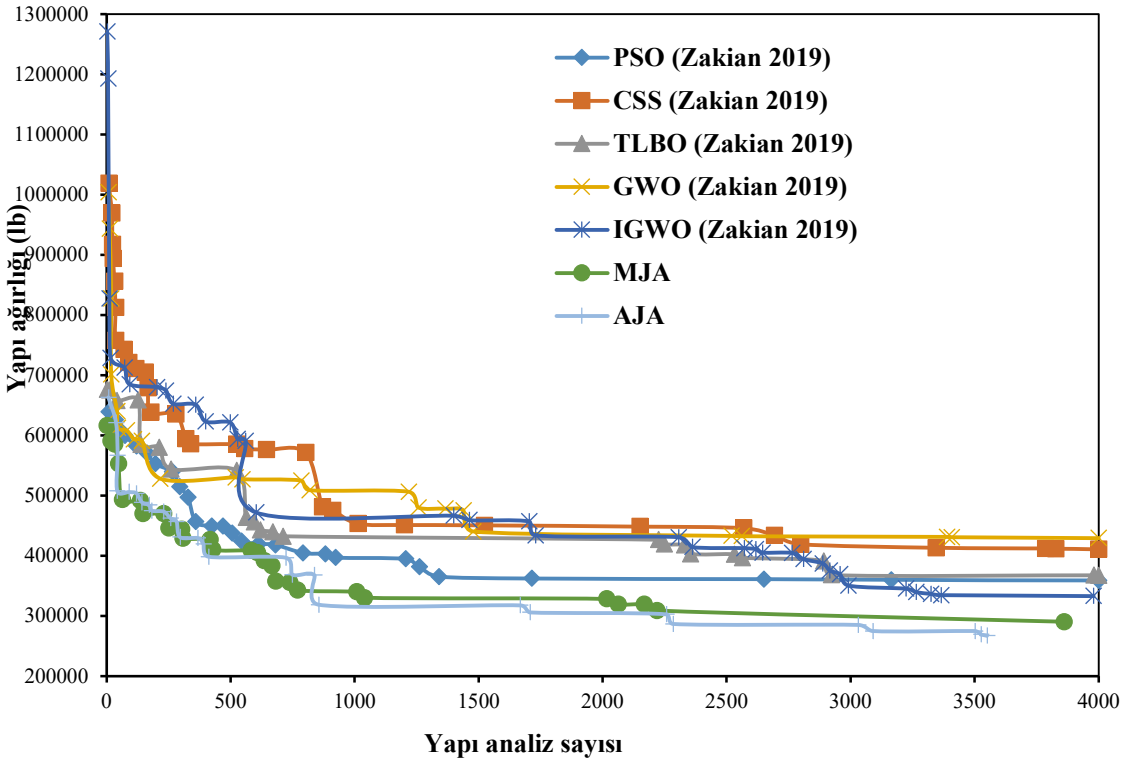


Şekil 4.39.(b). SAP 2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (ayrık tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 2. Modu



Şekil 4.39.(c). SAP 2000 V23 ile modellenen 180 elemanlı (ayrık tasarım değişkenli) uzay çelik çerçeve yapının 3. Modu

AJA ve MJA'nın diğer yöntemlere göre yakınsama eğrileri Şekil 4.40.'ta gösterilmektedir. Bu eğrilerin kıyaslanması sonucunda AJA'nın ve MJA'nın diğer yöntemlerden daha hızlı bir şekilde optimum tasarıma yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.40. 180 elemanlı uzay çerçeve yapının (ayrık değişkenli) yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması (1lb=0.4536kg)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışmasıyla; kafes-çerçeve düzlem ve uzay yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında modifiye JAYA (MJA) ve adaptif JAYA (AJA) optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Tezde sunulan MJA ile standart JA'ya göre daha hızlı bir JAYA algoritması elde edilmeye çalışılmıştır. AJA ile ise herhangi bir optimizasyon parametresi kullanmadan kendini otomatik geliştiren bir JAYA algoritması sunulmuştur. Optimum tasarım sonunda elde edilen yapı sistemleri ayrıca SAP 2000 V23 (2021) yapı analiz programında modellenmiş ve MATLAB'ta kodlanan optimizasyon algoritmalarının icrası ile bulunan sonuçlarla birebir aynı değerler elde edilmiştir. Bu şekilde tezde geliştirilen algoritmaların doğrulanması yapılmıştır. Sunulan yöntemlerin geçerliliği literatürden hazır alınan 7 adet düzlem/uzay kafes ve 5 adet düzlem/uzay çelik çerçeve üzerinde test edilmiştir. Yapılan kıyaslamalar sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

