T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AYRIK VE SÜREKLİ TASARIM DEĞİŞKENLİ KAFES YAPILARIN JAYA ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYONU

İbrahim Behram UĞUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Haziran – 2017

T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

İbrahim Behram UĞUR tarafından yapılan "Ayrık ve Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Jaya Algoritması ile Optimizasyonu" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesinin

	Ünvanı	Adı Soyadı	
Başkan:	Prof. Dr.	S. Özgür DEĞERTEKİN	
Üye :	Doç. Dr.	Halil GÖRGÜN	
Üye :	Yrd. Doç. Dr.	Sedat SAVAŞ	

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 22/06/2017

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../.../2017

Doç. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımda bilgi ve deneyimleriyle bana ışık tutan, her şartta destek ve yardımlarını esirgemeyen, öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. S. Özgür DEĞERTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkılarından dolayı Ögr. Gör. Hikmet TUTAR'a ve desteklerini esirgemeyen Sn. Jiyan GÜNGEN'e teşekkür ederim.

Ayrıca başta Arş. Gör. Bilal KORKMAZ ve Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma ve hayatımın her anında bana destek olan biricik aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR..... I

ÖZET V

ABSTRACT VI

ÇİZELGE LİSTESİ VII

ŞEKİLLER LİSTESİ XI

KISALTMA VE SİMGELER XV

1. GİRİŞ 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3

2.1. Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Optimizasyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar 3

2.2. Ayrık Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Optimizasyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar 5

2.3. Jaya Algoritması Kullanılarak Yapılan Çalışmalar 8

3. MATERYAL ve METOT 9

3.1. Optimizasyon Nedir? 9

3.1.1. Optimizasyonda Temel Kavramlar 10

3.1.1.1. Tasarım Değişkenleri 10

3.1.1.2. Sınırlayıcılar 10

- Davranış Sınırlayıcıları 10

- İmalat Sınırlayıcıları 11

3.1.1.3. Tasarım Uzayı 11

3.1.1.4. Amaç Fonksiyonu 11

3.2. İnşaat Mühendisliğinde Optimizasyon 11

3.3. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri 12

3.4. Jaya Algoritması (JA) 13
3.5. Kafes Yapılar 16
3.5.1. Düzlem Kafes Yapıların Statik Analizi 16
3.5.2. Uzay Kafes Yapıların Statik Analizi 26
3.5.3. OPENSEES v2.5.0 Yazılımı 28
3.5.3.1. 10 Elemanlı Düzlem Kafes Yapının Statik Analiz Sonuçlarının SAP2000 Yazılımı ile Karşılaştırılması 29
3.5.3.2. 25 Elemanlı Uzay Kafes Yapının Statik Analiz Sonuçlarının SAP2000 Yazılımı ile Karşılaştırılması 33
3.5.4. Kafes Yapıların Optimizasyon Probleminin Formülasyonu 35
3.5.4.1. Kafes Yapıların Jaya Algoritmasıyla Optimizasyonu 36
3.5.4.2. Jaya Algoritmasıyla Optimizasyon Programının Tanıtılması 40
- DefineModel 41
- Trussweight 41
- StaticAnalyse 41
- ReadAnalyseResult 42
- Constraints 42
- PunishedWeight 42
- UpdateVariables 42
- RecordOptWeight 43
- PlotModelandGraphic 44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
4.1. Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapı Örnekleri 45
4.1.1. 10 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı 46
4.1.2. 25 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Uzay Kafes Yapı 53
4.1.3. 72 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Uzay Kafes Yapı 57

4.1.4. 200 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı 68
4.1.5. 942 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Kule Kafes Yapı 74
4.2. Ayrık Tasarım Değişkenli Kafes Yapı Örnekleri 82
4.2.1. 10 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Kafes Yapı 83
4.2.2. 25 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Uzay Kafes Yapı 89
4.2.3. 47 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Kule 100
4.2.4. 52 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı 106
4.2.5. 72 Elemanlı Uzay Kafes Yapı 111
4.2.6. 200 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı 122
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 127
6. KAYNAKLAR 129
ÖZGEÇMİŞ 133

ÖZET

AYRIK VE SÜREKLİ TASARIM DEĞİŞKENLİ KAFES YAPILARIN JAYA ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Behram UĞUR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2017

Bu çalışmada, sürekli ve ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılması için yakın zamanda geliştirilen bir optimizasyon yöntemi olan Jaya algoritması (JA) kullanılmıştır. Jaya algoritması, optimum tasarımı elde etmek için en iyi çözüme yaklaşma ve en kötü çözümden uzaklaşma stratejisini uygulamaktadır. Kendine özgü optimizasyon parametreleri olmayan JA, popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı gibi genel kontrol parametrelerini kullanmaktadır. Bu çalışmada deplasman, gerilme ve burkulma sınırlayıcıları altında kafes yapı ağırlığının minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla MATLAB programlama dilinde düzlem ve uzay kafes yapıların gerilme, deplasman ve burkulma sınırlayıcıları altında Jaya algoritması yöntemiyle optimizasyonunu yapan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Jaya algoritmasının geçerliliğini araştırmak üzere, literatürde bulunan sürekli tasarım değişkenli beş farklı kafes yapı ile ayrık tasarım değişkenli altı farklı kafes yapının optimizasyonu yapılmıştır. Gerek sürekli gerekse ayrık tasarım değişkenli kafes yapı örneklerinden elde edilen sonuçlar JA'nın optimum ağırlık, standart sapma ve optimum tasarımı bulmak için gerekli analiz sayısı bakımından diğer optimizasyon yöntemlerinden daha etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca; yapı ağırlığının optimizasyon süresince değişimi incelendiğinde, JA'nın optimum tasarımı bulmada diğer yöntemlerden çok daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. JA'nın farklı başlangıç tasarım değişkenleri için icra edilmesi sonucunda elde edilen farklı kafes yapı ağırlıklarının standart sapma değerlerinin ortalama ağırlıklarına kıyasla oldukça küçük olduğu belirlenmiştir. Bu durum JA'nın global optimum veya global optimuma yakın sonuçları bulmada oldukça etkili bir yöntem olduğunun kanıtıdır. Bütün kafes yapı örneklerinde tasarım sınırlayıcıları sıkı bir şekilde kontrol edilerek JA ile elde edilen optimum tasarımların sınırlayıcıları aşması engellenmiştir. Böylece JA'nın güvenilirliği kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Optimum Tasarım, Kafes Yapılar, Ayrık Tasarım Değişkeni, Sürekli Tasarım Değişkeni, Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri, Jaya Algoritması.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF TRUSS STRUCTURES WITH DISCRETE AND CONTINUOUS DESIGN VARIABLES USING JAYA ALGORITHM

MSc THESIS

İbrahim Behram UĞUR

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

2017

In this study, a recently developed optimization method called Jaya algorithm (JA) is used for minimum weight design of truss structures with continuous and discrete design variables. The main idea of the JA is to approach the best solution and get away the worst solution in order to obtain optimum. The JA only requires common control parameters such as population size and maximum iteration number and does not utilize algorithm-specific parameters. The objective of optimization problem is to minimize the weight of truss structures subjected to structural constraints. For this purpose, a computer program codded in MATLAB programing language is developed for sizing optimization of the planar and spatial truss structures subjected to stress, displacement and buckling constraints. Six truss structures with discrete design variables and five truss structures with continuous design variables are used in order to verify the validity of the Jaya algorithm. Optimization results of truss structures with continuous and discrete design variables demonstrate that the JA could obtain better designs than those of the other state-of-the-art metaheuristic optimization methods in terms of optimized weight, standard deviation and number of structural analyses. Besides, the JA is shows better convergence capability than the other methods. The standard deviation values for JA are very small in comparison with average weight. The design constraints are strictly checked and all design examples satisfy the constraints and hence, the reliability of JA is provided.

Key Words: Optimum design, Truss structures, Discrete variables, Continuous variables, Metaheuristic optimization methods, Jaya algorithm.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	10 elemanlı düzlem kafes için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen eleman uç kuvvetlerinin karşılaştırılması	32
Çizelge 3.2.	10 elemanlı düzlem kafes için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen düğüm deplasmanlarının karşılaştırılması	32
Çizelge 3.3.	25 elemanlı uzay kafes yapı için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen eleman uç kuvvetlerinin karşılaştırılması	34
Çizelge 3.4.	25 elemanlı uzay kafes yapı için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen düğüm noktası deplasmanlarının karşılaştırılması	34
Çizelge 4.1.	JA'da farklı popülasyon sayıları için elde edilen optimum tasarım sonuçları	46
Çizelge 4.2.	10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. yükleme durumu)	49
Çizelge 4.3.	10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. yükleme durumu)	50
Çizelge 4.4.	10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapıda I. ve II. yükleme durumları için istatistiksel değerlerin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması	51
Çizelge 4.5.	25 elemanlı uzay kafes yapıda eleman gerilme sınır değerleri	54
Çizelge 4.6.	25 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması	55
Çizelge 4.7.	25 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması	56

Çizelge 4.8. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 59

Çizelge 4.9. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. optimizasyon durumu için istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 60

Çizelge 4.10. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 61

Çizelge 4.11. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. optimizasyon durumu için istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 62

Çizelge 4.12. 200 elemanlı düzlem kafes yapının tasarım değişkenleri 70

Çizelge 4.13. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması 72

Çizelge 4.14. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 73

Çizelge 4.15. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması 78

Çizelge 4.16. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 79

Çizelge 4.17. Farklı popülasyon sayıları için elde edilen optimum tasarım sonuçları 83

Çizelge 4.18. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 85

Çizelge 4.19. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 85

Çizelge 4.20. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 86

Çizelge 4.21. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 86

Çizelge 4.22. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapıda yükleme şartları 90

Çizelge 4.23. AISC (1989) standart enkesit alanları 90

Çizelge 4.24. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 92

Çizelge 4.25. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 93

Çizelge 4.26. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II.optimizasyon durumu) 93

Çizelge 4.27. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 94

Çizelge 4.28. 25 elemanlı ayrık tasam değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (III. optimizasyon durumu) 94

Çizelge 4.29. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (III. optimizasyon durumu) 94

Çizelge 4.30. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes kulenin optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması 103

Çizelge 4.31. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes kulenin istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 103

Çizelge 4.32. 52 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması 109

Çizelge 4.33. 52 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 110

Çizelge 4.34. 72 elemanlı ayrık değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 113

Çizelge 4.35. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu) 114

Çizelge 4.36. 72 elemanlı ayrık değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 115

Çizelge 4.37. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu) 116

Çizelge 4.38. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarımı sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması 123

Çizelge 4.39. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması 124

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1.	Jaya algoritmasının akış diyagramı	15
Şekil 3.2	Yay modeli	16
Şekil 3.3.	Elastik yay için yük-deplasman ilişkisi	17
Şekil 3.4.	Düzlem kafes elemanın serbestlik dereceleri	18
Şekil 3.5.	Uzay kafes elemanın serbestlik dereceleri	18
Şekil 3.6.	Düzlem kafes eleman için rijitlik katsayıları	19
Şekil 3.7.	Düzlem kafes elemanda (a) eğimli durum (b) u_1, u_2 yatay deplasmanları c) v_1, v_2 düşey deplasmanları	21
Şekil 3.8.	Uzay kafes eleman	26
Şekil 3.9.	10 elemanlı düzlem kafes yapı	30
Şekil 3.10.	10 elemanlı kafes yapının OPENSEES v2.5.0 veri dosyası	31
Şekil 3.11.	25 elemanlı uzay kafes yapı	33
Şekil 3.12.	Kafes yapıların Jaya algoritmasıyla optimizasyonu için akış diyagramı	39
Şekil 3.13.	Jaya algoritmasıyla optimizasyon program koduna ait ana program	40
Şekil 4.1.	10 elemanlı düzlem kafes yapı	47
Şekil 4.2.	10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. yükleme durumu)	52
Şekil 4.3.	10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. yükleme durumu)	52
Şekil 4.4.	25 elemanlı uzay kafes yapı	53
Şekil 4.5.	25 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi	57

Şekil 4.6. 72 elemanlı uzay kafes yapı (a) Plan ve yandan görünüş (b) I. kat için eleman ve düğüm noktası numaralandırılması 58

Şekil 4.7. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri (I. optimizasyon durumu) 63

Şekil 4.8. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri (II. optimizasyon durumu) 63

Şekil 4.9. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (I. optimizasyon durumu) 64

Şekil 4.10. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (I. optimizasyon durumu) 64

Şekil 4.11. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (II. optimizasyon durumu) 65

Şekil 4.12. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (II. optimizasyon durumu) 65

Şekil 4.13. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu) 67

Şekil 4.14. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu) 67

Şekil 4.15. 200 elemanlı düzlem kafes yapı 69

Şekil 4.16. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarımında eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri 73

Şekil 4.17. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi 74

Şekil 4.18. 942 elemanlı kule kafes yapının X-Z ve X-Y kesiti 76

Şekil 4.19. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının optimum tasarımında eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri 80

Şekil 4.20. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapıda optimum tasarıma ait en üst dört düğüm noktasının deplasman değerleri 81

Şekil 4.21. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kafes kulenin optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi 82

Şekil 4.22. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapıda optimum tasarıma ait (a) Eleman gerilme değerleri (b) Düğüm deplasman değerleri 87

Şekil 4.23. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu) 88

Şekil 4.24. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu) 89

Şekil 4.25. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait a) Eleman gerilme değerleri b) Düğüm deplasman değerleri 95

Şekil 4.26. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait a) Eleman gerilme değerleri b) Düğüm deplasman değerleri 96

Şekil 4.27. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının III. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait a) Eleman gerilme değerleri b) Düğüm deplasman değerleri 97

Şekil 4.28. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu) 98

Şekil 4.29. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu) 99

Şekil 4.30. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (III. optimizasyon durumu) 99

Şekil 4.31. 47 elemanlı enerji nakil hattı kafes yapısı 101

Şekil 4.32. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri 104

Şekil 4.33. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapıda optimum tasarıma ait Euler burkulma gerilmeleri 105

Şekil 4.34. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi 105

Şekil 4.35. 52 elemanlı düzlem kafes yapı 107

Şekil 4.36. 52 elemanlı ayrık değişkenli düzlem kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri 110

Şekil 4.37. 52 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi 111

Şekil 4.38. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapıda eleman gerilme değerleri (I. optimizasyon durumu) 116

Şekil 4.39. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapıda eleman gerilme değerleri (II. optimizasyon durumu) 117

Şekil 4.40. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait düğüm deplasman değerleri a) *x* doğrultusu b) *y* doğrultusu c) *z* doğrultusu 118

Şekil 4.41. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait düğüm deplasman değerleri a) *x* doğrultusu b) *y* doğrultusu c) *z* doğrultusu 120

Şekil 4.42 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu) 121

Şekil 4.43. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu) 121

Şekil 4.44. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapıda optimum tasarım için eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri 124

Şekil 4.45. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi 125

KISALTMA VE SİMGELER

ABC : Yapay arı koloni

ACO : Karınca koloni optimizasyonu

aeDE : Adaptif elit diferansiyel evrim

AFA : Modifiye edilmiş ateşböceği algoritması

AISC : American Institute of Steel Construction

CA : Kültür algoritması

CBO : Çarpışan cisimler optimizasyonu

DHPSACO : Ayrık değişkenli sezgisel parçacık sürü-karınca koloni optimizasyonu

ESASS : Elit adaptif basamaklı arama

FA : Ateşböceği algoritması

FPA : Çiçek tozlaşma algoritması

GA : Genetik algoritma

IHS : Gelişmiş armoni arama

IMBA : Gelişmiş mayın patlatma algoritması

HBB-BC : Hibrit büyük patlama-büyük çöküş

HHS : Hibrit armoni arama

HSPACO : Hibrit parçacık sürü- arı koloni optimizasyonu

HPSO : Sezgisel parçacık sürü optimizasyonu

HPSSO : Hibrit parçacık sürü –kırlangıç sürü optimizasyonu

HS : Armoni arama

JA : Jaya algoritması

MBA : Mayın patlatma algoritması

MSPSO : Çok aşamalı parçacık sürü optimizasyonu

PSO : Parçacık sürü optimizasyonu

SAHS : Adaptif armoni arama

SSAS : Adaptif basamaklı arama

SSO : Kırlangıç sürü optimizasyonu

TLBO : Öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon

WEO : Su buharlaşma optimizasyonu

WCA : Su döngüsü algoritması

$\emptyset_j(x)$: Eşitsizlik sınırlayıcıları

$\varphi_k(x)$: Eşitlik sınırlayıcıları

X_i^k : Parçacık konumu

V_i^k : Parçacık hızı

r : 0 ile 1 aralığında rastgele üretilen reel sayı

σ : Gerilme

E : Elastisite modülü

ε : Birim deformasyon

$F:$: Düğüm noktası yük vektörü

$d:$: Düğüm noktası deplasman vektörü

$f:$: Eleman yük vektörü

u : Yatay deplasman

v : Düşey deplasman

ϕ : Elemanın eksenle yaptığı açı

L : Eleman uzunluğu

ΔL : Elemanın birim uzama miktarı

T : Transformasyon (dönüşüm) matrisi

F_{gl} : Global kuvvet vektörü

F_{lk} : Lokal kuvvet vektörü

Δ_{gl} : Global deplasman vektörü

Δ_{lk} : Lokal deplasman vektörü

k_{gl} : Eleman global rijitlik matrisi

k_{lk} : Eleman lokal rijitlik matrisi

K : Sistem rijitlik matrisi

$W(A)$: Amaç (ağırlık) fonksiyonu

$g_i(A)$: *i'nci* eleman gerilmesi için ceza değeri

$d_j(A)$: *j'inci* düğüm deplasmanı için ceza değeri

$\psi(A)$: Toplam ceza değeri

$f_p(A)$: Cezalandırılmış amaç fonksiyonu

γ : Malzeme özgül ağırlığı

S_1, S_2 : Ayrık ve sürekli tasarım değişkenleri için tasarım uzayı

$A_{k,l,it}$: *it*'inci iterasyonda *l*' inci tasarımın *k*'ıncı tasarım değişkeni (enkesit alanı)

$A_{k,best,it}$: *it*'inci iterasyonda popülasyondaki en iyi tasarımın *k*'ıncı tasarım değişkeni

$A_{k,worst,it}$: *it'*inci iterasyonda popülasyondaki en kötü tasarımın *k'*ıncı tasarım değişkeni

$r_{1,k,it}$, $r_{2,k,it}$: *it'* inci iterasyondaki *k'*ıncı tasarım için [0,1] aralığında rastgele üretilen reel sayılar

$A_{k,l,it}^{new}$: $A_{k,l,it}$ tasarım değişkeni yerine üretilen yeni tasarım değişkeni

np : Popülasyon sayısı

ng : Eleman grup sayısı

it : İterasyon sayısı

id : Tasarım değişkeni sayısı

it_{max} : Maksimum iterasyon sayısı

$f_p^{best}(A)$: Minimum değerli cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri

$f_p^{worst}(A)$: Maksimum değerli cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri

$f_p^{new}(A)$: Yeni üretilen kafes yapı tasarımı için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde tasarımı yapılan her yapının maksimum emniyette olması buna karşın maliyetinin olabildiğince minimum düzeyde kalması arzu edilen bir durumdur. Yapı emniyeti, yapının dış yükler altındaki davranışının ilgili yönetmelikçe belirlenen sınırlar içerisinde olması ile sağlanmaktadır. Maliyet ise yapının emniyet şartlarını ihmal etmeden en ekonomik şekilde tasarlanması durumuyla ilgilidir. Bir yapının öncelikle kullanım amacı, yapı türü, konumu gibi özelliklerine göre projelendirmesi yapılır. Söz konusu projenin deplasman, gerilme, burkulma, titreşim vb. statik ve dinamik koşullarını sağlaması gerekir. Projelendirme yapılırken eleman enkesitlerinin küçültülmesi ya da kullanılan malzemenin azaltılması maliyetini düşüren etkenlerin başında gelir. Yapı emniyet koşullarını sağlayan tasarımlar arasında minimum maliyetli olan tasarım optimum tasarım olarak adlandırılır.