i. Gerek düzlem-uzay kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımı ve gerekse düzlem-uzay çelik çerçevelerin doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımında kullanılan tüm tasarım örneklerinde optimum ağırlık ve optimum tasarımı bulmak için gereken yapı analiz sayısı bakımından AJA yönteminin en başarılı yöntem olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, MJA'nın, standart JAYA'dan ve ayrıca literatürdeki diğer sezgisel optimizasyon yöntemlerinden daha güçlü bir yöntem olduğunu ispat etmektedir.

ii. Tezde sunulan yöntemlerin farklı başlangıç popülasyonları için icra edilmesiyle elde edilen farklı tasarımlar esas alınarak hesaplanan standart sapma değerlerinin küçükten büyüğe doğru sırasıyla AJA, MJA, JA şeklinde olduğu görülmüştür. AJA ile en küçük standart sapma değerinin elde edilmesi bu yöntemin farklı başlangıç popülasyonlarından bağımsız olarak birbirine oldukça yakın nihai tasarımları bulabildiğini göstermektedir.

iii. Optimum ağırlık, yapı analiz sayısı, standart sapma değerleri ve optimum tasarıma yakınsama hızı gibi performans kriterleri bir bütün olarak gözönüne alındığında yöntemlerin başarı sıralamasına göre AJA, MJA şeklinde sıralandığını ve tezde sunulan bu yöntemlerin yukarıda belirtilen performans kriterleri açısından literatürdeki diğer yöntemlerden daha güçlü olduğu ispat edilmiştir.

iv. Bu çalışmanın devamında farklı yöntemlerle frekans sınırlayıcılarının yanı sıra deplasman ve gerilme sınırlayıcıları gibi farklı sınırlayıcılarının da eklenerek yapı optimizasyonu yapılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

Alshammari, N, Asumadu, J. 2020. Optimum unit sizing of hybrid renewable energy system utilizing harmony search, Jaya and particle swarm optimization algorithms. ***Sustain Cities Soc***; 60: 102255.

Anjeneyulu, K. Venkatesh, G. 2020. Optimization of process parameters of magnetic abrasive finishing using jaya algorithm. ***Mater Today-Proc*** https://doi.org/10.1016/j.matpr..06.568 IN PRESS.

Aslan, M. Gunduz, M. Kiran, MS. 2019. JayaX: Jaya algorithm with xor operator for binary optimization. ***Appl Soft Comp***; 82: 105576.

Askarzadeh, A. 2016. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. ***Comput Struct***; 169: 1–12.

Baghlani, A. Makiabadi, MH. 2013. Teaching-learning-based optimization algorithm for shape and size optimization of truss structures with dynamic frequency constraints. *IJST-T Civ Eng*; 37: 409–421.

Baghlani, A. Makiabadi, M. ve Maheri, M. 2017. Sizing optimization of truss structures by an efficient constraint-handling strategy in TLBO. ***Journal of Computing in Civil Engineering***. 31 (4). 04017004.

Bekdaş, G. Nigdeli, SM. Yang, XS. 2015. Sizing optimization of truss structures using flower pollination algorithm. ***Applied Soft Comput***; 37: 322–331.

Beyer, H.G. ve Schwefel, H.-P. 2002. Evolution strategies–A comprehensive introduction. ***Natural computing***. 1 (1). 3-52.

Camp, C. ve Farshchin, M. 2014. Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization. ***Engineering Structures*.** 62. 87-97.

Carvalho, JPG. Lemonge, ACC. Carvalho, ECR. Hallak, PH. Bernardino, HS. 2018. Truss optimization with multiple frequency constraints and automatic member grouping. *Struct Multidiscip Opt*; 57(2): 547–577.