Optimizasyon; mühendislik tasarımlarından finans piyasalarına, günlük aktivitelerin planlanmasından bilgisayar bilimlerine ve endüstriyel uygulamalara, hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Örneğin; bir şirket kâr payını ve hizmet kalitesini en üst düzeyde buna karşın masraflarını en alt seviyede tutmak ister veya en basit tatil planı yapıldığında bile, tatilin olabildiğince ekonomik fakat aynı zamanda olabildiğince eğlenceli olması istenir. Dolayısıyla karşılaşılan her problemde en uygun çözümün elde edilmesi için sürekli araştırma yapılmaktadır (Yang 2010).

Mühendislik, ekonomi ve iş dünyasındaki bir çok optimizasyon probleminin çözümü karmaşık ve zordur. Bu problemlerin makul bir süre içinde ve kesin olarak çözümü her zaman mümkün değildir. Bu tip problemlerin çözümünde son yıllarda sezgisel optimizasyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer tüm optimizasyon yöntemleri gibi sezgisel optimizasyon yöntemleri de verilen optimizasyon problemini olabildiğince kısa sürede ve etkili bir şekilde çözmeyi amaçlamaktadır. Son 30 yılda, tüm fen ve mühendislik bilimlerindeki optimizasyon problemlerin çözümü için çok sayıda sezgisel optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Sezgisel yöntemler karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için doğadaki olayları taklit etmektedir. Örneğin; genetik algoritmalar doğadaki güçlü bireylerin hayatta kalması, zayıf bireylerin elimine olmasını taklit etmektedir. Arı koloni optimizasyon yönteminde, arı kolonilerinin besin kaynağı bulmak için kullandıkları stratejileri ile optimizasyon problemlerinin çözümü

arasında benzerlik kurulmaktadır. Armoni arama yönteminde, müzisyenlerin en iyi armoniyi elde etmek için uyguladıkları adımlar taklit edilmektedir. Benzer şekilde diğer sezgisel optimizasyon yöntemleri de belli bir doğal olayı veya süreç ile ilgili optimizasyon probleminin çözümü arasında benzerlik kurmaktadır.

Bu çalışmada, sürekli ve ayrık tasarım değişkenli düzlem ve uzay kafes yapıların Jaya algoritması kullanılarak deplasman, gerilme ve burkulma sınırlayıcıları altında minimum ağırlıklı olarak tasarımı amaçlanmıştır. Kafes yapıların statik analizi OPENSEES v2.5.0 yazılımına yaptırılmış, MATLAB'da ayrıca bir kodlama yapılmamıştır. Analiz sonuçlarının optimizasyonu için hazırlanan program, MATLAB programlama dilinde, OPENSEES v2.5.0 yazılımı ile etkileşimli çalışacak şekilde kodlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sürekli ve ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu konusunda daha önce farklı sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar ile Jaya algoritması kullanılarak farklı alanlarda yapılan bazı çalışmalar bu bölümde incelenmiştir.

2.1. Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Optimizasyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar

Sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu konusunda literatürde çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bu konuda son 10 yıllık periyotta yapılmış en etkili ve başarılı makaleler aşağıda sıralanmıştır:

Kaveh ve Talatahari (2009a), sürekli tasarım değişkenli kafes yapılar için hibrit büyük patlama-büyük çöküş (HBB-BC) algoritmasını geliştirmiştir. Bu algoritmada, büyük patlama-büyük çöküş algoritması (BB-BC) ile parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) birleştirilmiştir. HBB-BC ile BB-BC algoritmasının geniş araştırma uzayını araması özelliğiyle PSO'nun en uygun çözümü daha iyi bulması avantajlarını birleştirerek her iki yöntemden daha kuvvetli hibrit bir yöntem elde edilmiştir. HBB-BC ile optimize edilen kafes yapılar, bu algoritmanın diğer yöntemlere kıyasla daha hafif tasarımlar bulabildiğini göstermiştir.

Kaveh ve Talatahari (2009b) tarafından geliştirilen hibrit parçacık sürü –karınca koloni algoritması (HPSACO), sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonunda kullanılmıştır. HPSACO, parçacık sürü optimizasyonu PSO, karınca koloni optimizasyonu (ACO) ve armoni arama (HS) yöntemlerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yöntemde parçacık sürü optimizasyonu, global optimizasyon işleminde; karınca koloni yaklaşımı, uygulanabilir çözüm alanına ulaşma amaçlı parçacıkların yerini güncellemede, armoni arama ise probleme özgü değişken sınırlayıcıları için kullanılmaktadır. HPSACO ile elde edilen sonuçlar, bu yöntemin diğer parçacık sürüsü esaslı yöntemlere göre daha hızlı olduğunu göstermiştir.

Sonmez (2011a), sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların boyut optimizasyonu için yapay arı kolonisi algoritmasını (ABC) kullanmıştır. ABC yöntemi, bal arılarının nektar arama davranışlarından ilham alarak oluşturulmuş sürü zekasını taklit eden bir

optimizasyon tekniğidir. ABC yönteminin kafes yapıların optimizasyonundaki gücünü görmek için en büyüğü 200 elemanlı olan beş farklı kafes yapı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, diğer optimizasyon yöntemleriyle kıyaslanmıştır. ABC'nin yapısal optimizasyon için güçlü bir teknik olduğu buna karşın optimum tasarımı bulma hızının oldukça yavaş olduğu tespit edilmiştir.

Degertekin (2012), klasik armoni arama yönteminin (HS) hızını ve etkinliğini arttırmak için gelişmiş armoni arama (IHS) ve adaptif armoni arama (SAHS) yöntemlerini sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu için önermiştir. Çalışma kapsamında dört klasik kafes yapı optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen iki yöntemin diğer yöntemlere kıyasla daha kısa zamanda daha hafif tasarımlar elde edebildiğini göstermiştir.

Rao ve ark. (2011) tarafından geliştirilen öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon (TLBO) yöntemi, bir öğretmenin öğrenciler üzerindeki etkisinin ve öğrencilerin birbirleriyle olan etkileşiminin taklit edilmesini esas almaktadır. Degerekin ve Hayalioglu (2013) tarafından TLBO yöntemi kullanılarak sürekli tasarım değişkenleriyle dört farklı kafes yapının optimizasyonu yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, bazı durumlarda diğer yöntemlere kıyasla daha ağır tasarımlar bulunmasına rağmen, çoğu durumda hızlı olduğu, güçlü bir performansa sahip olduğu ve ağırlık olarak daha hafif tasarımlar elde edebildiği belirlenmiştir.

Talatahari ve ark. (2013) tarafından kafes yapıların optimizasyonunda, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemine algoritmanın verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmak için yeni mekanizma eklenerek çok aşamalı parçacık sürü optimizasyonu (MSPSO) geliştirilmiştir. MSPSO yöntemine göre farklı kafes yapıların optimizasyonu yapılarak sonuçlar irdelenmiş ve standart parçacık sürü optimizasyonu yöntemine göre daha güçlü yakınsama ve daha hafif tasarımların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Kaveh ve ark. (2014), kırlangıç sürü optimizasyonu (SSO) ile parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemlerini bir araya getirerek hibrit parçacık-kırlangıç sürü optimizasyonu (HPSSO) yöntemini geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem, sürekli tasarım değişkenli altı farklı kafes yapıda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, HPSSO'nun diğer parçacık sürü algoritmalarından daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Jalili ve Hosseinzadeh (2015), sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu için insanların sosyal evriminden ve sahip olduğu inançlarla olan etkileşiminden esinlenerek elde edilen kültür algoritması (CA) yöntemini kullanmışlardır. Literatürdeki dört farklı kafes yapının CA ile optimize edilmesiyle elde edilen sonuçlar, CA'nın diğer yönteme kıyasla daha az analiz sayısında daha hafif tasarımlar elde ettiği tespit edilmiştir.

Bekdaş ve ark. (2015) tarafından düzlem ve uzay kafes yapıların sürekli tasarım değişkenleriyle optimizasyonunda kullanılan çiçek tozlaşma algoritması (FPA), çiçekli bitkilerin çapraz tozlaşması ve kendiliğinden tozlaşmasını taklit eden bir optimizasyon yöntemidir. FPA, üç farklı kafes yapının optimizasyonunda denenmiş ve bu yöntemin diğer optimizasyon yöntemlerine göre yaklaşık olarak aynı veya daha hafif sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Kaveh ve Bakhshpoori (2016), farklı ıslanabilirlikteki katı yüzeylere yapışmış su moleküllerinin buharlaşmasından esinlenen su buharlaşma optimizasyonunu (WEO) geliştirmiş ve sürekli tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonunda kullanmışlardır. Bu yöntemin gücü altı farklı kafes yapının optimum tasarımında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, WEO'nun diğer yöntemlerle yaklaşık olarak aynı tasarımlar elde etmesine karşın optimum çözümü hızlı bir şekilde elde etme gücünün düşük olduğunu göstermiştir.

2.2. Ayrık Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Optimizasyonu Konusunda Yapılan Çalışmalar

Ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu konusunda son yıllarda yapılmış en etkili çalışmalar aşağıda kronolojik biçimde özetlenmiştir:

Lee ve ark. (2005), armoni arama algoritmasını (HS) ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu için önermişlerdir. HS, bir müzisyenin en iyi armoniyi ararken ortaya çıkan doğal müzik performansı süreçlerini taklit etmektedir. 25, 47, 52 ve 72 elemanlı olmak üzere dört farklı kafes yapı HS algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Bu tasarım örnekleri, HS'nin güçlü bir optimizasyon yöntemi olduğunu ve genetik algoritma esaslı yöntemleri kullanılarak elde edilen tasarımlardan daha hafif sonuçlar elde edebildiğini göstermiştir.

Li ve ark. (2009), ayrık tasarım değişkenli kafes yapılar için sezgisel parçacık sürüsü optimizasyonu (HPSO) yöntemi geliştirmiştir. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), sürülerin sosyal davranışlarını taklit etmektedir. HPSO, standart parçacık sürü optimizasyonu ile armoni arama algoritmasının bir araya getirilmesiyle geliştirilmiştir. Bu nedenle HPSO, her iki yöntemin de avantajlarının kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar, HPSO'nun PSO'ya göre daha hafif tasarımlar üretebildiğini göstermiştir.

Kaveh ve Talatahari (2009c), ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu için parçacık sürüsü, karınca kolonisi ve armoni arama optimizasyon yöntemlerini birleştirerek ayrık tasarım değişkenli sezgisel parçacık sürüsü karınca kolonisi optimizasyonu (DHPSACO) yöntemini elde etmişlerdir. Bu yöntemin gücü dört farklı kafes yapı üzerinde teyit edilmiştir.

Sonmez (2011b), yapay arı kolonisi algoritmasını (ABC) kafes yapıların ayrık tasarım değişkenli optimum tasarımında kullanmıştır. ABC algoritması, arıların nektar toplama sürecinden esinlenmektedir. ABC yönteminin verimliliği dört farklı kafes yapı üzerinde test edilmiştir. Test sonuçları, ABC'nin genetik algoritma (GA) , armoni arama (HS) ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) yöntemleri kadar güçlü olduğunu buna karşın çok daha fazla yapısal analiz sayısında optimum değeri bulduğu belirlenmiştir.

Sadollah ve ark. (2012), ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu için mayın patlatma algoritması (MBA) adlı bir optimizasyon yöntemi ortaya koymuştur. MBA, mayın bombalarının patlatılması için gerekli işlemlerle optimizasyon problemleri arasında benzerlik kurmaktadır. Bu algoritmayla optimize edilen kafes yapılardan elde edilen sonuçlar, MBA'nın diğer algoritmalara göre daha hafif tasarımlar bulabildiğini göstermektedir.

Kaveh ve Mahdavi (2014), ayrık tasarım değişkenli kafes yapılar için çarpışan cisimler optimizasyonu (CBO) olarak adlandırılan sezgisel bir algoritma ileri sürmüştür. CBO, cisimlerin çarpışma yasalarından esinlenmektedir. CBO'da fizik yasaları, yeni tasarımın elde edilme esaslarını belirler ve her etmen veya olası çözüm, çarpışan bir cisim olarak değerlendirilir. Tasarım sonuçları CBO'nun GA, HS, HPSO ve DHPSACO ile yaklaşık aynı sonuçları verdiğini göstermiştir.

Adaptif basamaklı arama (SASS) algoritması Nolle (2006) tarafından ileri sürülmüştür. Bu algoritma, adaptif bir arama stratejisi kullanmaktadır. Standart SASS algoritması yapısal optimizasyon problemlerinde daha iyi sonuçlar elde etmek için Azad ve Hasançebi (2014) tarafından modifiye edilerek elit adaptif basamaklı arama algoritması (ESASS) önerilmiştir. ESASS'ın GA ve ABC gibi diğer optimizasyon yöntemlerinden daha hafif tasarımlar elde ettiği gözlemlenmiştir.

Dede (2014), kafes yapıların ayrık optimizasyonu için öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon algoritmasını (TLBO) kullanmıştır. İlk olarak Rao ve ark. (2011) tarafından geliştirilen TLBO, bir öğretmenin öğrenciler üzerindeki etkisini ve öğrencilerin birbirleriyle etkileşimini taklit etmektedir. 10, 15, 25, 52 ve 72 elemanlı olmak üzere beş farklı kafes yapı, TLBO algoritması ile optimize edilerek sonuçlar diğer sezgisel optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

Yang (2010) tarafından geliştirilen ateşböceği algoritması (FA), ateş böceklerinin davranışlarını taklit etmektedir. FA'nın, optimum tasarımı elde etmek için çok sayıda yapısal analiz gerektirdiği ve tasarım değişkeni arttıkça optimum tasarımı bulmadaki gücünün azaldığı belirlenmiştir. Bu olumsuzların giderilmesi amacıyla, Baghlani ve ark. (2014) tarafından ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların optimizasyonu için ivmelendirilmiş ateş böceği algoritması geliştirilmiştir. Literatürde hazır olan bazı kafes yapılar optimize edilerek AFA'nın optimum çözüm bulmada standart ateşböceği algoritmasına (FA) kıyasla daha hızlı ve güçlü olduğu kanıtlanmıştır.

Sadollah ve ark. (2015), ayrık tasarım değişkenli kafes yapıların boyut optimizasyonu için su döngüsü (WCA), mayın patlatma algoritması (MBA) ve gelişmiş mayın patlatma algoritmasını (IMBA) öne sürmüştür. MBA, mayınların patlatılmasının taklit edilmesiyle elde edilen bir yöntemdir. WCA su döngüsü sürecini taklit etmektedir. Ayrıca gelişmiş mayın patlatma algoritması adı verilen yöntem de bu çalışmada sunulmuştur. Bu yöntemlerin gücü, literatürdeki ayrık tasarım değişkenli kafes yapılar kullanılarak doğrulanmıştır. Önerilen yöntemlerin diğer yöntemlere göre oldukça iyi sonuçlar üretebildikleri gözlemlenmiştir.

Hibrit armoni algoritması (HHS), Cheng ve ark. (2016) tarafından kafes yapıların boyut optimizasyonu için kullanılmıştır. HHS, armoni hafızası gibi HS'nin

bazı özelliklerini korumasına karşın HS'deki rastgele seçim fonksiyonunu PSO'nun arama işlemiyle değiştirmiştir. HHS'nin performansının değerlendirilmesi için altı farklı kafes yapı optimize edilmiş ve sonuçlara bakıldığında bu yöntemin kıyaslanan diğer yöntemlere göre daha etkili olduğu doğrulanmıştır.

Huu ve ark. (2016), ayrık tasarım değişkenleri ile kafes yapıların optimizasyonu için adaptif elit diferansiyel evrim algoritmasını (aeDE) geliştirmiştir. aeDE, global ve lokal arama kabiliyeti arasındaki dengeyi korumak ve yakınsama oranını yükseltmek için standart evrim algoritmasında (DE) bazı değişiklikler yapılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemin güvenilirliğini belirlemek için altı farklı kafes yapı kullanılmış, analiz sonuçlarında aeDE'nin DE ve literatürdeki diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar ürettiği belirlenmiştir.

2.3. Jaya Algoritması Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Jaya algoritması (JA) ilk olarak Rao (2016) tarafından sınırlayıcılı ve sınırlayıcısız matematiksel optimizasyon problemleri için öne sürülmüştür. JA'nın etkinliği, literatürdeki hazır problemler kullanılarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonunda; JA'nın, sınırlayıcılı ve sınırlayıcısız optimizasyon problemleri için kabul edilebilir bir performans gösterdiği saptanmıştır.

JA, Rao ve ark. (2016) tarafından bir mikro kanal ısı emicisinin boyut optimizasyonu için kullanılmıştır. Termal direnç ve pompalama gücü, amaç fonksiyonu olarak kabul edilirken mikro kanal genişliği, derinlik ve kanat genişliği örnek çalışmanın tasarım değişkenleri olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonuçları, JA'nın performansının en az TLBO ve evrimsel algoritma sonuçları kadar iyi olduğunu göstermiştir.

Rao ve Waghmare (2017), fren sistemi, hidrostatik itme rulmanı gibi sınırlayıcılı mekanik tasarım problemleri için Jaya algoritmasını öne sürmüştür. Jaya algoritmasından elde edilen sonuçların, ABC, TLBO ve diğer sezgisel algoritmaların sonuçlarına göre daha uygun olduğu ispatlanmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Optimizasyon Nedir?