Clerc, M. 2006. Particle Swarm Optimization. *ISTE Publishing Company. London*. UK.

Colorni, A. Dorigo, M. ve Maniezzo, V. 1992. An Investigation of some Properties of an" Ant Algorithm". ***In PPSN*** (Vol. 92. pp. 509-520).

Dede, T. 2013. Optimum design of grillage structures to LRFD-AISC with teaching-learning based optimization. ***Structural and Multidisciplinary Optimization*.** 48 (5). 955-964.

Dede, T. ve Ayvaz, Y. 2013. Structural optimization with teaching-learning-based optimization algorithm. ***Structural Engineering and Mechanics*.** 47 (4). 495-511.

Dede, T. ve Togan, V. 2015. A teaching learning based optimization for truss structures with frequency constraints. ***Structural Engineering and Mechanics***. 53 (4). 833-845.

Dede T. 2018. Jaya algorithm to solve single objective size optimization problem for steel grillage structure. ***Steel Compos Struct***; 26: 163-70.

Degertekin, S. ve Hayalioglu. M. 2013. Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. ***Computers & Structures.*** 119. 177-188.

Degertekin, S. O. Lamberti, L. ve Ugur, I. B. 2017. Sizing. layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. ***Applied Soft Computing***.

Degertekin, SO. Lamberti, L. Ugur, IB. 2018. Sizing. layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. ***Appl Soft Comp***; 70: 903-928.

Degertekin, SO. Lamberti, L. Ugur, IB. 2019. Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm. ***Appl Soft Comp***; 79: 363-390.

Degertekin, SO. Yalcin Bayar, G. Lamberti, L. 2019. Jaya algorithm for sizing and layout optimization of truss structures with natural frequency constraints. In: (B.H.V. Topping and P. Ivany. Eds.) Proceedings of The Sixteenth International Conference on Civil. Structural & Environmental Engineering Computing. ***Civil-Comp Press. Stirlingshire*** (UK).

Degertekin, S. O. ve Tutar, H. 2019. Performance-based optimum seismic design of planar steel frames using the jaya algorithm. *4th Eurasian conference on civil and environmental engineering. Istanbul (Turkey)*. 1315-1326.

Degertekin, SO. T. H, Lamberti, L 2019. Performance-based optimum seismic design of steel frames using the teaching–learning-based optimization. . In: Topping BHV. Logo J (eds) Fifth ınternational conference on soft computing and optimisation in civil. structural and environmental engineering. . Riva Del Garda (Italy).

Degertekin, SO. Yalcin Bayar, G. Lamberti, L. 2021. Parameter free Jaya algorithm for truss sizing-layout optimization under natural frequency constraints. ***Computers & Structures.***245.106461

Dorigo, M. Stutzle, T. 2004. Ant Colony Optimization. MIT Press. *Cambridge (MA)*. USA.

Dorigo, M. ve Blum, C. 2005. Ant colony optimization theory: A survey. ***Theoretical computer science.*** 344 (2-3). 243-278.

Eberhart, RC. Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. Proceedings of The Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science 39-43. Nagoya. Japan.

Erol, OK. Eksin, I. 2006. A new optimization method: big bang-big crunch. ***Adv Eng Softw***; 37(2): 106–111.

Eskandar, H. Sadollah, A. Bahreininejad, A. Hamdi, M. 2012. Water cycle algorithm - a novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. ***Comput Struct***; 110−111: 151−166.

Farmer, JD. Packard, NH. Perelson, AS. 1986. The immune system. adaptation and machine learning. ***Physica D***; 22(1-3): 187–204.

Farshchin, M. Camp, CV. Maniat, M. 2016. Multi-class teaching–learning-based optimization for truss design with frequency constraints. ***Eng Struct***; 106: 355–369.

Farshchin. M. Camp, CV. Maniat, M. 2016. Optimal design of truss structures for size and shape with frequency constraints using a collaborative optimization strategy. ***Expert Syst Appl***; 66: 203–218.

Fogel, LJ. Owens, AJ. Walsh, MJ. 1966. Artificial Intelligence through Simulated Evolution. ***John Wiley***.

Gandomi, AH. Alavi, AH. 2012. Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm. ***Commun Nonlinear Sci***; 17(12): 4831−4845.