Mühendislik, insan hayatının daha konforlu, güvenli ve kolay olması için gerekli araştırma ve geliştirme çalışmalarını yapan bir meslek alanıdır. Her mühendislik dalı, kendisiyle ilişkili problemlere çözüm bulmak için çok farklı tasarımlar yapmaktadır. Örneğin; makine mühendisliğinde, daha ekonomik bir motor veya daha konforlu araç süspansiyonu konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Elektrik-elektronik mühendisliğinde, daha gelişmiş entegre devre tasarımı amaçlanmaktadır. İnşaat mühendisliğinde içme suyu, atık su arıtma ve kanalizasyon gibi alt yapı projeleri ve bina, hastane, okul vb. üstyapı projeleri yapılmaktadır. Bu tasarımlar yapılırken temel hedef, belirlenen amaca en uygun hizmet edilmesini sağlamaktır. Burada en uygun tasarımın elde edilmesi amacıyla yapılan araştırma faaliyetleri optimizasyon olarak tanımlanır.

Optimum tasarım, mühendisin tecrübesine, muhakeme gücüne, modelleme yeteneğine bağlı olarak elde edilmektedir ancak optimum tasarım probleminde birbirine zıt amaçlar veya çok sayıda sınırlayıcı ve tasarım değişkeni mevcutsa tecrübe, muhakeme gücü ve modelleme yeteneği optimizasyon problemini çözmede yetersiz kalacaktır. Böyle durumlarda optimum tasarımın bulunması için optimizasyon yöntemlerinin kullanılması daha uygun olacaktır. Böylece bilgisayarlar kullanılarak elle yapılan işlemlere kıyasla binlerce kat daha fazla tasarım kombinasyonunun yapılabilmesine ve bunların daha hızlı değerlendirilmesine olanak sağlanacaktır. Ayrıca oldukça güçlü programlama dillerinin mevcut olması daha etkili ve karmaşık optimizasyon yöntemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Optimum tasarım probleminde hesaplanabilir sayısal bir modelin olması zorunludur. Örneğin, herhangi bir tasarımda maliyet minimize edilmek isteniyorsa öncelikle maliyetin hesaplanabilmesi gerekmektedir. Kısaca, optimum tasarım probleminde doğru bir sayısal modelin tanımlanması ilk ve en önemli adımdır.

Sayısal modelin tanımlanmasından sonra, mühendisin tasarımla ilgili değişkenleri belirlemesi gerekir. Bu değişkenler tasarım değişkeni olarak adlandırılır. Örneğin kafes yapılarda tasarım değişkenleri, eleman enkesitleri veya uzunlukları açıklık mesafeleri veya malzeme özellikleri olabilir.

Tasarım değişkenlerinin serbestçe değiştirilebildiği alana tasarım uzayı denmektedir. Tasarım uzayı, değişken sayısı arttıkça genişleyecektir.

Sayısal model ve tasarım değişkenlerinin belirlenmesinden sonra optimum tasarımı yapılacak problemde amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların tanımlanması gerekir. Amaç fonksiyonları maksimize ya da minimize etmek istediğimiz hedefleri ifade etmektedir. Sınırlayıcılar ise problemin çözümünde aşılmaması gereken alt veya üst sınırlardır (Parkinson ve ark. 2013).

3.1.1. Optimizasyonda Temel Kavramlar

Optimizasyon konusunda kullanılan temel kavramlar şu şekilde sıralanabilir:

3.1.1.1. Tasarım Değişkenleri

Amaç fonksiyonunun hesaplanması için birbirinden bağımsız olarak seçilebilen değişkenler, tasarım değişkeni olarak adlandırılır. Yapı sistemlerinde tasarım değişkenleri eleman enkesitleri, düğüm noktası koordinatları, eleman uzunlukları veya açıklık mesafeleri, açıklık sayısı, düğüm noktası sayısı veya eleman sayısı olarak alınabilir.

Tasarım değişkenleri sürekli ve ayrık değişkenler olmak üzere iki gruba ayrılır. Sürekli tasarım değişkenleri belirli bir aralıkta her değeri alabilen buna karşın ayrık tasarım değişkenleri önceden belirlenmiş belli değerleri alabilen değişkenlerdir. Yapı sistemlerinde özellikle de çelik yapı sistemlerinde eleman enkesitleri, fabrikalarda üretilen hazır çelik profiller arasından seçilir. Dolayısıyla uygulamalarda ayrık tasarım değişkenli optimum tasarım daha gerçekçi bir durumdur.

3.1.1.2. Sınırlayıcılar

Optimum tasarımın sağlaması gereken minimum ve maksimum değerlerdir. Bu değerler eşitlik veya eşitsizlik olmak üzere iki grupta incelenir.

- **Davranış Sınırlayıcıları**

Bunlar; taşıyıcı eleman gerilmesi, düğüm noktası deplasmanı, basınç elemanı burkulma gerilmesi gibi yapı davranışıyla ilgili değerler olabilir.

- **İmalat Sınırlayıcıları**

Yapının imalatı ve estetiğiyle ilgili sınırlamalardır. Bunlar; maksimum ve minimum plak kalınlığı, maksimum çatı eğimi gibi yapının işlevselliğiyle ilgili koşullar olabilir.

Sınırlayıcılar, matematiksel olarak şu şekilde gösterilir:

Eşitsizlik sınırlayıcıları; $\emptyset_j(x) \leq 0 \quad j$ =1,2 …..,n (3.1)

Eşitlik sınırlayıcıları; $\varphi_k(x) = 0 \quad k$ =1,2 …..,m (3.2)

Bu denklemlerde x tasarım değişkenini, n ve m değerleri sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik sınırlayıcı sayısını göstermektedir.

3.1.1.3. Tasarım Uzayı

Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan tasarım değişkenlerinin tanımlı olduğu uzaya tasarım uzayı denir. Tasarım uzayının boyutu, tasarım değişkeni sayısına bağlıdır. Tasarım değişkeni sayısı arttıkça tasarım uzayı büyüyecektir.

3.1.1.4. Amaç Fonksiyonu

Tasarım uzayında tanımlı tasarım değişkenleri kullanılarak minimum veya maksimum değeri araştırılan fonksiyona amaç fonksiyonu denir. İnşaat mühendisliğinde amaç fonksiyonu; yapı ağırlığı veya yapı maliyeti olarak belirlenebilir ancak kolay hesaplanabilir olması sebebiyle amaç fonksiyonu olarak genellikle yapı ağırlığı seçilmektedir.

3.2. İnşaat Mühendisliğinde Optimizasyon

İnşaat mühendisliğinde herhangi bir yapının tasarımı dört adımda gerçekleşmektedir (Değertekin 2001).

1) Fonksiyonel ihtiyaçların belirlenmesi

2) Tasarımın yapılması

3) Optimizasyon

4) Kontrol ve detaylar

Fonksiyonel ihtiyaçlar, tasarlanan yapının talep edilen amaçlara uygun olmasını sağlayacak şekilde belirlenir. Tasarım adımında fonksiyonel ihtiyaçlara göre yapıda kullanılacak malzemelerin cinsi ve özellikleri, taşıyıcı elemanların ön boyutlandırması, eleman birleşim tipleri, yapı yüksekliği, açıklık mesafeleri tayin edilir. Optimizasyon adımında ise fonksiyonel ihtiyaçlara göre tasarlanan yapının, dış yükler (kar yükü, deprem yükü, ölü ve hareketli yükler vb.) altında analizi yapılarak eleman kesit tesirleri ve düğüm noktası deplasmanları bulunur. Bu değerlerin önceden belirlenen sınır değerleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Sınır değerlerin aşılması durumunda optimize edilmesi istenen tasarım değişkenleri değiştirilir. Tasarım değişkenleri, kafes yapılar için enkesit boyutları veya yapı geometrisi olabilir. Tasarım değişkenlerinin değiştirilmesiyle çok sayıda farklı tasarım üretilir. Bu tasarımlar arasında sınırlayıcıları sağlayan en düşük maliyetli tasarım optimum tasarım olarak belirlenir. Son adımda, bulunan optimum tasarım için gerekli kontroller yapılır ve detaylar irdelenir.

Optimizasyon, daha önceden belirtildiği gibi amaç fonksiyonunun sınırlayıcılara uygun olarak maksimum veya minimum değerinin bulunması işlemidir. İnşaat mühendisliğinde amaç fonksiyonu yapının ağırlığı, sınırlayıcılar ise eleman gerilmesi ve düğüm noktası deplasmanları için verilen minimum ve maksimum değerler olabilir.

3.3. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri, en genel biçimde klasik ve sezgisel optimizasyon yöntemleri olarak iki grupta incelenebilir. Bu tez çalışmasında klasik optimizasyon yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen sezgisel optimizasyon yöntemlerinden bahsedilecektir.

Sezgisel optimizasyon yöntemleri, doğal olaylar ile optimizasyon problemleri arasında analoji kurarak problemi çözmeyi amaçlayan yöntemlerdir. Genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu, karınca koloni optimizasyonu, armoni arama, öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon başlıca sezgisel optimizasyon yöntemleri olarak sayılabilir.

Genetik algoritmalar, ilk olarak Holland (1975) tarafından doğal en sağlıklı (uygun) bireyin hayatta kalma esasını optimizasyon problemine uygulamaktadır.

Parçacık sürü optimizasyonu, Kennedy ve ark. (2001) tarafından balık, kuş ve böcek sürüsü gibi hayvanların sürü davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Bu yöntemde amaç fonksiyonu, arama uzayında rastgele oluşturulmuş çok sayıda parçacık içermektedir. Bu parçacıklara "sürü" adı verilir. Sürüdeki her bir parçacık, optimizasyon probleminin olası çözümünü temsil eder.

Karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), ilk kez Dorigo (1992) tarafından karınca kolonilerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Karıncalar, davranış olarak, bireysellikten çok koloninin bir bütün olarak hayatta kalmasına yönelik hareket eden canlılardır. Karınca kolonilerin yiyecek arama davranışları ve özellikle yiyecek kaynakları ile yuvaları arasındaki en kısa yolu bulma yöntemleri oldukça dikkat çekicidir. Karıncalar yuvadan yiyecek kaynaklarına doğru giderken feromon adı verilen bir salgı bırakmaktadır. Yiyecek kaynağının daha fazla olduğu yola doğru bırakılan feromon daha yoğun olduğundan daha fazla sayıda karıncanın yoğun yiyecek kaynağına yönelmesi sağlanır. ACO, bu davranışın matematik modelini kurarak optimizasyon problemini çözmeyi amaçlamaktadır.

Armoni arama (HS), ilk olarak Geem ve ark. (2001) tarafından bir müzisyenin en uygun armoniyi ararken sergilediği müzik performans sürecini taklit eden sezgisel bir optimizasyon yöntemidir.

Öğretme ve öğrenme esaslı optimizasyon algoritması (TLBO), optimizasyon problemleri için Rao ve ark. (2011) tarafından geliştirilmiş basit öğretme ve öğrenme sürecini taklit eden optimizasyon yöntemidir. Bu yöntemde öğretmenin öğrenciler üzerindeki etkisi ve öğrencilerin birbiriyle etkileşimi ile optimizasyon problemleri arasında bir analoji kurulur.

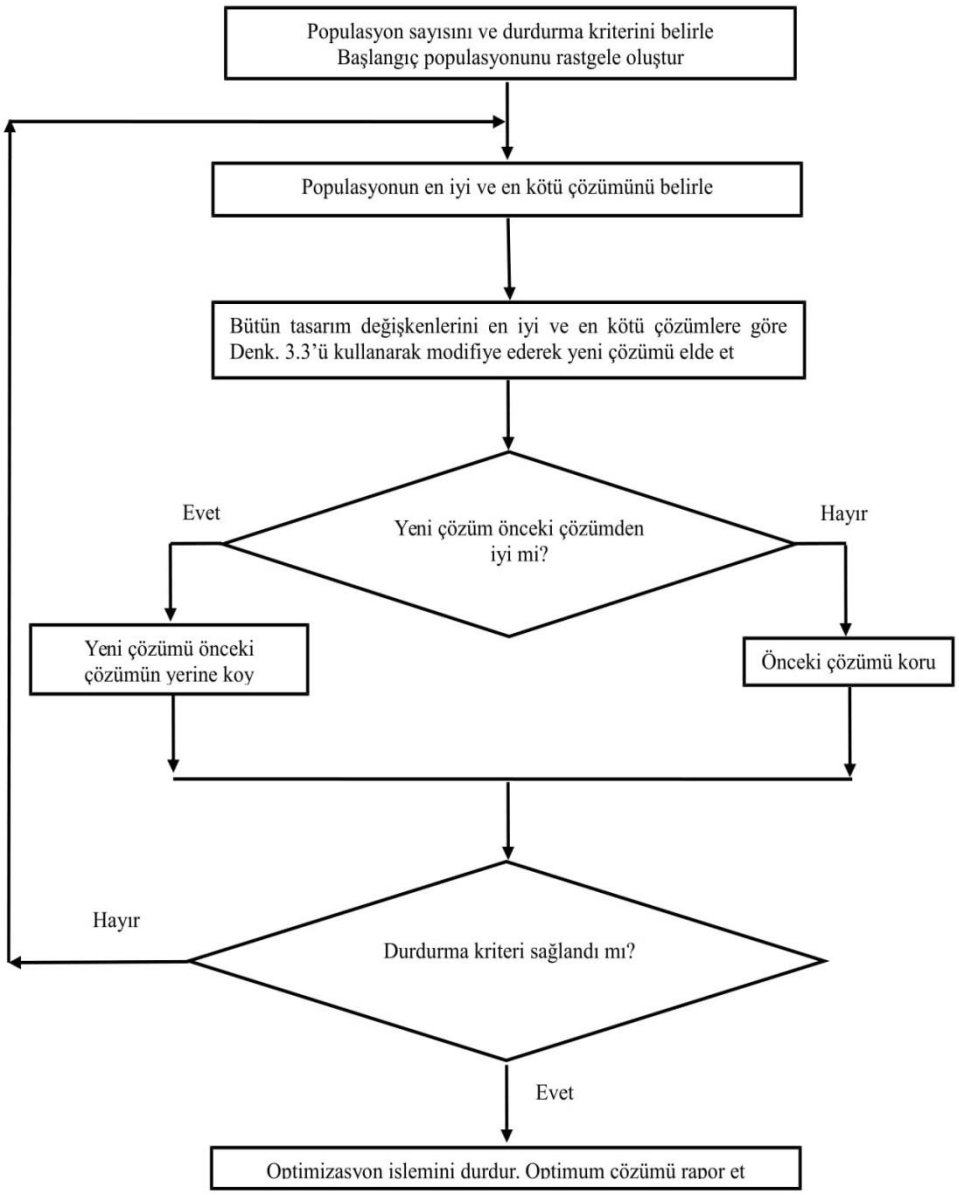
3.4. Jaya Algoritması (JA)

Jaya algoritması (JA) ilk olarak Rao (2016) tarafından ileri sürülmüştür. Jaya kelimesi Sanskrit dilinde "zafer" anlamına gelmektedir. JA, optimum tasarımın elde edilmesi sürecinde, her adımda en iyi çözüme mevcut olabildiğince yaklaşmaya ve en kötü çözümden mevcut olabildiğince uzaklaşmaya çalışmaktadır. JA'nın en önemli özelliği, diğer sezgisel optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak kendine özgü parametrelerin olmamasıdır. Yöntemde popülasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısı gibi genel kontrol parametreleri kullanılmaktadır.

Jaya algoritmasının uygulanışı oldukça pratik ve basittir. Tek bir denklemle tasarım değişkenleri modifiye edilmektedir. $A_{k,l,it}$: *it-inci* iterasyonda, *l-inci* tasarım için *k-ıncı* tasarım değişkenini temsil etmek üzere; bu tasarım değişkeni aşağıdaki gibi modifiye edilir.

$$A_{k,l,it}^{new} = A_{k,l,it} + r_{1,k,it}\left(A_{k,best,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right) - r_{2,k,it}\left(A_{k,worst,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right) \quad (3.3)$$

Bu denklemde $A_{k,l,it}^{new}$: $A_{k,l,it}$ tasarım değişkeninin modifiye edilmiş halini, $r_{1,k,it}$ ve $r_{2,k,it}$: *it-inci* iterasyonda ve *k-ıncı* tasarım değişkeni için [0,1] aralığında rastgele üretilen reel sayıları, $A_{k,best,it}$: *it-inci* iterasyondaki en iyi tasarımın *k-ıncı* tasarım değişkenini, $A_{k,worst,it}$: *it-inci* iterasyonda en kötü tasarımın *k-ıncı* tasarım değişkenini temsil etmektedir. $r_{1,k,it}\left(A_{k,best,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right)$ terimi, mevcut çözümün en iyi çözüme yaklaşma eğilimini , $-r_{2,k,it}\left(A_{k,worst,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right)$ terimi ise mevcut çözümün en kötü çözümden uzaklaşma eğilimini ifade etmektedir. Rastgele üretilen r_1 ve r_2 reel sayıları, tasarım uzayının daha etkili araştırılmasını sağlarken, ($|A_{k,l,it}|$) mutlak değeri, algoritmanın arama kabiliyetini daha da güçlendirmektedir (Rao 2016). Jaya algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Jaya algoritmasının akış diyagramı

3.5. Kafes Yapılar

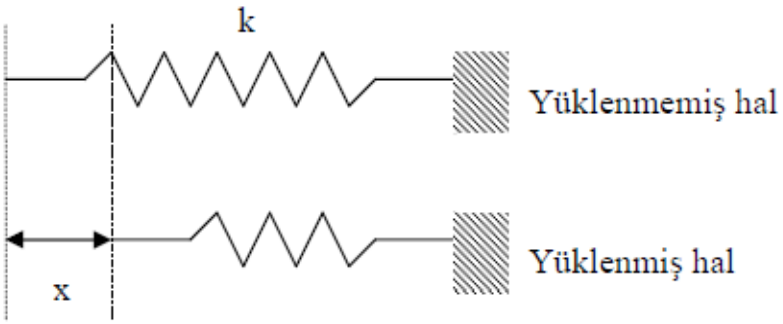
Kafes yapılar, sanayi yapıları, spor kompleksleri, köprüler, hava limanları, sergi ve konferans salonları, alışveriş merkezleri, elektrik nakil hatları, hangarlar vb. yapıların inşasında kullanılan, büyük açıklıkları geçmeyi ve geniş alanları örtmeyi mümkün kılan yapı sistemleridir.

Kafes yapılar, çubukların mafsallar aracılığıyla birbirine bağlandığı ve yüklerin sadece mafsal noktalarına etki ettiği kabul edilen taşıyıcı sistemlerdir. Mafsal noktaları aynı zamanda düğüm noktası olarak da adlandırılır. Kafes yapı elemanları, sadece eksenel kuvvet (normal kuvvet) etkisindedir. Eksenel kuvvet; basınç veya çekme kuvveti şeklindedir.

3.5.1. Düzlem Kafes Yapıların Statik Analizi

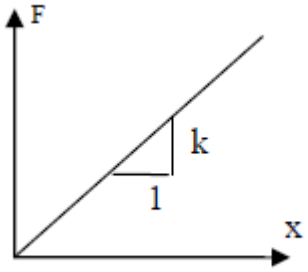
Kafes yapıların optimizasyonunun yapılabilmesi için düğüm noktası deplasmanlarının ve eleman gerilme değerlerinin sınırlayıcıları sağlayıp sağlamadığının kontrolünün yapılması gerekir. Düğüm deplasman ve eleman gerilme değerlerinin hesaplanabilmesi, kafes yapının statik analiziyle mümkündür. Yapıların statik analizi için virtüel iş, açı, kuvvet yöntemleri gibi klasik yöntemler dışında rijitlik yöntemi (stiffness method) olarak da adlandırılan matris deplasman yöntemi de kullanılmaktadır.

Bir yapı elemanında belirli yük altında meydana gelen iç kuvvetler ile elemanın yaptığı deplasman arasında bir ilişki vardır. Bu ilişkiyi gözlemleyebilmek için Şekil 3.2 de verilen basit bir yay modeli göz önüne alalım.



Şekil 3.2 Yay modeli

Bu elastik yay uygulanan *F* kuvveti ile yayda oluşan *x* deplasmanı arasındaki ilişki Şekil 3.3.'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.3. Elastik yay için yük-deplasman ilişkisi

Bu durumda yaya etkiyen kuvvet;

$$F = k..x \tag{3.4}$$

Hooke yasasından;

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{3.5}$$

denkleminde σ ve ε parametreleri;

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.6}$$

$$\varepsilon = \frac{x}{L} \tag{3.7}$$

şeklinde ifade edilerek (3.5) denkleminde yerine bırakılırsa

$F = \frac{E.A.x}{L}$ olarak elde edilir. Bu ifade denklem (3.4) ile eşitlenirse eleman rijitliği aşağıdaki gibi bulunur:

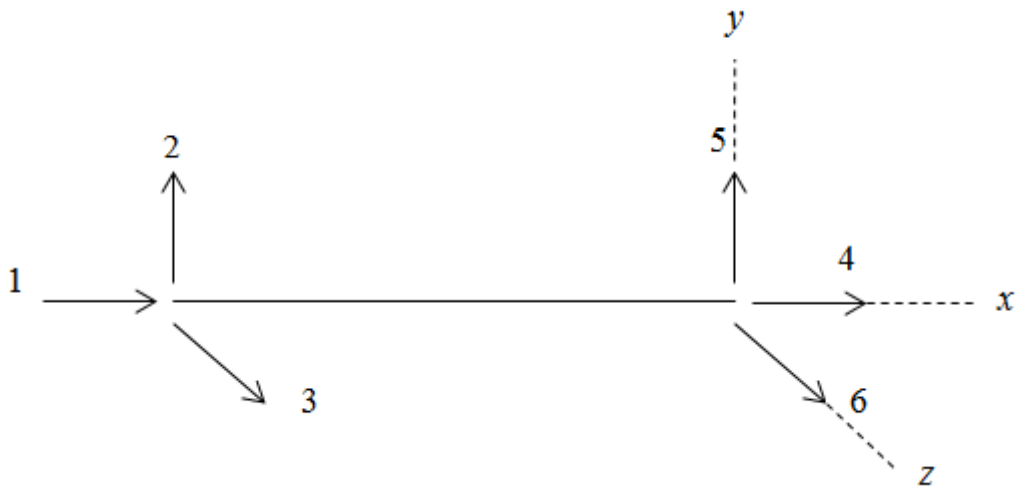
$$k = \frac{E.A}{L} \tag{3.8}$$

Yukarıdaki denklemlerde *F*: elemana etkiyen yükü, *x*: eksenel birim deformasyonu, *E*: elemanın elastisite modülünü, ε : birim deformasyonu, *A*: elemanın enkesit alanını, *L*: eleman uzunluğunu, *k:* elemanın rijitliğini göstermektedir.

Taşıyıcı elemanlar, dış yüklerin etkisiyle bağlandıkları düğüm noktalarının özelliklerine göre deplasman yapar. Elemanın deplasman yapabildiği doğrultuların toplam sayısına o elemanın serbestlik derecesi denir. Düzlem kafes yapılarda elemanlar birbirlerine mafsallı olarak bağlı oldukları için eleman uçlarında dönme meydana gelmez. Dolayısıyla sadece iki boyutta ötelenme olur. Uzay kafes elemanlarda da düğüm noktaları aynı şekilde mafsallı olduğundan üç boyutta ötelenme olacaktır. Düzlem kafes ve uzay kafes yapı elemanların serbestlik dereceleri ve işaret kabulü sırasıyla Şekil 3.4. ve 3.5'da gösterilmiştir.

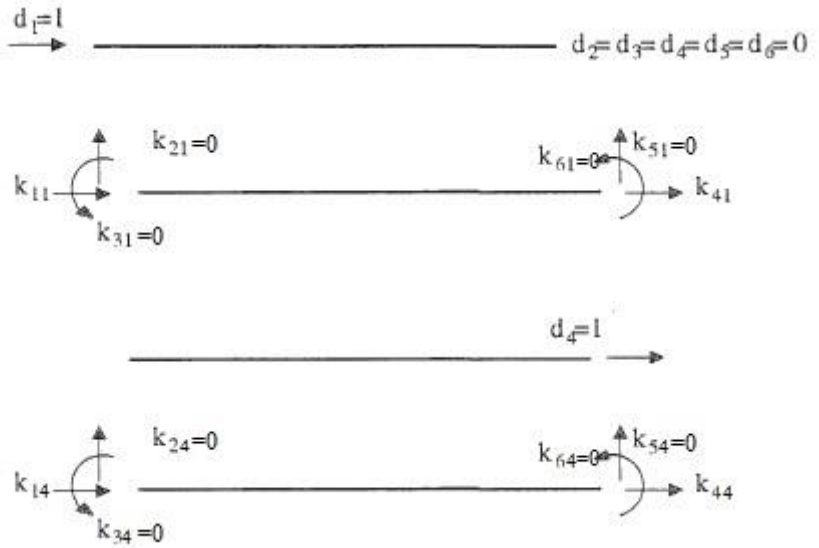


Şekil 3.4. Düzlem kafes elemanın serbestlik dereceleri



Şekil 3.5. Uzay kafes çubuk elemanın serbestlik dereceleri

Rijitlik (k) , bir yapının belirli bir doğrultuda birim deplasman yapması için uygulanması gereken kuvvet olarak tanımlanabilir. Kuvvetin etki ettiği doğrultunun serbestlik derecesi numarası i ile, birim deplasmanın meydana geldiği serbestlik derecesi numarası j ile gösterilmek üzere elemanın rijitlik katsayısı (k_{ij}); diğer tüm serbestlik dereceleri doğrultusundaki deplasmanlar sıfır olmak koşuluyla j serbestlik derecesinde birim deplasman oluşturmak için i serbestlik derecesine uygulanması gereken kuvvete eşittir. k_{ij} parametresini elde etmek için elemanın j doğrultusunda birim deplasman olduğu ve diğer doğrultulardaki deformasyonların sıfır olduğu kabul edilir. Bu durum için i doğrultusundaki kuvvet hesaplanır. Bu işlem, elemanın bütün serbestlik dereceleri için ayrı ayrı uygulanarak eleman rijitlik katsayıları elde edilmiş olur. Düzlem kafes eleman için en genel formda rijitlik katsayıları Şekil 3.6.'da ki gibidir. Denklem (3.8)'den anlaşılacağı üzere kafes yapılarda eleman rijitlik katsayısı, eleman uzunluğu, enkesit alanı ve elastisite modülüne bağlıdır.



Şekil 3.6. Düzlem kafes eleman için rijitlik katsayıları

Genel formda rijitlik katsayıları ile uç deplasmanlar arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$
\begin{aligned}
F_1 &= k_{11}.\, d_{1+}\, k_{12}.\, d_{2+}\, k_{13}.\, d_{3+}\, k_{14}.\, d_{4+}\, k_{15}.\, d_{5+}\, k_{16}.\, d_6 \\
F_2 &= k_{21}.\, d_{1+}\, k_{22}.\, d_{2+}\, k_{23}.\, d_{3+}\, k_{24}.\, d_{4+}\, k_{25}.\, d_{5+}\, k_{26}.\, d_6 \\
F_3 &= k_{31}.\, d_{1+}\, k_{32}.\, d_{2+}\, k_{33}.\, d_{3+}\, k_{34}.\, d_{4+}\, k_{35}.\, d_{5+}\, k_{36}.\, d_6 \\
F_4 &= k_{41}.\, d_{1+}\, k_{42}.\, d_{2+}\, k_{43}.\, d_{3+}\, k_{44}.\, d_{4+}\, k_{45}.\, d_{5+}\, k_{46}.\, d_6 \\
F_5 &= k_{51}.\, d_{1+}\, k_{52}.\, d_{2+}\, k_{53}.\, d_{3+}\, k_{54}.\, d_{4+}\, k_{55}.\, d_{5+}\, k_{56}.\, d_6 \\
F_6 &= k_{61}.\, d_{1+}\, k_{62}.\, d_{2+}\, k_{63}.\, d_{3+}\, k_{64}.\, d_{4+}\, k_{65}.\, d_{5+}\, k_{66}.\, d_6
\end{aligned}
\tag{3.9}
$$

Bu denklemler matris formunda yazılırsa:

$$
\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{Bmatrix} \tag{3.10}
$$

şeklinde olur. Denklem (3.10)'daki matris kapalı formda yazılarak:

$$
\{F\} = [k].\{d\} + \{f\} \tag{3.11}
$$

denklemi bulunur.

Bu denklem, elemanın lokal koordinatlarındaki rijitlik denklemi olarak tanımlanır. Burada $\{P\}$, düğüm noktalarına etkiyen uç kuvvetler vektörü; $[k]$ elemanın rijitlik matrisi; {d} düğüm noktası deplasman vektörü; $\{f\}$ ise açıklıklara etkiyen yükün oluşturduğu ankastrelik kuvvetler vektörüdür (Tezcan 1970).

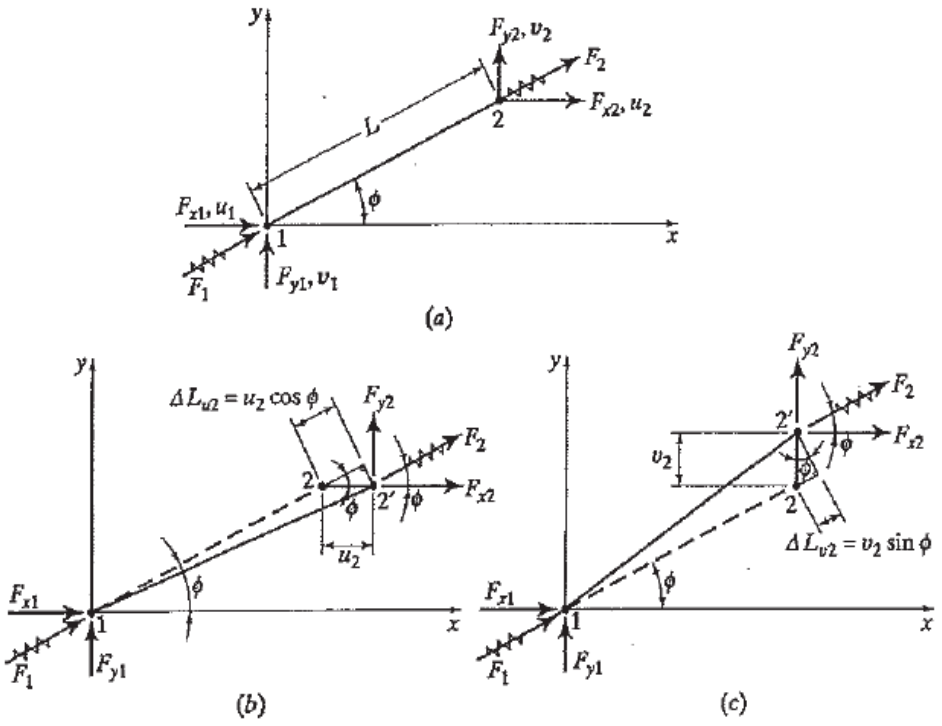
Düzlem kafes yapılarda, yüklerin sadece düğüm noktalarına etki etmesinden dolayı ankastrelik kuvvet vektörü sıfırdır. Şekil 3.6'da görüleceği üzere serbestlik dereceleri sadece eksenel doğrultuda olduğundan, diğer serbestlik derecelerindeki kuvvet, rijitlik katsayısı ve deplasman değerleri sıfır olur ve düzlem kafes yapılar için Denklem (3.10) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$
\begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \\ F_4 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & k_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{41} & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ 0 \\ 0 \\ d_4 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.12}
$$

(3.12)'de verilen matris, sade bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{14} \\ k_{41} & k_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_4 \end{Bmatrix} \tag{3.13}$$

Yapıların analizinde global rijitlik denklemlerini oluşturmanın en basit yolu, lokal koordinatlarda eleman rijitlik denklemleriyle analize başlamak ve daha sonra bunları global eksenlere dönüştürmektir. Şekil 3.6.'da gösterilen elemana özdeş bir kafes eleman ele alınsın (Şekil 3.7.a.). Bu eleman, Şekil 3.6.'daki elemandan farklı olarak *x* ekseniyle sıfırdan farklı bir ϕ açısı yapsın ve elemana eksenel doğrultuda F_1 ve F_2 kuvvetleri etki etsin. Bu durumda koordinat eksenlerine paralel olarak deplasman bileşenleri olan serbestlik dereceleri tanımlanırken iki parametre (u_1, u_2) yerine dört parametre (u_1, u_2, v_1, v_2) kullanılır.



Şekil 3.7. Düzlem kafes elemanda (a) eğimli durum (b) u_1, u_2 yatay deplasmanları c) v_1, v_2 düşey deplasmanları

Şekil 3.7.'de elemana eksenel doğrultuda etki eden F_1 ve F_2 kuvvetleri global koordinat sisteminde bileşenlerine ayrılabilir F_{1x}, F_{1y} ve F_{2x}, F_{2y} bileşenlerine ayrılabilir.

Kuvvet bileşenleri ile yatay deplasmana (u_2) bağlı olarak rijitlik matrisinin ilgili sütununu belirlemek için, Şekil 3.7.b'den görüleceği üzere 2 nolu düğüm noktasına diğer tüm serbestlik dereceleri yönündeki deplasmanlar sıfır olmak üzere şartıyla *x* doğrultusunda bir miktar deplasman etki ettirilir. Buradan elemanın uzama miktarı (ΔL_{u_2});

$$\Delta L_{u_2} = u_2.\cos\phi \tag{3.14}$$

olarak elde edilir. Elemana etkiyen bileşke kuvvet, F_2 ise:

$$F_2 = \frac{E.A}{L}.\Delta L_{u_2} = \frac{E.A}{L}.\cos\phi.u_2 \tag{3.15}$$

şeklinde bulunur. Denge ifadelerinden F_{2x}, F_{2y} aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_{x_2} = -F_{x_1} = F_2.\cos\phi = \frac{E.A}{L}.\cos^2\phi.u_2 \tag{3.16}$$

$$F_{y_2} = -F_{y_1} = F_2.\sin\phi = \frac{E.A}{L}\sin\phi.\cos\phi.u_2 \tag{3.17}$$

Aynı şekilde 2 nolu düğüm noktasının global *y* ekseni doğrultusundaki deplasmanı (v_2); Şekil 3.7.c'de gösterildiği üzere şu şekilde tanımlanır:

$$\Delta L_{v_2} = v_2.\sin\phi \tag{3.18}$$

$$F_2 = \frac{E.A}{L}.\Delta L_{v_2} = \frac{E.A}{L}.\sin\phi.v_2 \tag{3.19}$$

$$F_{x_2} = -F_{x_1} = F_2.\cos\phi = \frac{E.A}{L}.\sin\phi.\cos\phi.v_2 \tag{3.20}$$

$$F_{y_2} = -F_{y_1} = F_2.\sin\phi = \frac{E.A}{L}\sin^2\phi.v_2 \tag{3.21}$$

Benzer işlemler 1 nolu düğüm noktası için tekrarlanarak eleman global rijitlik denklemi aşağıda verilen matris formunda oluşturulur:

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{x3} \end{Bmatrix} = \frac{E.A}{L} \begin{bmatrix} \cos^2\phi & \sin\phi.\cos\phi & -\cos^2\phi & -\sin\phi.\cos\phi \\ \sin\phi.\cos\phi & \sin^2\phi & -\sin\phi.\cos\phi & -\sin^2\phi \\ -\cos^2\phi & -\sin\phi.\cos\phi & \cos^2\phi & \sin\phi.\cos\phi \\ -\sin\phi.\cos\phi & -\sin^2\phi & \sin\phi.\cos\phi & \sin^2\phi \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \tag{3.22}$$

Denklem (3.22), denklem (3.13)'de verilen göre düzlem kafes elemana ait global rijitlik denkleminin genel formudur. Denklem (3.22), lokal eksendeki kafes elemanların global rijitlik denklemini doğrudan vermektedir. Elemanın eksen doğrultusu global *x* ekseni doğrultusuyla çakışırsa $(\phi = 0)$, denklem (3.22), denklem (3.13)'e dönüşecektir.

Eleman global rijitlik matrisini tanımlarken dönüşüm matrisinin kullanılması daha pratik olmaktadır. Dönüşüm matrisi, ilgili matrislerin lokal koordinat sisteminden global koordinat sistemine veya global koordinat sisteminden lokal koordinat sistemine dönüştürülmesi amacıyla kullanılır. Düzlem kafes elemanlar için [T] dönüşüm matrisi, aşağıdaki biçimde verilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

Lokal koordinatlarda elemanların rijitlik matrisi ise

$$[k_{lk}] = \begin{bmatrix} \frac{E.A}{L} & 0 & -\frac{E.A}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E.A}{L} & 0 & \frac{E.A}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

şeklindedir. Dönüşüm matrisi yardımıyla global koordinatlardaki kuvvet vektörü $\{F_{gl}\}$ ile lokal koordinatlardaki kuvvet vektörü $\{F_{lk}\}$ arasında şu ifade yazılır:

$$\{F_{lk}\} = [T]\{F_{gl}\} \tag{3.25}$$

Düğüm deplasmanlarının hesabı için kuvvet vektöründe uygulandığı gibi aynı dönüşüm kullanılacaktır:

$$\{\Delta_{lk}\} = [T].\{\Delta_{gl}\} \tag{3.26}$$

Burada $\{\Delta_{lk}\}$ ve $\{\Delta_{gl}\}$ sırasıyla lokal ve global koordinatlardaki düğüm deplasman vektörüdür.

Dönüşüm matrisi ortogonal matris olduğundan dönüşüm matrisinin tersi, transpozesine eşittir.

$$[T]^{-1} = [T]^{T} \tag{3.27}$$

Lokal ve global eleman rijitlik matrisi arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı bulunmaktadır:

$$[k_{lk}] = [T].[k_{gl}] \tag{3.28}$$

Burada $\{k_{lk}\}$ ve $\{k_{gl}\}$ sırasıyla lokal ve global koordinatlardaki eleman rijitlik matrisleridir.