Gandomi, AH. Yang, XS. Alavi, AH. 2013. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems. ***Eng. Comput***.; 29(1): 17−35.

Geem, ZW. Kim, JH. Loganathan, G. 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. ***Simulation*** 76(2): 60−68.

Gholizadeh, S., Salajegheh, E., & Torkazadeh, P. 2008. Structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using wavelet radial basis function neural network. ***Journal of Sound and Vibration;*** 312, 316–331. doi:10.1016/ j.jsv.2007.10.050.

Gholizadeh, S. Barzegar, A. 2013. Shape optimization of structures for frequency constraints by sequential harmony search algorithm. ***Eng Optimiz***; 45(6): 627–646.

Glover, F. Laguna, M. 1997. Tabu Search. Kluwer Academic Publishers. ***Boston (MA)***. USA.

Goldberg, D.E. 1989. Genetic Algorithms in Search. Operation and Machine Learning. Addison-Wesley. ***Reading (MA)***. USA.

Gomes, HM. 2011.Truss optimization with dynamic constraints using a particle swarm algorithm. ***Expert Syst Appl***; 38: 957–968.

Gonçalves, MS. Lopez, RH. Miguel, LFF. 2015. Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures. ***Comput Struct***; 153: 165−184.

Grandhi, R. V., & Venkayya, V. B. 1988. Structural optimization with frequency constraints. ***AIAA Journal,*** 26(7), 858–866.

Grzywinski, M. Dede, T. Ozdemir, YI. 2019. Optimization of the braced dome structures by using Jaya algorithm with frequency constraints. ***Steel Compos Struct***; 30(1): 47–55.

Holland, John. H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. ***Ann Arbor****: University of Michigan Press*.

Ho-Huu, V. Vo-Duy, T. Luu-Van, T. Le-Anh, L. Nguyen-Thoi, T. 2016. Optimal design of truss structures with frequency constraints using improved differential evolution algorithm based on an adaptive mutation scheme. ***Automat Constr***; 68: 81–94.

Ho-Huu, V. Nguyen-Thoi, T. Truong-Khac, T. Le-Anh, L. Vo-Duy T. 2018. An improved differential evolution based on roulette wheel selection for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints. ***Neural Comput Appl***; 29(1):167–185.

Hosseinzadeh, Y. Taghizadieh, N. Jalili, S. 2016. Hybridizing electromagnetism-like mechanism algorithm with migration strategy for layout and size optimization of truss structures with frequency constraints. ***Neural Comput Appl***; 27(4): 953–971.

Jalili, S. Hosseinzadeh, Y. Kaveh, A. 2014. Chaotic biogeography algorithm for size and shape optimization of truss structures with frequency constraints. ***Period Polytech-Civ***; 58(4): 397–422.

Jalili, S. Talatahari, S. 2018. Optimum design of truss structures under frequency constraints using hybrid CSS-MBLS algorithm. ***KSCE J Civ Eng***; 22(5): 1840□1853.

Jalili, S. Hosseinzadeh, Y. 2019. Combining migration and differential evolution strategies for optimum design of truss structures with dynamic constraints. ***Iran J Sci Technol Trans Civ Eng***; 43: 289–312.

Jumani, TA. Mustafa, MW. Hussain, Z. Rasid, MM. Saeed, MS. Memon, MM. Kha,n I. Nisar, KS. 2020. Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system. Alexandria Engineering J https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.005 IN PRESS.

Kanarachos, S. Griffin, J. Fitzpatrick, ME. 2017. Efficient truss optimization using the contrast-based fruit fly optimization algorithm. ***Comput Struct***; 182: 137–148.

Kang, F. Li, J. Dai, J. 2019. Prediction of long-term temperature effect in structural health monitoring of concrete dams using support vector machines with Jaya optimizer and salp swarm algorithms. ***Adv Eng Softw***; 131: 60-76.

Karaboga, D. Basturk, B. 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. ***J Global Optim***; 39(3): 459–471.

Kaveh, A. Bakhshpoori, T. 2016. A new metaheuristic for continuous structural optimization: water evaporation optimization. ***Struct Multidiscip Optim***; 54: 23□43.

Kaveh, A. Dadras, A. 2017. A novel meta-heuristic optimization algorithm: thermal exchange optimization. ***Adv Eng Softw***; 110: 69□84.

Kaveh, A. Farhoudi, N. 2013. A new optimization method: Dolphin echolocation. ***Adv Eng Softw***; 59: 53–70.

Kaveh, A. Ghazaan, MI. 2015. Hybridized optimization algorithms for design of trusses with multiple natural frequency constraints. ***Adv Eng Softw***; 79: 137–147.

Kaveh, A. Ghazaan, MI. 2016. Optimal design of dome truss structures with dynamic frequency constraints. ***Struct Multidiscip Opt***; 53(3): 605–621.

Kaveh ,A. Ghazaan, MI. 2017. Vibrating particles system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints. ***Acta Mech***; 228(1): 307:322.

Kaveh, A. Ghazaan, MI. 2018. A new hybrid meta-heuristic algorithm for optimal design of large-scale dome structures. ***Eng Optim***; 50(2): 235–252.

Kaveh, A. Javadi, SM. 2014. Shape and size optimization of trusses with multiple frequency constraints using harmony search and ray optimizer for enhancing the particle swarm optimization algorithm. ***Acta Mech***; 225(6): 1595–1605.

Kaveh, A. Javadi, SM. 2019. Chaos-based firefly algorithms for optimization of cyclically large-size braced steel domes with multiple frequency constraints. ***Comput Struct***; 214: 28–39.

Kaveh, A. Khayatazad, M. 2012. A new meta-heuristic method: Ray Optimization. ***Comput Struct***; 112: 283–294.

Kaveh, A. Kooshkbaghi, M. 2019. Enhanced artificial coronary circulation system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints. ***Period Polytech-Civ***; 63(2): 362:376.

Kaveh, A. Mahdavi, VR. 2013. Optimal design of structures with multiple natural frequency constraints using a hybridized BB-BC/Quasi-Newton algorithm. ***Period Polytech-Civ***; 57(1): 27–38.

Kaveh, A. Mahdavi, VR. 2014. Colliding-bodies optimization for truss optimization with multiple frequency constraints. ***J Comput Civil Eng***; 29(5): Article No. 04014078.

Kaveh, A. Mahdavi, VR. 2014. Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method. ***Comput Struct***; 139: 18–27.

Kaveh, A. Mahdavi, VR. 2015. Two-dimensional colliding bodies algorithm for optimal design of truss structures. ***Adv Eng Softw***; 83: 70–79.

Kaveh, A. Mahjoubi, S. 2019. Hypotrochoid spiral optimization approach for sizing and layout optimization of truss structures with multiple frequency constraints. ***Eng Comput***; 35:1443–1462.

Kaveh, A. Motie Share, MA. Moslehi, M. 2013. A new meta-heuristic algorithm for optimization: magnetic charged system search. ***Acta Mech*** 224(1): 85–107.

Kaveh, A. Talatahari, S. 2010. A novel heuristic optimization method: charged system search. ***Acta Mech***; 213: 267–289.

Kaveh, A. Talatahari, S. 2010. Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm. ***Comput Struct***; 88(21–22): 1220–1229.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2011. Shape and size optimization of truss structures with frequency constraints using enhanced charged system search algorithm. ***Asian J Civil Eng***;12:487–509.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2012.Truss optimization with natural frequency constraints using a hybridized CSS-BBBC algorithm with trap recognition capability. ***Comput Struct***; 102: 14–27.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2014. Democratic PSO for truss layout and size optimization with frequency constraints. ***Comput Struct***; 130: 10–21.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2014. Comparison of nine meta-heuristic algorithms for optimal design of truss structures with frequency constraints. Adv Eng Softw; 76: 9–30.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2016. Optimal analysis and design of large-scale domes with frequency constraints. ***Smart Struct Syst***; 18(4): 733–754.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2017. Cyclical parthenogenesis algorithm for guided modal strain energy based structural damage detection. ***Applied Soft Comput***; 57: 250–264.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2017. Cyclical parthenogenesis algorithm for layout optimization of truss structures with frequency constraints. ***Eng Optimiz***; 49(8): 1317:34.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2018. Meta-heuristic methods for optimization of truss structures with vibration frequency constraints. ***Acta Mech***; 229(10): 3971–3992.