Rijitlik denklemi, lokal koordinatlarda aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\{F_{lk}\} = [k_{lk}].\{\Delta_{lk}\} \tag{3.29}$$

Bu denklemde $\{\Delta_{lk}\}$ ifadesi, denklem (3.26)'daki değeriyle yeniden yazılırsa:

$$\{F_{lk}\} = [k_{lk}].[T].\{\Delta_{gl}\} \tag{3.30}$$

elde edilir. Bu denklem, (3.25) ile eşitlendiğinde;

$$[T].\{F_{gl}\} = [k_{lk}].[T].\{\Delta_{gl}\} \tag{3.31}$$

$$\{F_{gl}\} = [T]^{-1}[k_{lk}].[T].\{\Delta_{gl}\} \tag{3.32}$$

elde edilir. Denklem (3.27)'de verildiği üzere dönüşüm matrisinin ortogonallik olduğu göz önüne alınarak denklem (3.32) şu şekilde düzenlenir:.

$$\{F_{gl}\} = [T]^{T}[k_{lk}].[T].\{\Delta_{gl}\} \tag{3.33}$$

$$[k_{gl}] = [T]^T [k_{lk}][T] \tag{3.34}$$

$$\{F_{gl}\} = [k_{gl}]\{\Delta_{gl}\} \tag{3.35}$$

Bu denklem açık formda yazıldığında düzlem kafes yapılar için eleman global rijitlik denklemi, aşağıdaki gibi elde edilecektir:

$$[k_{gl}] = \frac{E.A}{L}\begin{bmatrix} \cos^2\phi & \sin\phi.\cos\phi & -\cos^2\phi & -\sin\phi.\cos\phi \\ \sin\phi.\cos\phi & \sin^2\phi & -\sin\phi.\cos\phi & -\sin^2\phi \\ -\cos^2\phi & -\sin\phi.\cos\phi & \cos^2\phi & \sin\phi.\cos\phi \\ -\sin\phi.\cos\phi & -\sin^2\phi & \sin\phi.\cos\phi & \sin^2\phi \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

Kafes yapıdaki her eleman için global rijitlik matrisi elde edildikten sonra sistemdeki serbestlik derecesi sayısı kadar satır ve sütundan oluşan sistem rijitlik matrisi [K] oluşturulur. Her bir elemanın rijitlik matrisi, sistem rijitlik matrisinin ilgili satır ve sütununa yazılır. Aynı satır ve sütun üzerine gelen rijitlik değerlerinin toplanmasıyla sistem rijitlik matrisi [K] oluşturulur. Serbestlik derecesi numarası dikkate alınarak kafes yapının düğüm noktalarına etki eden kuvvetlere ait kuvvet vektörü $\{F\}$ kurulur. Düğüm noktalarının ilgili serbestlik dereceleri doğrultusundaki bilinmeyen deplasman vektörü $\{\Delta\}$ yazılarak aşağıdaki denklem oluşturulur:

$$\{F\} = [K]\{\Delta\} \tag{3.37}$$

Bu denklem aşağıdaki formda dönüştürülüp çözülerek sistem deplasman matrisi, dolayısıyla düğüm noktalarının deplasman değerleri elde edilmiş olur.

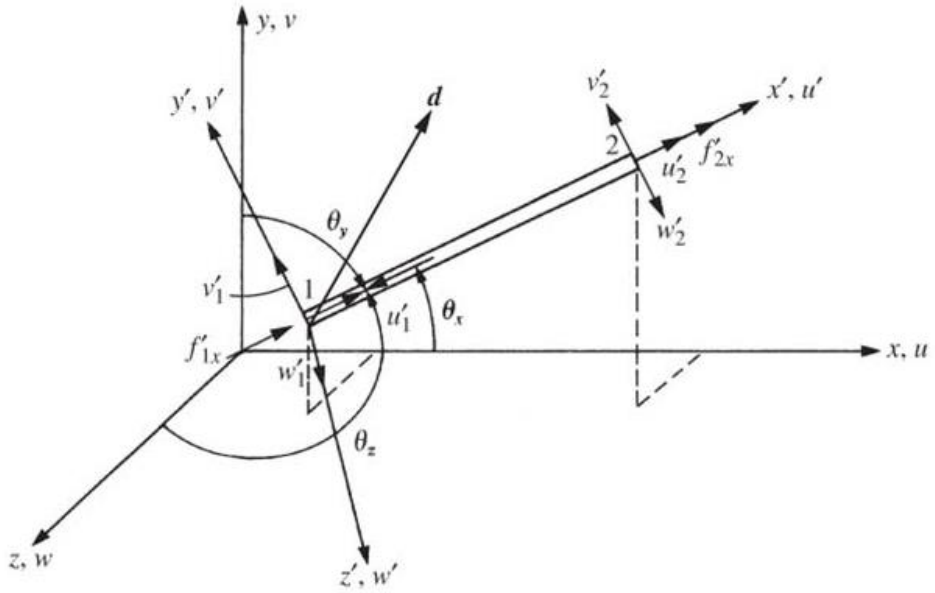
$$\{\Delta\} = [K]^{-1}.\{F\} \tag{3.38}$$

Elde edilen global koordinatlardaki deplasman matrisi kullanılarak denklem (3.30) yardımıyla elemanların uç kuvvetleri hesaplanır (McGuire ve ark. 2000).

Bu tez çalışmasında kafes yapıların statik analizi, matris deplasman yöntemini kullanan OPENSEES v2.5.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiş, ayrıca bir program kodu yazılmamıştır.

3.5.2. Uzay Kafes Yapıların Statik Analizi

Uzay kafes yapıların statik analizi için işlem adımları, düzlem kafes yapılarda açıklandığı şekildedir. Şekil 3.8.'de uzay kafes yapı elemanının lokal ve global koordinat eksenleri ile serbestlik dereceleri gösterilmiştir. Şekil 3.8.'de görüldüğü üzere uzay kafes elemanın 1. ucunda üç, 2. ucunda üç olmak üzere toplam altı tane serbestlik derecesi bulunmaktadır. Burada *u, v, w,* sırasıyla *x, y* ve *z* global eksen doğrultularındaki deplasmanları; *u', v', w'* sırasıyla *x', y'* ve *z'* lokal eksen doğrultularındaki deplasmanları göstermektedir.



Şekil 3.8. Uzay kafes eleman

Uzay kafes elemanın *L* uzunluğu ve elemanın global eksenlerle yaptığı açılar aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \tag{3.39}$$

$$\cos\theta_x = \frac{x_2 - x_1}{L} \quad , \quad \cos\theta_y = \frac{y_2 - y_1}{L} \quad , \quad \cos\theta_z = \frac{z_2 - z_1}{L} \tag{3.40}$$

Burada $\cos\theta_x$, $\cos\theta_y$ ve $\cos\theta_z$ sırasıyla *x, y* ve *z* eksenleriyle yapılan açıların kosinüs doğrultmanlarıdır.

Şekil 3.8.'deki u_1' ve u_2' değerleri şu şekilde hesaplanacaktır:

$$u_1' = \cos\theta_x . u_1 + \cos\theta_y . v_1 + \cos\theta_z w_1 \tag{3.41}$$

$$u_2' = \cos\theta_x . u_2 + \cos\theta_y . v_2 + \cos\theta_z w_2$$

Burada u_1, v_1 ve w_1 elemanın 1. ucunun sırasıyla *x, y* ve *z* eksenleri doğrultusundaki deplasmanları, u_2, v_2 ve w_2 elemanın 2. ucunun *x, y* ve *z* eksenleri doğrultusundaki deplasmanlarıdır. Lokal ve global deplasmanlar arasındaki ilişki matris formda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{Bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{Bmatrix} \tag{3.42}$$

{d'}=[T].[d] olduğu göz önüne alınarak dönüşüm matrisi

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z \end{bmatrix}. \tag{3.43}$$

şeklinde verilmektedir. Denklem (3.34) dikkate alınarak eleman global rijitlik matrisi şu şekilde düzenlenebilir:

$$\begin{bmatrix} k_{gl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & 0 \\ \cos\theta_y & 0 \\ \cos\theta_z & 0 \\ 0 & \cos\theta_x \\ 0 & \cos\theta_y \\ 0 & \cos\theta_z \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \frac{A.E}{L} & -\frac{A.E}{L} \\ -\frac{A.E}{L} & \frac{A.E}{L} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta_x & \cos\theta_y & \cos\theta_z \end{bmatrix} . \tag{3.44}$$

Global rijitlik matrisi daha açık bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\left[k_{gl}\right]=\frac{A.E}{L}.\begin{bmatrix} \cos\theta_x^{\,2} & \cos\theta_x.\cos\theta_y & \cos\theta_x.\cos\theta_z & -\cos\theta_x^{\,2} & -\cos\theta_x.\cos\theta_y & -\cos\theta_x.\cos\theta_z \\ \cos\theta_x.\cos\theta_y & \cos\theta_y^{\,2} & \cos\theta_y.\cos\theta_z & -\cos\theta_x.\cos\theta_y & -\cos\theta_y^{\,2} & -\cos\theta_y.\cos\theta_z \\ \cos\theta_x.\cos\theta_z & \cos\theta_y.\cos\theta_z & \cos\theta_z^{\,2} & -\cos\theta_x.\cos\theta_z & -\cos\theta_y.\cos\theta_z & -\cos\theta_z^{\,2} \\ -\cos\theta_x^{\,2} & -\cos\theta_x.\cos\theta_y & -\cos\theta_x.\cos\theta_z & \cos\theta_x^{\,2} & \cos\theta_x.\cos\theta_y & \cos\theta_x.\cos\theta_z \\ -\cos\theta_x.\cos\theta_y & -\cos\theta_y^{\,2} & -\cos\theta_y.\cos\theta_z & \cos\theta_x.\cos\theta_y & \cos\theta_y^{\,2} & \cos\theta_y.\cos\theta_z \\ -\cos\theta_x.\cos\theta_z & -\cos\theta_y.\cos\theta_z & -\cos\theta_z^{\,2} & \cos\theta_x.\cos\theta_z & \cos\theta_y.\cos\theta_z & \cos\theta_z^{\,2} \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

Kafes yapıdaki her eleman için global rijitlik matrisi elde edildikten sonra tüm sistemin rijitlik matrisi [*K*] oluşturulur. Sistem rijitlik matrisi, serbestlik derecesi sayısı kadar satır ve sütundan oluşan bir matristir. Her elemanın rijitlik matrisi, sistem rijitlik matrisinde ilgili satır veya sütuna yazılır. Aynı satır veya sütun üzerine farklı elemanlardan gelen rijitlik değerleri toplanır. Sistem rijitlik matrisi oluşturulduktan sonra denklem (3.35) kullanılarak düğüm noktası deplasmanları ve ardından denklem (3.30) yardımıyla eleman uç kuvvetleri bulunur.

3.5.3. OPENSEES v2.5.0 Yazılımı

OPENSEES, yapı sistemlerinin sismik davranışlarının modellenmesi için 1998 yılında Berkeley Üniversitesi ve Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir yazılımdır. OPENSEES, farklı çözüm algoritmaları kullanarak yapı sistemlerinin doğrusal veya doğrusal olmayan davranışını modelleyebilmektedir.

Diğer yapı analiz yazılımlarında olduğu gibi OPENSEES'de de yapı modelinin oluşturulması, analizin yapılması ve çıktıların üretilmesi şeklinde üç temel adımda yapı sisteminin çözümü yapılmaktadır.

OPENSEES'de, sonlu eleman modelinin oluşturulması, analiz prosedürünün seçimi, analiz için gerekli parametrelerin atanması ve analiz çıktılarının alınmasını sağlayan bir dizi modül bulunmaktadır. Her bir sonlu eleman analizinde dört ana nesne türü düzenlenir. Bunlar;

Model oluşturucu nesne, modeldeki nesneleri oluşturmak ve çalışma alanına eklemekten sorumludur.

Çalışma alanı nesnesi, model oluşturucu nesne tarafından oluşturulan verilerin depolanması, analiz ve çıktı nesnelerinin bu verilere erişiminin sağlanmasından sorumludur.

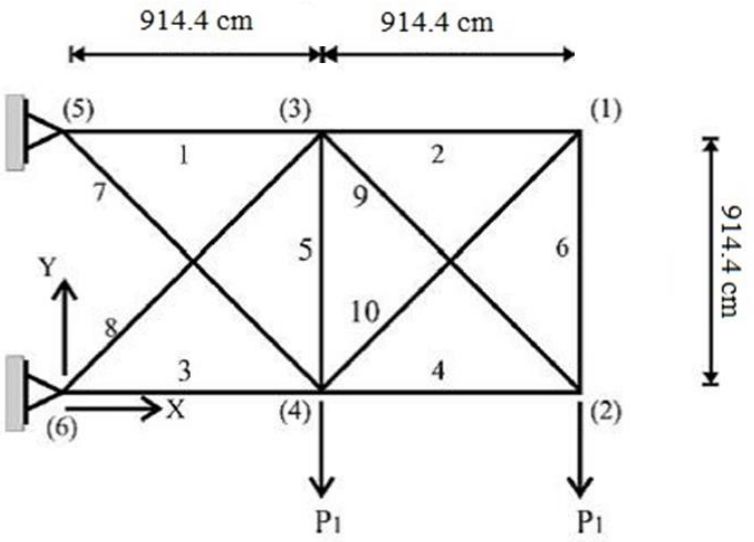
Analiz nesnesi, oluşturulan model verilerine göre analizin yapılmasından sorumludur.

Çıktı (kaydedici) nesnesi, analiz sırasında kullanıcı tarafından belirlenen nesnelerin görüntülenmesini ve kaydedilmesini sağlar (Bagal ve Mathada 2015).

Bu tez çalışmasında OPENSEES v2.5.0 yazılımının sadece statik analiz ile ilgili kısmı kullanılmıştır. Yazılımın doğru olarak icra edildiğinden emin olmak için 10 elemanlı düzlem kafes ve 25 elemanlı uzay kafes yapıların analiz sonuçları yapısal analiz konusunda oldukça itibar edilen SAP2000 v16 programıyla karşılaştırılmıştır.

3.5.3.1. 10 Elemanlı Düzlem Kafes Yapının Statik Analiz Sonuçlarının SAP2000 Yazılımı ile Karşılaştırılması

OPENSEES v2.5.0 yazılımının doğru olarak icra edildiğinden emin olmak amacıyla kullanılan örneklerden ilki olan 10 elemanlı düzlem kafes yapının geometrisi Şekil 3.9.'da verilmiştir. Malzeme için elastisite modülü 68948 MPa, 2 ve 4 nolu düğüm noktalarına etkiyen P_1 yükü, 448.22 kN'dur. Her elemana ait enkesit alanı sırasıyla; A_1=197.1064 cm^2, A_2=0.64516 cm^2, A_3=149.7327 cm^2, A_4=98.26174 cm^2, A_5=0.64516 cm^2, A_6=3.549606 cm^2, A_7=48.11197 cm^2, A_8=135.6937 cm^2, A_9=138.7129 cm^2, A_{10}=0.64516 cm^2 olarak seçilmiştir.

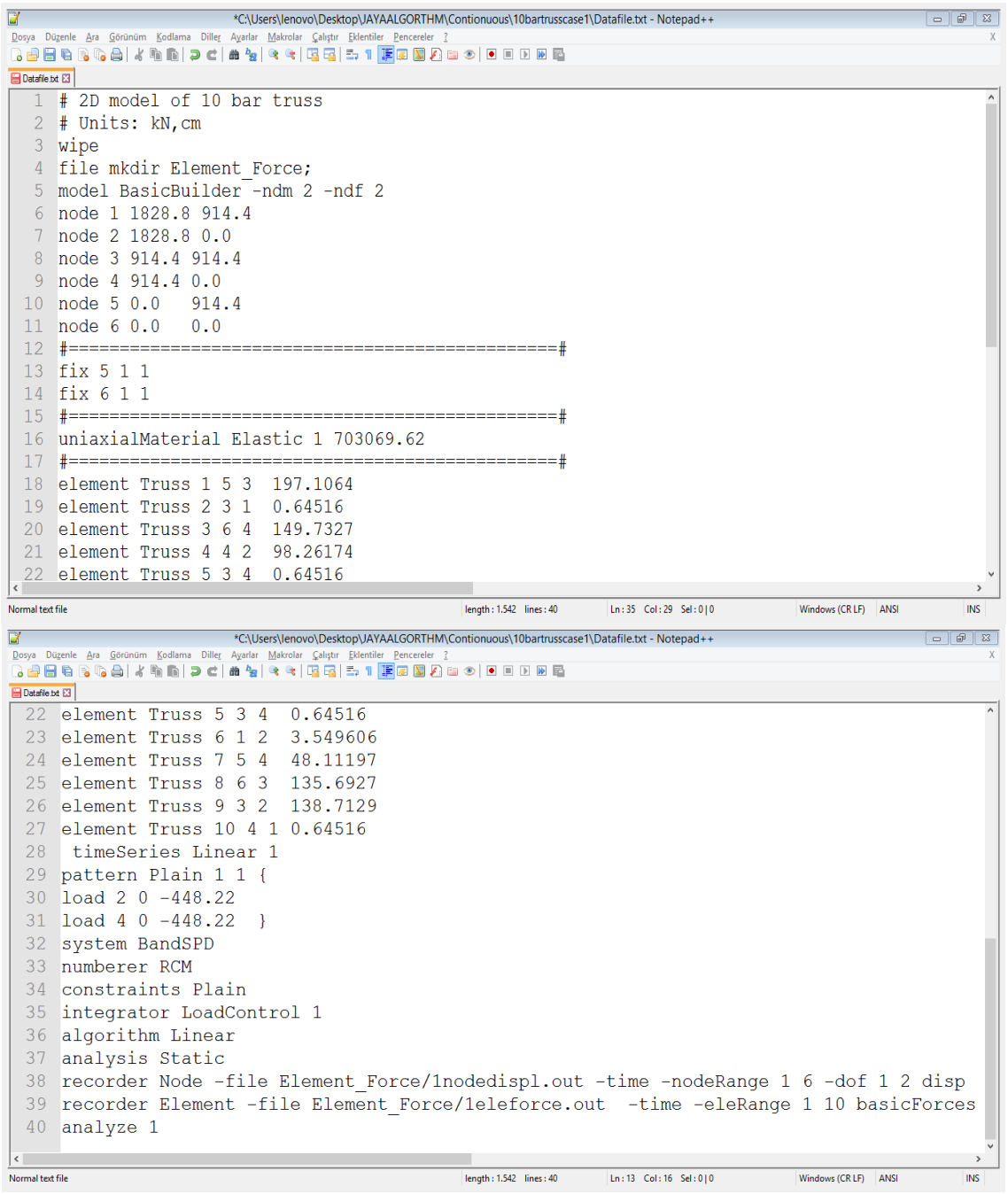


Şekil 3.9. 10 elemanlı düzlem kafes yapı

OPENSEES v2.5.0 yazılımının statik analizinde öncelikle kafes yapının TXT formatında veri dosyasının oluşturulması gerekmektedir. 10 elemanlı düzlem kafes yapı için yukarıda verilen malzeme özellikleri ve yapı geometrisine göre hazırlanan veri dosyası Şekil 3.10.'daki gibidir.