Kaveh, A. Zolghadr, A. 2018. Optimal design of cyclically symmetric trusses with frequency constraints using cyclical parthenogenesis algorithm. ***Adv Struct Eng***; 21(5): 739–755.

Khan, A. Javaid, N. 2020. Jaya learning-based optimization for optimal sizing of stand-alone photovoltaic. wind turbine. and battery systems. Engineering https://doi.org/10.1016/j.eng.06.004 ***IN PRESS.***

Khatibinia, M. Naseralavi, SS. 2014. Truss optimization on shape and sizing with frequency constraints based on orthogonal multi-gravitational search algorithm. ***J Sound Vib***; 333(4): 6349–6369.

Kirkpatrick, S. Gelatt, CD. Vecchi, MP. 1983. Optimization by simulated annealing. ***Science***; 220(4598): 671–680.

Lamberti, L. Pappalettere, C. 2009. An improved harmony-search algorithm for truss structure optimization. In: (B.H.V. Topping. L.F.C. Neves and R.C. Barros. Eds.) Proceedings of the Twelfth International Conference Civil. ***Structural and Environmental Engineering Computing. Civil-Comp Press***. Stirlingshire (UK).

Lieu, QX. Do, DTT. Lee, J. 2018. An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints. ***Comput Struct***; 195: 99:112.

McGee OG, Phan KF. 1991. A robust optimality criteria procedure for cross-sectional optimization of frame structures with multiple frequency limits. ***Comput Struct***;38(5–6):485–500.

McGee OG, Phan KF. 1992. On the convergence quality of minimum-weight design of large space frames under multiple dynamic constraints. ***Struct Optim***;4(3–4):156–64.

Miguel, L.F. Fadel Miguel, L.F.F. 2012. Shape and size optimization of structures considering dynamic constraints through modern metaheuristic algorithms. ***Expert Systems with Applications*** 39; 9458–9467

Mirjalili, S. 2015. The ant lion optimizer. ***Adv Eng Softw***; 83: 80–98.

Mohamed, TH. Alamin, MAM. Hassan, AM. 2020. Adaptive position control of a cart moved by a DC motor using integral controller tuned by Jaya optimization with Balloon effect. ***Computers and Electrical Engineering***; 87: 106786.

Oftadeh, R. Mahjoob MJ. 2010. Shariatpanahi M. A novel meta-heuristic optimization algorithm inspired by group hunting of animals: Hunting search. *Comput. Math. Appl.*; 60(7): 2087–2098.

Passino, KM. 2002. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE* ***Contr Syst Mag***; 22(3): 52−67.

Pham, HA. 2016.Truss optimization with frequency constraints using enhanced differential evolution based on adaptive directional mutation and nearest neighbor comparison. ***Adv Eng Softw***; 102: 142−154.

Polat, Z. 2009. Deprem Mühendisliği açısından ***Yapı Dinamiğine Giriş***.İO İstanbul şubesi. Meslek İçi eğitim Semineri:1-27.

Pradhan, C. Bhende, CN. 2019. Online load frequency control in wind integrated power systems using modified Jaya optimization. ***Eng Appl Artif Intel***; 77: 212-228.

Ramesh, S. Vydeki, D. 2020. Recognition and classification of paddy leaf diseases using Optimized Deep Neural network with Jaya algorithm. ***Information Processing in Agriculture***; 7: 249-260.

Rao, RV. Savsani, VJ. Vakharia, DP. 2011. Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. ***Comput Aided Des***; 43(3): 303-315.

Rao, RV. 2016. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. ***Int J Ind Eng Comp***; 7: 19–34.

Rao, RV. More, KV. 2017. Design optimization and analysis of selected thermal devices using self-adaptive Jaya algorithm. ***Energ Convers Manage***; 140: 24–35.

Rao, RV. Rai, DP. 2017. Optimisation of welding processes using quasi-oppositional-based Jaya algorithm. ***J Exp Theor Artif Intell***; 29(5): 1099–1117

Rao, RV. Saroj, A. 2017. Economic optimization of shell-and-tube heat exchanger using Jaya algorithm with maintenance consideration. ***Appl Therm Eng***; 116: 473–487.