Şekil 3.10. incelendiğinde ilk iki satırda veri dosyasının tanımı ve kullanılan birim sistemi belirtilmiştir. Bu satırların başında bulunan "#" simgesi, yazılanların sadece açıklama işlevi olduğunu göstermektedir. 4. satırda, analiz sonuçlarının kaydedileceği bir klasör oluşturulmuştur. 5. satırda, kafes yapının boyutu (düzlem kafes yapı 2 boyutlu, uzay kafes yapı üç boyutlu) ve serbestlik derecesi sayısı tanımlanmıştır. 6. ve 11. satırlar arasında düğüm noktalarının numaraları ve koordinatları girilmiştir. 13. ve 14. satırlarda mesnetlenmiş düğüm noktaları ve bu noktaların sınırlandırılmış doğrultuları tanımlanmıştır. 16. satırda malzeme özellikleri tanımlanmış elastisite modülü değeri girilmiştir. 18 ile 27 nolu satırlar arasında eleman numaraları, başlangıç ve bitiş noktaları ve enkesit alanları tanımlanmıştır. 28. ve 31. satırlar arasında sisteme etkiyen yükler ve etki ettiği düğüm noktaları girilmiştir. 32. ve 37. satırlar arasında sırasıyla, analizde denklem sistemlerinin çözümü için kullanılan yöntem (simetrik bant matrisi), serbestlik derecesi numaralandırması için kullanılan algoritma (RCM algoritması), kafes yapının boyut sayısına bağlı serbestlik dereceleri sınırlandırmaları,

yük kontrolü, analizde kullanılan yöntem (lineer veya lineer olmayan analiz) ve analiz tipi (statik veya dinamik analiz) belirlenmiştir. 38. ve 39. satırlarda ise analiz sonucunda düğüm noktası deplasmanlarının ve eleman uç kuvvetlerinin daha önce oluşturulan klasörde çıktı dosyası şeklinde kaydedilmesi işlemi tanımlanmıştır.



Şekil 3.10. 10 elemanlı kafes yapının OPENSEES v2.5.0 veri dosyası

Kafes yapının veri dosyası hazırlandıktan sonra bu dosya, OPENSEES v2.5.0 yazılımıyla çalıştırılmış ve analiz sonuçları kaydedilmiştir. Bu kafes yapının, aynı veriler kullanılarak SAP2000 v16 programıyla da statik analizi yapılmış ve elde edilen eleman uç kuvvetleri, düğüm noktası deplasmanları sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2.'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1. 10 elemanlı düzlem kafes için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen eleman uç kuvvetlerinin karşılaştırılması

	OPENSEES V2.5.0						**SAP2000 V16**					
Eleman No	**P**	**V_2**	**V_3**	**T**	**M_2**	**M_3**	**P**	**V_2**	**V_3**	**T**	**M_2**	**M_3**
	kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m	kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m
1	901.3476	0	0	0	0	0	901.3476	0	0	0	0	0
2	-0.58271	0	0	0	0	0	-0.58272	0	0	0	0	0
3	-877.941	0	0	0	0	0	-877.941	0	0	0	0	0
4	-445.405	0	0	0	0	0	-445.405	0	0	0	0	0
5	11.12055	0	0	0	0	0	11.12055	0	0	0	0	0
6	-0.58271	0	0	0	0	0	-0.58272	0	0	0	0	0
7	612.5246	0	0	0	0	0	612.5226	0	0	0	0	0
8	-645.624	0	0	0	0	0	-645.624	0	0	0	0	0
9	629.8993	0	0	0	0	0	629.8976	0	0	0	0	0
10	0.824078	0	0	0	0	0	0.824078	0	0	0	0	0

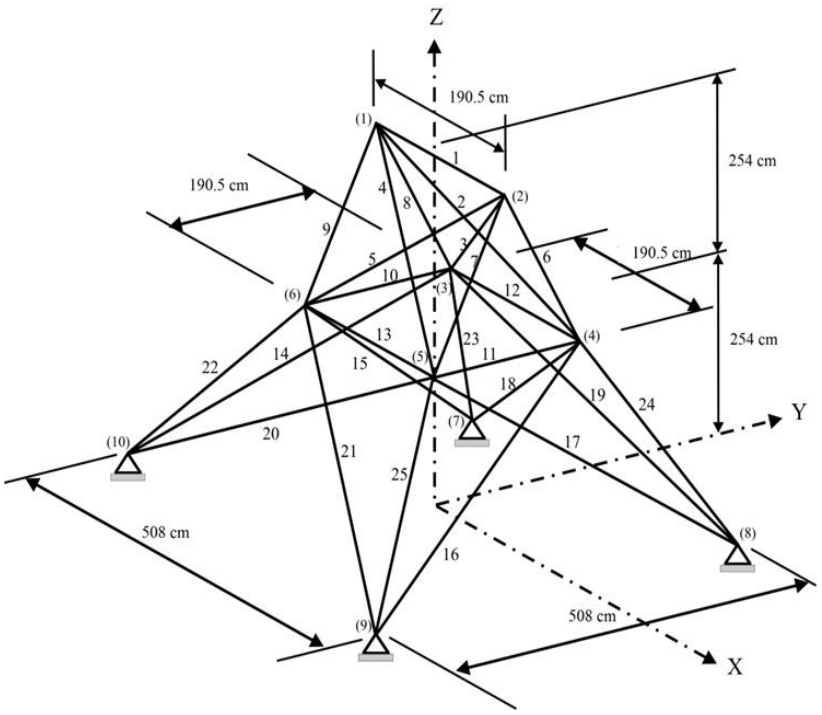
Çizelge 3.2. 10 elemanlı düzlem kafes için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen düğüm deplasmanlarının karşılaştırılması

	OPENSEES V2.5.0						**SAP2000 V16**					
Düğüm Noktası	**U_1**	**U_2**	**U_3**	**R_1**	**R_2**	**R_3**	**U_1**	**U_2**	**U_3**	**R_1**	**R_2**	**R_3**
	cm	cm	cm	rad	rad	rad	cm	cm	cm	rad	rad	rad
1	0.48668	0	-5.08	0	0	0	0.48668	0	-5.08	0	0	0
2	-1.3788	0	-5.05823	0	0	0	-1.3788	0	-5.05823	0	0	0
3	0.60647	0	-1.8685	0	0	0	0.60647	0	-1.8685	0	0	0
4	-0.7776	0	-4.1545	0	0	0	-0.7776	0	-4.1545	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge 3.1. ve 3.2.'deki sonuçlar karşılaştırıldığında OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen sonuçların aynı olduğu görülmektedir. Bu durum OPENSEES v2.5.0 yazılımının doğru bir şekilde icra edildiğini göstermektedir.

3.5.3.2. 25 Elemanlı Uzay Kafes Yapının Statik Analiz Sonuçlarının SAP2000 Yazılımı ile Karşılaştırılması

25 elemanlı uzay kafes yapının geometrisi Şekil 3.11.'de gösterilmiştir. Bu kafes yapıda elastisite modülü 68948 MPa'dır. Kafes yapının 1 nolu düğüm noktasına *x, y* ve *z* doğrultusunda sırasıyla 4.448 kN, 44.48 kN ve -22.24 kN, 2 nolu düğüm noktasına *y* ve *z* doğrultusunda sırasıyla 44.48 kN ve -22.24 kN, 3 ve 6 nolu düğüm noktalarına *x* doğrultusunda 2.224 kN değerinde yükler etki etmektedir.



Şekil 3.11. 25 elemanlı uzay kafes yapı

Kafes yapı sekiz eleman grubundan oluşturulmuştur. Her eleman grubuna atanacak enkesit alanı; A_1=0.0645 cm^2, A_{2-5}=12.8547 cm^2, A_{6-9}=19.247 cm^2, A_{10-11}=0.0645 cm^2, A_{12-13}=0.0645cm^2, A_{14-18}=4.414 cm^2, A_{19-22}=10.82 cm^2, A_{23-25}=17.1903 cm^2 şeklindedir. 25 elemanlı uzay kafes yapının veri dosyası oluşturularak OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 yazılımlarıyla analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3 ve 3.4'te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3. 25 elemanlı uzay kafes yapı için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen eleman uç kuvvetlerinin karşılaştırılması

	OPENSEES V2.5.0						SAP2000 V16					
Eleman No	**P**	**V_2**	**V_3**	**T**	**M_2**	**M_3**	**P**	**V_2**	**V_3**	**T**	**M_2**	**M_3**
	kN	kN	kN	kN.m	kN.m	kN.m	kN	kN	kN	kN.m	kN.m	kN.m
1	0.23628	0	0	0	0	0	0.23629	0	0	0	0	0
2	-61.80891	0	0	0	0	0	-61.80892	0	0	0	0	0
3	61.39789	0	0	0	0	0	61.39777	0	0	0	0	0
4	61.39789	0	0	0	0	0	61.39777	0	0	0	0	0
5	-61.80891	0	0	0	0	0	-61.80892	0	0	0	0	0
6	64.56280	0	0	0	0	0	64.56269	0	0	0	0	0
7	-87.97956	0	0	0	0	0	-87.97973	0	0	0	0	0
8	-87.97956	0	0	0	0	0	-87.97973	0	0	0	0	0
9	64.56280	0	0	0	0	0	64.56269	0	0	0	0	0
10	-0.08028	0	0	0	0	0	-0.08028	0	0	0	0	0
11	-0.08028	0	0	0	0	0	-0.08028	0	0	0	0	0
12	-0.08336	0	0	0	0	0	-0.08336	0	0	0	0	0
13	-0.08336	0	0	0	0	0	-0.08336	0	0	0	0	0
14	-7.92726	0	0	0	0	0	-7.92727	0	0	0	0	0
15	3.03669	0	0	0	0	0	3.03669	0	0	0	0	0
16	3.03669	0	0	0	0	0	3.03669	0	0	0	0	0
17	-7.92726	0	0	0	0	0	-7.92727	0	0	0	0	0
18	39.65753	0	0	0	0	0	39.65750	0	0	0	0	0
19	-51.88270	0	0	0	0	0	-51.88249	0	0	0	0	0
20	-51.88270	0	0	0	0	0	-51.88249	0	0	0	0	0
21	39.65753	0	0	0	0	0	39.65750	0	0	0	0	0
22	-13.98596	0	0	0	0	0	-13.98599	0	0	0	0	0
23	-3.08723	0	0	0	0	0	-3.08720	0	0	0	0	0
24	-13.98596	0	0	0	0	0	-13.98599	0	0	0	0	0
25	-3.08723	0	0	0	0	0	-3.08720	0	0	0	0	0

Çizelge 3.4. 25 elemanlı uzay kafes yapı için OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile elde edilen düğüm noktası deplasmanlarının karşılaştırılması

	OPENSEES V2.5.0						SAP2000 V16					
Düğüm Noktası	**U_1**	**U_2**	**U_3**	**R_1**	**R_2**	**R_3**	**U_1**	**U_2**	**U_3**	**R_1**	**R_2**	**R_3**
	cm	cm	cm	rad	rad	rad	cm	cm	cm	rad	rad	rad
1	-0.0506	0.8890	-0.0736	0	0	0	-0.0506	0.8890	-0.0736	0	0	0
2	0.0506	-0.8890	-0.0736	0	0	0	0.0506	-0.8890	-0.0736	0	0	0
3	0.2839	-0.1027	-0.2534	0	0	0	0.2839	-0.1027	-0.2534	0	0	0
4	0.2482	0.0683	0.1444	0	0	0	0.2482	0.0683	0.1444	0	0	0
5	-0.2839	0.1027	-0.2534	0	0	0	-0.2839	0.1027	-0.2534	0	0	0
6	-0.2482	-0.0683	0.1444	0	0	0	-0.2482	-0.0683	0.1444	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge 3.3. ve 3.4.'ten görüldüğü üzere, 25 elemanlı uzay kafes yapının OPENSEES v2.5.0 ve SAP2000 v16 ile yapılan analizinde aynı eleman uç kuvvetleri ve düğüm deplasman değerleri bulunmuştur. Bu durum, OPENSEES v2.5.0 yazılımının uzay kafes yapıların analizinde de doğru bir şekilde icra edildiğini ispatlamaktadır.

3.5.4. Kafes Yapıların Optimizasyon Probleminin Formülasyonu

Kafes yapıların kesit optimizasyonunda amaç, deplasman ve gerilme sınırlayıcıları altında yapı ağırlığının minimizasyonudur. Herhangi bir kafes yapının kesit optimizasyonu problemi şu şekilde formülize edilebilir:

$$W(A) = \sum_{k=1}^{ng} A_k \sum_{i=1}^{nm} \gamma_i L_i \qquad k=1,2,....,ng \quad i=1,2,...,nm \tag{3.46}$$

$$\delta_{\min} \le \delta_j \le \delta_{\max}, \qquad j=1,2,.....,nd$$

$$\sigma_i^c \le \sigma_i \le \sigma_i^t, \qquad i=1,2,....,nm \tag{3.47}$$

Yapısal optimizasyon problemleri, tasarım değişkenleri açısından iki gruba ayrılabilir. Birinci gruplandırmada, tasarım değişkenleri sürekli olarak alınır. Bu durumda tasarım değişkenine üst ve alt sınır değerleri arasında herhangi bir reel sayı enkesit alanı olarak atanabilir.

$$A \in S_1 = \left\{ A_{\min} \le A \le A_{\max} \right\} \tag{3.48}$$

İkinci gruplandırmada ise tasarım değişkenleri daha önceden belirlenmiş enkesit alanları listesinden seçilen ayrı değişkenler olarak atanır.

$$A \in S_2 = \left\{ A_1, A_2, ..., A_{ncs} \right\} \tag{3.49}$$

Yukarıdaki denklemlerde, A tasarım değişkenlerini (eleman gruplarına atanacak enkesit alanlarını) içeren vektör, S_1 sürekli enkesit alanlarının alabileceği değerler, A_{min} ve A_{max} sürekli enkesit alanlarının alt ve üst sınır değerleri, S_2 ayrık enkesit alanlar listesi, $W(A)$ kafes yapının ağırlığı, γ_i ve L_i sırasıyla *i-inci* elemanın özağırlığı ve uzunluğu, A_k *k-ıncı* grubun (tasarım değişkeninin) eleman enkesit alanı, σ_i ve δ_j sırasıyla, *i-nci* elemanın gerilme sınır değeri *ve j-nci* düğüm noktasının deplasman değeri, σ_i^c ve σ_i^t *i-nci* eleman için müsaade edilen basınç ve çekme gerilmeleri, $\delta_{\min}$ ve $\delta_{\max}$ *j-inci* düğüm noktasının alabileceği minimum ve maksimum deplasman

değerleri, *ng* eleman grup sayısı (tasarım değişkeni sayısı), *nm* yapıdaki toplam eleman sayısı, nd serbestlik derecesi sayısı, *ncs* hazır kesit listesindeki enkesit alanı sayısıdır.

Optimizasyon sürecinde sınırlayıcıları sağlayan ve sağlamayan tasarımları ayırt edebilmek için cezalandırılmış amaç fonksiyonu kullanılacaktır. Bu fonksiyon ile sınırlayıcıları sağlamayan tasarımlar, sınırlayıcı ihlal derecelerine göre cezalandırılmaktadır. Cezalandırılmış amaç fonksiyonu, $f_p(A)$, şu şekilde ifade edilir:

$$f_p(A) = (1+\psi(A))^{\varepsilon} \times W(A) \tag{3.50}$$

$$\psi(A) = \sum_{i=1}^{nm} g_i(A) + \sum_{j=1}^{nd} d_j(A) \tag{3.51}$$

$$g_i(A) = \frac{|\sigma_i|}{|\sigma_{ai}|} - 1 \le 0 \qquad i=1,2,\ldots,nm \tag{3.52}$$

$$d_j(A) = \frac{|\delta_j|}{|\delta_{aj}|} - 1 \le 0 \qquad j=1,2,\ldots,nd \tag{3.53}$$

Burada, $\psi(A)$: gerilme ve deplasman ceza değerlerinin toplamı, $g_i(A)$: *i*-nci eleman için gerilme cezası, $dj(A)$: *j*-nci serbestlik derecesi için deplasman ceza değeri, σ_i ve σ_{ai} sırasıyla: *i*-nci elemanın gerilme değeri ve gerilmenin alabileceği sınır değer, δ_i ve δ_{ai}, sırasıyla: *j*-nci serbestlik derecesinin deplasman değeri ve deplasmanın alabileceği sınır değer, ε ise ceza katsayısı olup ve bu tez çalışmasında 1 olarak atanmıştır.

3.5.4.1. Kafes Yapıların Jaya Algoritmasıyla Optimizasyonu

Kafes yapıların JA ile optimizasyonunda ilk adım *np* (popülasyon sayısı) kadar rastgele kafes yapının üretilmesidir. Popülasyondaki her kafes tasarım için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri denklem (3.46) - (3.53) kullanılarak hesaplanır. En küçük cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerine sahip tasarım ile en iyi tasarım ($f_p^{best}(A)$), en büyük cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerine sahip tasarım en kötü tasarım olarak ($f_p^{worst}(A)$) belirlenir. Tasarım popülasyonundaki her bir kafes yapı tasarımına ait tüm tasarım değişkenleri aşağıdaki denklemle modifiye edilir:

$$A_{k,l,it}^{new} = A_{k,l,it} + r_{1,k,it}\left(A_{k,best,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right) - r_{2,k,it}\left(A_{k,worst,it} - \left|A_{k,l,it}\right|\right) \quad (3.54)$$

Tüm tasarım değişkenleri denklem (3.54) yardımıyla modifiye edildikten sonra yeni tasarım elde edilmiş olur. Yeni tasarım için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değeri ($f_p^{new}(A)$), (3.46)-(3.53) denklemleriyle hesaplanır. Yeni tasarımın cezalandırılmış amaç fonksiyonu önceki tasarıma ait cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerinden ($f_p^{pre}(A)$) küçük veya eşitse yani ($f_p^{new}(A) \le f_p^{pre}(A)$) ise yeni tasarım öncekiyle değiştirilir, aksi durumda yani $f_p^{new}(A) > f_p^{pre}(A)$ ise önceki çözüm aynen korunur. Bu işlemler, popülasyondaki tüm kafes yapılar için tekrarlanarak bir iterasyon tamamlanır. Maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) aşılıncaya kadar aynı işlemler tekrarlanır. Maksimum iterasyon sayısı aşıldığında optimizasyon işlemi bitirilir. Sınırlayıcıları sağlayan en düşük cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerine sahip tasarım, optimum tasarım olarak atanır.

Kafes yapıların Jaya algoritması ile optimizasyonu aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Başlangıç popülasyonunu (kafes yapı tasarımları) rastgele oluştur. Popülasyondaki her bir kafes tasarım için cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerini (3.46)-(3.53) denklemlerini kullanılarak elde et. Popülasyon sayısı *np* ve maksimum iterasyon sayısı it_{max} değerlerini tanımla. İterasyon sayacını başlat, *it = 0*.

Adım 2: İterasyon sayacını arttır, *it = it*+1.

Adım 3: Populasyondaki en iyi ve en kötü kafes yapı tasarımlarını belirle. Kafes yapı tasarım sayacını başlat *id* = 0, (*id*=1,2,…,*np*).

Adım 4: Kafes tasarım sayacı bir arttırılır. (*id = id* + 1)

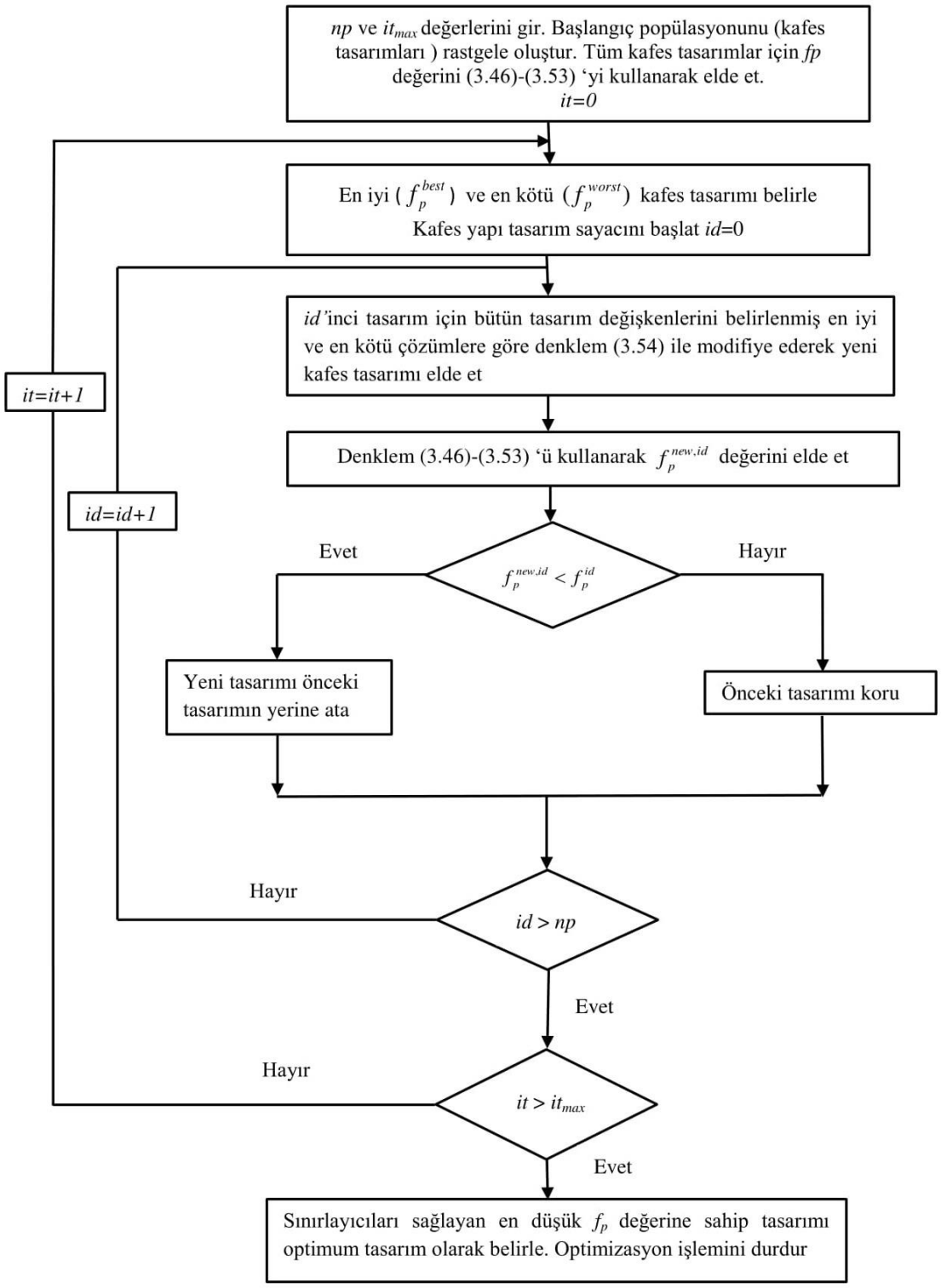
Adım 5: *id-inci* kafes yapının tüm tasarım değişkenleri denklem (3.54) yardımıyla modifiye ederek yeni tasarımı elde et.

Adım 6: (3.46)-(3.53) denklemleriyle $f_p^{new}(A)$ değerini hesapla. Eğer $f_p^{new}(A) < f_p^{pre}(A)$ ise yeni tasarımı öncekinin yerine ata. Aksi halde tasarımı aynen koru.

Adım 7: Eğer $id > np$ ise 8. adıma git, aksi halde 4. adıma git.

Adım 8: Eğer $it > it_{max}$ ise tüm sınırlayıcıları sağlayan en düşük $f_p(A)$ değerine sahip tasarımı optimum tasarım olarak ata. Aksi halde 2. adıma git.

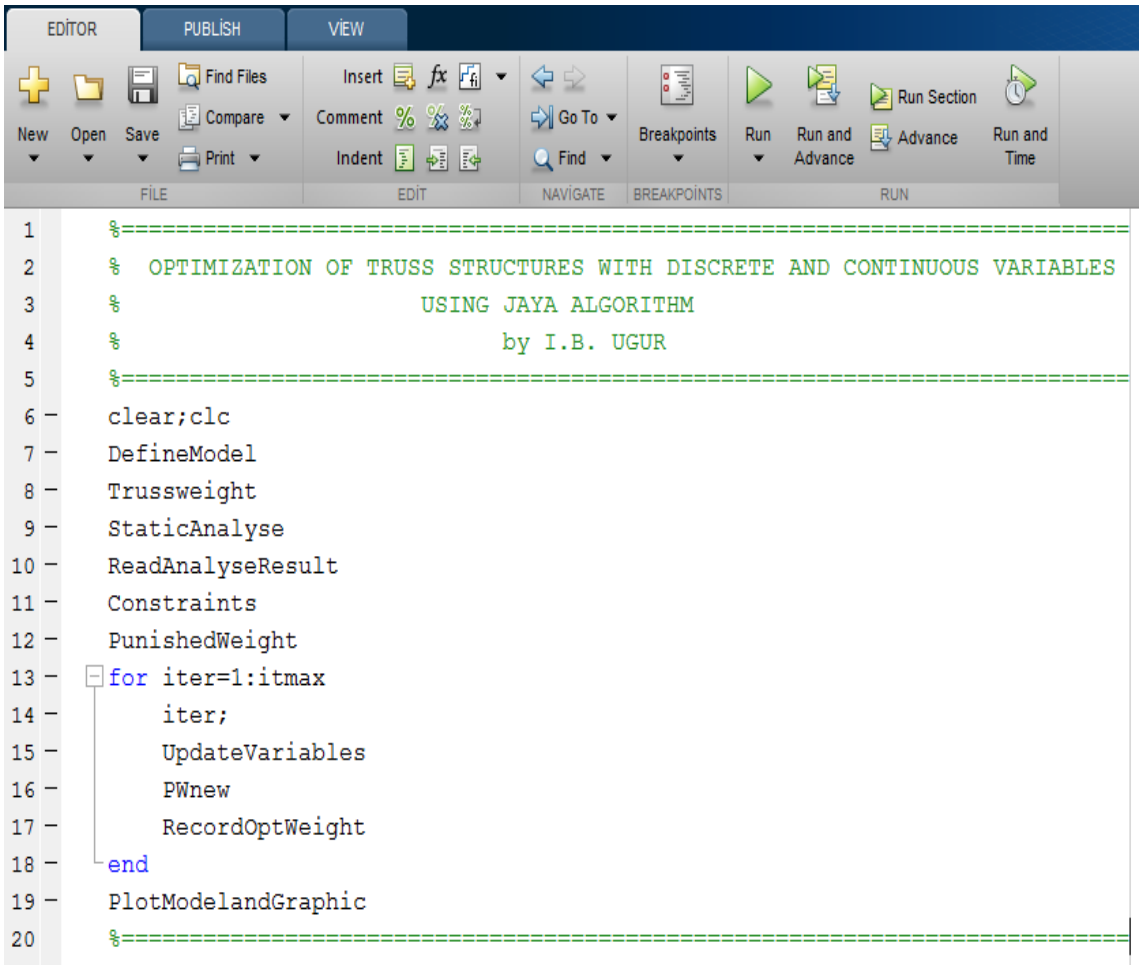
Kafes yapıların JA ile optimizasyonu için adım adım açıklanan algoritma, Şekil 3.12.'de akış diyagramı olarak da sunulmuştur.



Şekil 3.12. Kafes yapıların Jaya algoritmasıyla optimizasyonu için akış diyagramı

3.5.4.2. Jaya Algoritmasıyla Optimizasyon Programının Tanıtılması

Kafes yapıların JA ile optimizasyonu için MATLAB programlama dilinde bir program geliştirilmiştir. Bu program koduna ait ana program Şekil 3.17.'de verilmiştir. Yazılan program kodu kafes yapıların analizi için OPENSEES v2.5.0 yazılımıyla entegre bir şekilde çalışmaktadır. Ana programa bağlı her birinin farklı işlevi olan dokuz alt programdan bulunmaktadır. Bu alt programlar ve işlevleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 3.13. Jaya algoritmasıyla optimizasyon program koduna ait ana program

- **DefineModel**

Ana programın ilk adımıdır. Bu adımda öncelikle popülasyon sayısı (*np*) ve durdurma kriteri olarak kullanılan maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) tanımlanır. Daha sonra kafes yapıdaki düğüm noktası sayısı, eleman sayısı, grup sayısı, düğüm noktası koordinatları, eleman uç noktaları, eleman malzeme özellikleri, eleman gruplandırmaları, eleman gerilme ve düğüm noktası deplasman değerleri için belirlenmiş sınır değerler tanımlanır. Optimizasyon problemindeki tasarım değişkenlerinin sürekli olması durumu için alt ve üst sınır değerler, ayrık olması durumunda ise ayrık enkesit değerleri tanımlanır. Model tanımlanması bittikten sonra tasarım değişkenlerinin sürekli değişkenli olması durumunda tasarım değişkenleri (enkesit alanı) aşağıdaki gibi rastgele şekilde üretilir.

$$A_i = A_{\min} + r.(A_{\max} - A_{\min}) \qquad i=1,2\ldots ng \tag{3.55}$$

Burada, A_i: *i*'nci eleman grubuna ait en kesit alanı, A_{min} ve A_{max} : enkesit alanının alabileceği alt ve üst sınır değerler; *r*: rastgele üretilen reel sayı, *ng:* eleman grup sayısıdır. Tasarım değişkenlerinin ayrık olması durumunda da aynı şekilde hazır kesit listesindeki enkesit değerleri her tasarım için rastgele seçilir. Her grup için için eleman enkesit alanları belirlendikten sonra, popülasyon sayısı kadar kafes tasarım oluşturacak şekilde *np x ng* boyutunda enkesit alanı matrisi [*A*] oluşturulur.

- **Trussweight**

Trussweight, DefineModel alt programında tanımlanmış eleman uç noktaları ve bu noktaların koordinatlarını kullanarak her elemanın uzunluğunu hesaplar. Her elemana atanan enkesit alanı ve malzeme özgül ağırlığı tanımlı olduğundan bu parametreler kullanılarak eleman ağırlığı belirlenir. Her elemanın ağırlığı toplanarak kafes sistemin toplam ağırlığı belirlenir (Denklem 3.46). Bu işlem her kafes yapı için tekrarlanarak popülasyondaki tüm kafes tasarımların ağırlığı hesaplanır ve ağırlık matrisi $[W]_{np\ x\ 1}$ elde edilir.

- **StaticAnalyse**

StaticAnalyse altprogramı, kafes sistemin Definemodel'de tanımlanan verilerine göre statik analizinin yapılmasını sağlamaktadır. Kafes yapıların analizi OPENSEES

v2.5.0 yazılımıyla yapıldığından, bu adımda yapı geometrisi, malzeme özellikleri ve yapıya etkiyen yükleme durumları OPENSEES v2.5.0 data dosyası haline getirilerek otomatik düzenlenir ve TXT formatına dönüştürülür. OPENSEES v2.5.0 yazılımı icra ettirilerek popülasyondaki her bir kafes tasarım için statik analiz yaptırılır. Analiz sonucunda eleman uç kuvvetleri ve düğüm noktası deplasmanları ayrı ayrı çıktı dosyasına yazdırılır.

- **ReadAnalyseResult**

StaticAnalyse altprogramında çıktı dosyasına yazdırılan popülasyondaki kafes sistemlerin analiz sonuçları ana programa çağrılarak eleman uç kuvveti matrisi (*El_force)* ve düğüm noktası deplasman matrisine (*NDSP)* atanır.

- **Constraints**

Eleman uç kuvvetleri ilgili elemanın enkesit alanına bölünerek her eleman için gerilme değeri hesaplanır. Definemodel'de belirlenen sınırlayıcılara ait alt ve üst sınır değerlere göre eleman gerilme ve düğüm noktası deplasman değerleri, sınır değerlerle denklem (3.52) ve (3.53) 'te gösterildiği gibi karşılaştırılır. Sınır değerlerin ihlal edilmesi durumunda ceza değeri hesaplanır, gerilme ve deplasman ihlali için hesaplanan cezalar toplanarak toplam ceza değeri elde edilir (Denklem 3.51).

- **PunishedWeight**

Önceki adımda hesaplanan toplam ceza değeri ile Trussweight alt programında hesaplanan ağırlık değerleri beraber kullanılarak cezalandırılmış amaç fonksiyonu elde edilir (Denklem 3.50). Bu bölümden sonra iterasyon başlar ve maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar döngü devam eder. Şekil 3.10.'daki *iter* parametresi, iterasyon sayısının ekranda görülmesini sağlar.

- **UpdateVariables**

UpdateVariables, optimizasyon işleminin bir diğer alt programıdır. Bu adımda tasarım değişkenleri güncellenmektir. Güncellenen tasarım değişkenleri her bir iterasyonda yeniden analiz edilerek sonuçlar değerlendirildiğinden bu alt program içinde Trussweight, StaticAnalyse, ReadAnalyse, Constraints ve PunishedWnew tekrar çalıştırılmaktadır.

Öncelikle popülasyondaki tüm kafes tasarımlara ait elde edilen cezalandırılmış amaç fonksiyonları arasında en küçük olan belirlenir. Bu amaç fonksiyonuna ait tasarım değişkenleri (enkesit alanları) A_{best} değişkenine atanır. Aynı şekilde cezalandırılmış amaç fonksiyonlarından en büyük olan belirlenir ve bu amaç fonksiyonuna ait enkesit alanları A_{worst} değişkenine atanır. A_{best} ve A_{worst} belirlendikten sonra tüm tasarım değişkenleri denklem (3.54) kullanılarak ayrı ayrı modifiye edilir. Modifiye edilen tasarım değişkenleri daha önceden belirlenen sınır değerler arasında olmalıdır. Yeni enkesit alanları ile yeni tasarıma ait ağırlık değeri, statik analiz, analiz sonuçlarının okunması ve sınırlayıcı kontrolü yapılacağından Trussweight, StaticAnalyse, ReadAnalyse, Constraints ve PunishedWnew altprogramları bu bölümün içinde yeniden çalıştırılır. Yeni tasarımlara ait cezalandırılmış amaç fonksiyonları arasında en küçük olanın enkesit alanları tekrardan A_{best} değişkenine, en büyük olanın enkesit alanları ise A_{worst} değişkenine atanır. Bu döngü maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam eder. Şekil 3.13.'teki *PWnew* değişkeni, modifiye edilen enkesit alanlarına göre hesaplanan cezalandırılmış amaç fonksiyonu değerleri olup her iterasyonda ekranda gösterilmek üzere yazılmıştır.

- **RecordOptWeight**

Optimizasyon işleminde toplam ceza değerinin sıfır olması $(\psi(A) = 0)$, elde edilen değerin tüm sınırlayıcıları sağladığı anlamına gelmektedir. Bir başka deyişle hesaplanan kafes yapı ağırlık değeri ile cezalandırılmış ağırlık değeri birbirine eşit demektir. Optimizasyon işleminin RecordOptWeight altprogramı, her iterasyonda sınırlayıcıları sağlayan tasarımın analiz sayısının, ağırlık değerinin ve bu tasarıma ait enkesit alanlarının optimum olarak atanması ve TXT formatında kaydedilmesi işlevini görür. Ancak sınırlayıcıları sağlayan her değer kaydedilmez. Ceza fonksiyonu sıfır olan değerlerin kaydedilmesi için daha önceden kaydedilen optimum ağırlık değerinden de küçük olmalıdır. Bu işlem maksimum iterasyon sayısına kadar devam eder. Optimizasyon işlemi bittikten sonra kaydedilen en son değer, aranan optimum tasarımdır.

- **PlotModelandGraphic**

Optimizasyon programının son kısmı olan PlotModelandGraphic alt programı, optimizasyon işlemi bittikten hemen sonra çalışır. Optimizasyon işlemi sonucunda RecordOptWeight altprogramında optimum değişkenlere atanan analiz sayısı ve bu analiz sayısında bulunan optimum ağırlık değerine göre kafes ağırlığının analiz sayısına göre değişim grafiğinin çizilmesi işlevini görür. Böylelikle kafes yapının optimizasyon işlemi tamamlanmış olur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Jaya algoritmasının gücünü görmek amacıyla bu bölümde beş tanesi sürekli, altı tanesi ayrık tasarım değişkenli olmak üzere on bir adet tasarım örneği optimize edilerek boyutlandırılmıştır.

4.1. Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapı Örnekleri

Bu bölümde sürekli tasarım değişkenli 10 ve 200 elemanlı iki düzlem kafes, 25, 72 ve 942 elemanlı üç uzay kafes yapı optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar HBB-BC (Kaveh ve Talatahari 2009a), HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009b), ABC-AP (Sonmez 2011a), SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013) , MSPSO (Talatahari ve ark. 2013), CA (Jalili ve Hosseinzadeh 2015) , HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) , FPA (Bekdaş ve ark. 2015) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) yöntemleriyle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. JA ile optimizasyon, rastgele üretilen 20 kafes yapı ile başlatılmış ve her bir tasarım örneğinde her seferinde 20 farklı başlangıç tasarımı üretilmek üzere 20 farklı nihai tasarım bulunmuştur. Her örnekte bulunan bu 20 farklı kafes yapı tasarımı arasında en hafif tasarım ve bunun elde edilmesi için gerekli yapı analiz sayısı, en ağır tasarım, ortalama ağırlık ve standart sapma gibi istatistiksel değerler ve ayrıca sınırlayıcı ihlal yüzdeleri çizelgelerde verilmiştir. Geliştirilen optimizasyon programı, MATLAB programlama dilinde kodlanmış ve Intel® Pentium Core i7-4702MQ 2.2 GHz CPU işlemci özelliklerine sahip bilgisayarda icra edilmiştir.