Rao, RV. Saroj, A. 2018. Multi-objective design optimization of heat exchangers using elitist-Jaya algorithm. ***Energy Systems***; 9(2): 305–341.

Rao, RV. Rai, DP. Balic, J. 2018. Optimization of abrasive waterjet machining process using multi-objective jaya algorithm. ***Mater Today-Proc***; 5: 4930–4938.

Rashedi, E. Nezamabadi-pour, H. Saryazdi, S. 2009. GSA: A Gravitational Search Algorithm. ***Inform Sciences***; 179: 2232–2248.

Sadollah, A. Bahreininejad, A. Eskandar, H. Hamdi, M. Mine, 2012. Blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. ***Comput Struct***; 102-103: 49-63.

Salajegheh, E. 1997. Structural optimization using response approximation and optimality criteria methods. ***Eng Struct***;19(7):527–32.

Salajegheh, E. 2000. Optimum design of structures with high-quality approximation of frequency constraints. ***Adv Eng Softw***;31(6):381–4.

Salajegheh, E. 2000. Optimum design of steel space frames with frequency constraints using three point Rayleigh quotient approximation. ***J Constr Steel Res***;54(2):305–13.

SAP 2000, v20. 2018. Integrated Software for Structural Analysis and Design. ***Computers & Structures****. Inc.* Walnut Creek (CA). USA.

SAP 2000, v23. 2021. Integrated Software for Structural Analysis and Design. ***Computers & Structures****. Inc.* Walnut Creek (CA). USA.

Sedaghati, R. 2005. Benchmark case studies in structural design optimization using the force method. ***International Journal of Solids and Structures***; 42:5848-5871.

Simon, D. 2008. Biogeography-Based Optimization. ***IEEE T Evolut Comput***; 12(6): 702-13.

Storn, R. Price, K. 1995. Differential evolution–a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report No. TR-95-012. Berkeley USA: International Computer Science Institute.

Sudhakar, T. Inbarani, HH. 2018. Intelligent path selection in wireless networks using jaya optimization. ***Procedia Computer Science***; 133: 976-983.

Taheri, SHS. Jalili, S. 2016. Enhanced biogeography-based optimization: A new method for size and shape optimization of truss structures with natural frequency constraints. ***Lat Am J Solids Struct***; 13(7): 1406−1430.

Talatahari, S. Hosseini, A. Mirghaderi, S. ve Rezazadeh, F. 2014. Optimum performance-based seismic design using a hybrid optimization algorithm. ***Mathematical Problems in Engineering.*** 2014.

Talatahari, S. Goodarzimehr, V. ve Taghizadieh, N. 2019. Hybrid Teaching-Learning-Based Optimization and Harmony Search for Optimum Design of Space Trusses. ***Journal of Optimization in Industrial Engineering.***

Tehranizadeh, M. ve Moshref, A. 2011. Performance-based optimization of steel moment resisting frames. ***Scientia Iranica***. 18 (2). 198-204.

Tejani, GG. Savsani, VJ. Patel, VK. 2016. Modified sub-population teaching-learning-based optimization for design of truss structures with natural frequency constraints. ***Mech Based Des Struc***; 44(4): 495–513.

Tejani, GG. Savsani, VJ. Patel, VK. 2016. Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. ***J Comput Des Eng***; 3(3): 226–249.

Tejani, GG. Savsani, VJ. Patel, VK. Mirjalili, S. 2018. Truss optimization with natural frequency bounds using improved symbiotic organisms search. ***Knowl-Based Syst***; 143: 162–178.

Yang, XS. 2010. Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. ***John Wiley & Sons.***

Yang, XS. Gandomi, AH. 2012. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. ***Eng. Comput.***; 29(5): 464–483.

Wei, LY. Zhao, M. Wu, GM. Meng, G. 2005. Truss optimization on shape and sizing with frequency constraints based on genetic algorithm. ***Comput Mech***; 35(5): 361–368.

Wei, LY. Tang, TB. Xie, XH. Shen, WJ. 2011. Truss optimization on shape and sizing with frequency constraints based on parallel genetic algorithm. ***Struct Multidisc Optim***; 43(5): 665–682.

Zakian, P. 2019. meta-heuristic design optimization of steel moment resisting frames subjected to natural frequency constraints. ***Advances in Engineering Software***;135:102686

Zuo, WJ. Xu T. Zhang, H. Xu, TS. 2011. Fast structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using adaptive eigenvalue reanalysis methods. ***Struct Multidiscip Opt*;** 43(6): 799–810.

Zuo, WJ. Bai, JT. Li, B. 2014. A hybrid OC–GA approach for fast and global truss optimization with frequency constraints. ***Appl Soft Comput***; 14: 528–535.

AISC-LRFD, 1999. load and resistance factor design (LRFD). Specification for structural steel buildings. Chicago: ***American Institute of Steel Construction***. Inc.

Carlos, A.F. 2004. Lumped and Consistent Mass Matrices. Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures University of Colorado Boulder, Colorado 80309-0429, USA, 23 pages.

Celep, Z. 2014. Yapı dinamiği. Beta Dağıtım.

Choprra, A. K. 2000. "Dynamics Of Structures: Theory ans Applications to Earthquake Engineering", Prentice-Hall, Inc., 844 pages

Chopra, A.K. 2001. Dynamics of Structures. Printice-Hall, 844 s, USA.

Çelebi, M. ve Erdik, M. 1977. (Deprem Mühendisliği Açısından) Yapı Dinamiğine Giriş. Ankara

De Silva, C. W. 1999. Vibration. CRC Press.

Erdik, M. ve Yüzügüllü, Ö. 1980. Deprem Mühendisliği Açısından Yapı Dinamiğine Giriş. Ankara

He, J. Fu, Z.F. 2001. Modal Analysis. Butterworth-Heinemann.1-10, 159-195

Hibbeler, R.C. 2004. Mühendislik Mekaniği Dinamik. Literatür Yayıcılık.

Kaplan, H. 2013. Yapı Statiği II. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Kaveh, A. Mahdavi, V.R. 2015. Colliding Bodies Optimization. Extension and Applications.39-84.

Ross, C.T.F. 1935. Finite Element Prorams for Structural Vibrations. Spinger Verlag.

Timoshenko, S. 1937. Vibration Problems In Engineering. New York D.Van Nostrand Company, Inc.

Özberk, L. 2006. Üç boyutlu Çubuk taşıyıcı sistemlerin Statik ve Dinamik Analizini Yapan Bir Paket Program. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Tutum, C. C. 2006. Kafes Sistemlerin Optimum Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Umudum, A. 2014. Yapı Sistemlerinde Özdeğer Problemi ve Çözüm Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

ÖZGEÇMİŞ

Gülay YALÇİN BAYAR İlköğrenimini Yenişehir İlçesine bağlı Mehmetcik İlkokulunda, Ortaokul öğrenimini Ali Emiri Ortaokulunda Lise öğrenimini ise Ziya Gökalp Lisesinde tamamladı. Üniversite öğrenimini, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladıktan sonra 2 yıl özel sektörde çalıştı. Daha sonra Milli Savunma Bakanlığı Diyarbakır İnş. Eml. Ve NATO Enf. Bölge Başkanlığında 2005-2009 yılları arasında kontrol mühendisi olarak görev yaptı. 2006-2008 yılları arasında Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2009 yılında çalıştığı kurumdan ayrılarak Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne öğretim görevlisi olarak göreve başladı. Halen Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmaktadır.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Gülay YALÇİN BAYAR
ÖĞRENCİ NO	13806504
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2020-2021
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	İnşaat Mühendisliği
PROGRAM	Doktora
TEZ KONUSU	Yapı Sistemlerinin Doğal Frekans Sınırlayıcıları Altında Adaptif JAYA Algoritmasıyla Optimum Tasarımı
	İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	197
BENZERLİK ORANI	%20
RAPORLAMA TARİHİ	11/06/ 2021

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 197 sayfalık kısmına ilişkin, 11/06/2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *TURNİTİN* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %20 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Gülay YALÇİN BAYAR
(İMZA/TARİH)

Sadık Özgür DEĞERTEKİN **Tez Danışmanı** (İMZA/TARİH)	Zeynel Fuat TOPRAK **Anabilim Dalı Başkanı** (İMZA/TARİH)