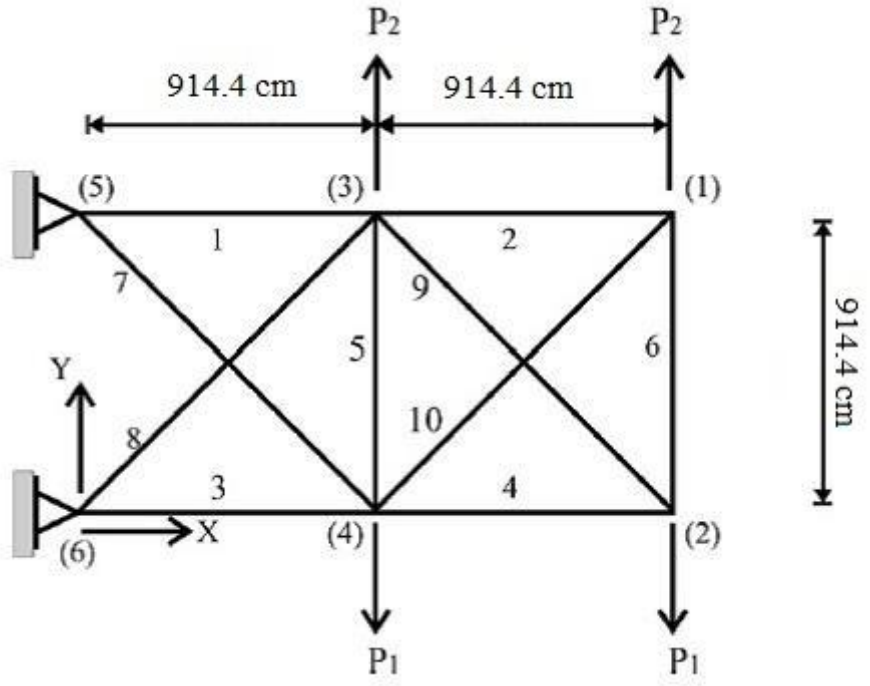
JA' da kullanılan tek parametre popülasyon sayısıdır (*np*). En uygun popülasyon sayısını bulmak amacıyla 10 elemanlı düzlem kafes ve 25 elemanlı uzay kafes yapılar farklı *np* değerleri için optimize edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.1.'de sunulmuştur. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi her iki kafes yapı için en hafif tasarım, popülasyon sayısının 20 olduğu durumda elde edilmiş ve bu sonuca uygun olarak tüm kafes yapılar için popülasyon sayısı np=20 alınmıştır.

Çizelge 4.1. JA'da farklı popülasyon sayıları için elde edilen optimum tasarım sonuçları

Popülasyon sayısı (*np*)	10 elemanlı kafes I. yükleme durumu		10 elemanlı kafes II. yükleme durumu		25 elemanlı kafes	
	Ağırlık (kg)	Yapı analiz sayısı	Ağırlık (kg)	Yapı analiz sayısı	Ağırlık (kg)	Yapıl analiz sayısı
10	2295.582	15100	2121.571	18965	247.2805	12619
20	2295.581	15133	2121.569	17227	247.2805	12214
30	2295.618	29659	2122.001	19074	247.2828	13308
40	2295.844	18670	2122.454	17223	247.2977	9707
50	2296.039	19276	2122.585	19746	247.2823	18735
60	2296.088	16067	2122.559	15265	247.2841	17827

4.1.1. 10 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı

10 elemanlı düzlem kafes yapı, oldukça popüler bir örnek olarak birçok yöntemle yapılan optimizasyon işleminde kullanılmıştır. 10 elemanlı kafes yapının geometrisi Şekil 4.1.' de verilmiştir. Kafes yapıda, malzeme birim hacim ağırlığı ve elastisite modülü sırasıyla 2.77 gr/cm^3 ve 68948 MPa'dır. Kafes yapı elemanlarında çekme ve basınç kuvvetlerine maruz elemanlar için gerilme sınır değeri ±172.37 MPa'dır. Mesnetler haricindeki düğüm noktaları için yatay ve düşey doğrultuda deplasman sınır değeri ± 5.08 cm'dir. Kafes yapıya etkiyen iki farklı yükleme durumu bulunmaktadır. I. yükleme durumunda P_1=444.82 kN ve P_2=0; II. yükleme durumunda P_1=667.23 kN ve P_2= 222.41 kN şeklindedir. Her bir eleman optimizasyon probleminde bir tasarım değişkeni olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla 10 eleman grubu (tasarım değişkeni) bulunmaktadır. Tasarım değişkenlerine atanacak enkesit alanları, minimum 0.645 cm^2 olacak şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. 10 elemanlı düzlem kafes yapı

Çizelge 4.2. ve 4.3'de sırasıyla I. ve II. yükleme durumları için JA ile bulunan optimum tasarım sonuçları diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. JA ve diğer yöntemlere ait istatistiksel değerler ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri Çizelge 4.4'de sunulmuştur. JA ile elde edilen sonuçlar I. yükleme durumu için 15133 analiz sonrasında 2295.581 kg, II. yükleme durumunda ise 17227 analiz sonrasında 2121.569 kg şeklindedir. I. durum için JA'nın, SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), MSPSO (Talatahari ve ark. 2013) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) ile elde edilen sonuçlardan daha hafif olduğu görülmektedir. ABC-AP (Sonmez 2011a) yöntemiyle 500000 yapı analizinde optimum değer bulunmuşken JA ile sadece 15133 yapı analizi sonunda optimum değer bulunmuştur. Ayrıca JA'nın tasarım sınırlayıcılarını sağladığı buna karşın HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009b) yöntemiyle elde edilen sonuçların sınırlayıcıları ihlal ettiği Çizelge 4.4'te görülmektedir. Optimizasyon sürecinde yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi incelendiğinde JA'nın, 2295.80 kg (SAHS ile bulunan optimum ağırlık değeri) ve 2995.601 kg (TLBO ile bulunan optimum ağırlık değeri) değerlerini sırasıyla 9473 ve 14641 yapı analizi sonucunda bulduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç JA'nın en az SAHS (Degertekin 2012) ve TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013) kadar hızlı bir yöntem

olduğunu kanıtlamaktadır. Çizelge 4.3. incelendiğinde II. yükleme durumu için, JA'nın SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) yöntemlerinden daha hafif sonuç elde ettiği görülmektedir. ABC-AP (Sonmez 2011a) yöntemi ile JA'ya göre daha hafif sonuç elde edilmesine karşın JA, optimum tasarımı 17227 yapı analizi sonunda bulurken ABC-AP (Sonmez 2011a) yöntemi, optimum tasarımı bulmak için 500000 yapı analizi gerektirmiştir. Çizelge 4.4'te de belirtildiği gibi II. yükleme durumu için JA tasarım sınırlayıcılarını sağlarken HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009b) ve HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) yöntemlerinin bu sınırlayıcıları ihlal ettiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2. 10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. yükleme durumu)

Tasarım Değişkenleri	(Kaveh ve Talatahari 2009b)	(Sonmez 2011a)	(Degertekin 2012)	(Degertekin ve Hayalioglu 2013)	(Talatahari ve ark. 2013)	(Kaveh ve ark. 2014)	(Kaveh ve Bakhshpoori 2016)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	HPSACO	ABC-AP	SAHS	TLBO	MSPSO	HPSSO	WEO	JA
A_1	195.5286	197.0835	196.0899	196.3132	196.9396	197.3144	197.2609	196.7564
A_2	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.645805	0.64516	0.64516	0.64516
A_3	151.1868	149.5481	149.0191	149.9584	149.8384	149.3612	150.5597	149.4791
A_4	100.0321	98.18045	99.94174	99.14625	99.42819	98.10084	97.7398	98.434
A_5	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.645805	0.64516	0.64516	0.64516
A_6	3.381284	3.554832	3.412896	3.710315	3.601928	3.541264	3.403864	3.67096
A_7	47.97732	48.14829	48.30958	48.00248	47.99668	48.16327	48.03732	48.07732
A_8	135.9933	135.8578	136.703	135.2675	134.9494	135.8989	135.4139	135.3784
A_9	136.961	138.7159	137.69	138.9223	138.7726	138.8988	138.8617	139.2881
A_{10}	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516
Ağırlık (kg)	2293.605	2295.565	2295.809	2295.601	2295.619	2295.555	2295.614	2295.581 [2295.809][1] [2295.601][2]
Yapı analiz sayısı	10650	500×10^3	7081	16872	N/A	14118	19540	15133

[1]JA ile 2295.809 kg (SAHS'ye ait optimum ağırlık değeri) 9473 analizde bulunmuştur.
[2]JA ile 2295.601 kg (TLBO'ya ait optimum ağırlık değeri) 14641 analizde bulunmuştur.

Çizelge 4.3. 10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. yükleme durumu)

Tasarım Değişkenleri	(Kaveh ve Talatahari 2009b)	(Sonmez 2011a)	(Degertekin 2012)	(Degertekin ve Hayalioglu 2013)	(Talatahari ve ark. 2013)	(Kaveh ve ark. 2014)	(Kaveh ve Bakhshpoori 2016)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	HPSACO	ABC-AP	SAHS	TLBO	MSPSO	HPSSO	WEO	JA
A_1	149.6384	151.4139	151.7739	151.7674	151.2461	151.766	152.1313	151.1649
A_2	0.64516	0.648386	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.647095	0.655483
A_3	158.6126	162.8339	164.0577	164.1352	163.6887	163.6683	162.3106	163.3648
A_4	91.7482	92.60627	93.47078	93.41272	91.19982	92.76104	91.48433	92.81207
A_5	0.64516	0.645805	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.64645	0.64516
A_6	12.7032	12.7103	12.85159	12.87094	12.70901	12.70792	12.71481	12.7361
A_7	80.57403	80.08242	79.69016	79.57403	80.21597	79.7921	80.32952	79.86178
A_8	83.38693	83.17725	81.92242	81.86435	83.98241	82.56254	83.4508	82.80177
A_9	135.1739	131.1888	131.232	131.3159	130.7849	131.1337	131.3514	131.4436
A_{10}	0.651612	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.64516	0.645805	0.64516
Ağırlık (kg)	2120.887	2121.475	2122.275	2122.035	2121.558	2121.418	2121.581	2121.569 [2122.275][1] [2122.035][2] [2121.581][3]
Yapı analiz sayısı	9925	500×10^3	7267	14857	14406	14406	19890	17227

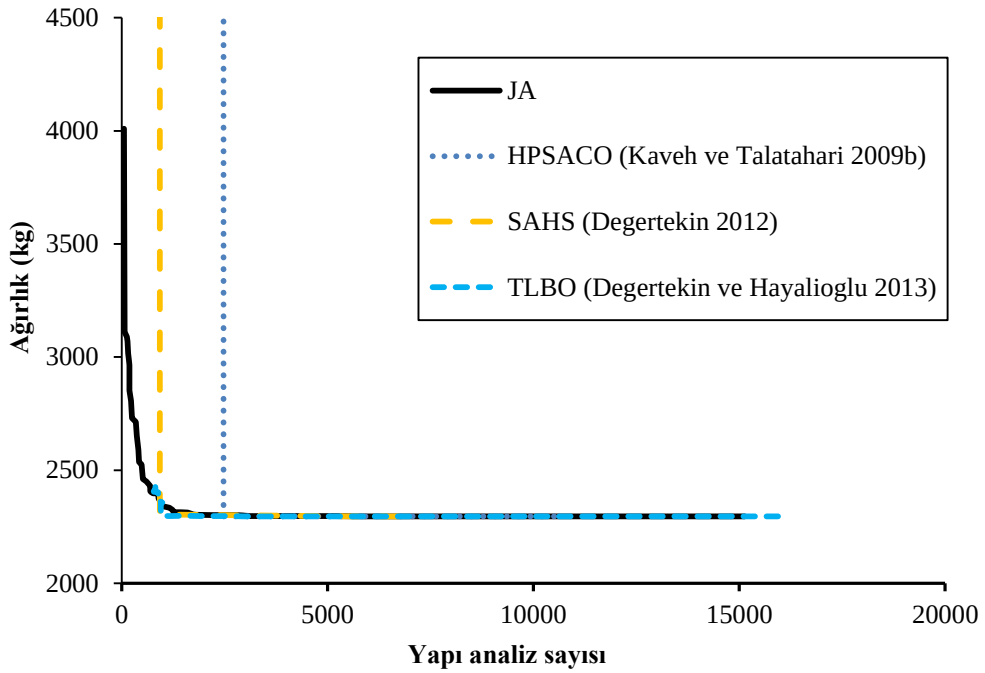
[1]JA ile, 2122.275 kg (SAHS'ye ait optimum ağırlık değeri) 12552 analizde bulunmuştur.
[2]JA ile, 2122.035 kg (TLBO'ya ait optimum ağırlık değeri) 13439 analizde bulunmuştur.
[3]JA ile, 2121.581 kg (WEO'ya ait optimum ağırlık değeri) 13620 analizde bulunmuştur.

Çizelge 4.4. 10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapıda I. ve II. yükleme durumları için istatistiksel değerlerin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

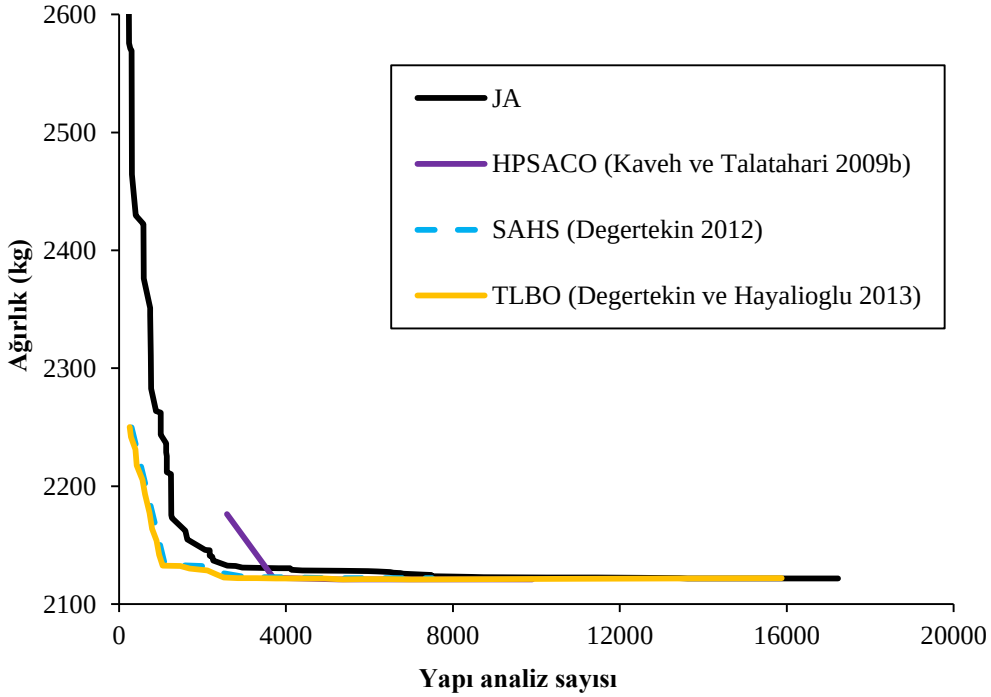
Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
I. yükleme durumu					
HPSACO	2293.605	2294.104	2295.673	0.644	0.099
ABC-AP	2295.565	*	2295.596	*	0
SAHS	2295.809	2296.05	2296.703	0.322	0
TLBO	2295.601	2296.109	2296.63	0.358	0
MSPSO	2295.619	2297.188	2303.33	2.595	0
HPSSO	2295.555	2296.2	2302.831	1.962	0
WEO	2295.614	2296.113	2710.386	0.930	0
JA	2295.581	2295.643	2295.77	0.0617	0
II. yükleme durumu					
HPSACO	2120.887	*	*	*	0.079
ABC-AP	2121.477	*	2121.581	*	0
SAHS	2122.275	2122.837	2123.826	0.857	0
TLBO	2122.035	2122.856	2123.359	0.461	0
MSPSO	2121.558	2123.459	2126.203	0.993	0
HPSSO	2121.418	2121.613	2122.674	0.210	0.00142
WEO	2121.581	2122.375	2126.657	0.939	0
JA	2121.569	2121.812	2122.105	0.146	0

* Mevcut değil

10 elemanlı düzlem kafes yapının I. ve II. yükleme durumları için optimizasyon sürecinde kafes yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimini gösteren yakınsama eğrileri Şekil 4.2 ve 4.3.'te literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu eğrilerden JA'nın optimum tasarımı bulmada HPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009b) yöntemi haricindeki diğer yöntemlere göre daha güçlü bir yakınsama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. 10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. yükleme durumu)



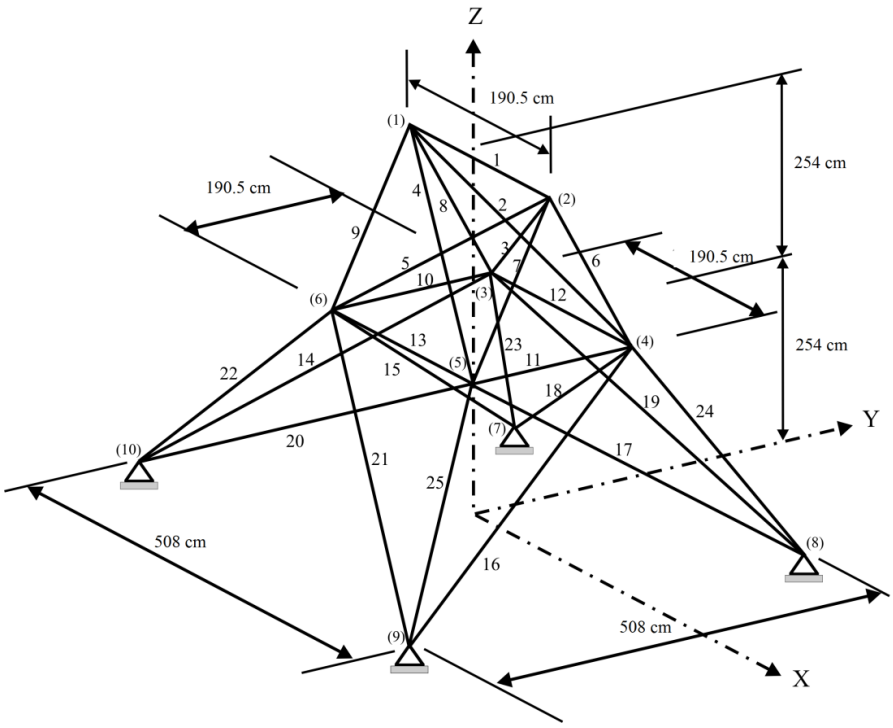
Şekil 4.3. 10 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. yükleme durumu)

4.1.2. 25 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Uzay Kafes Yapı

25 elemanlı uzay kafes yapının geometrisi ve düğüm noktası numaralandırması Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı sırasıyla 68948 MPa ve 2.77 gr/cm^3'tür. Bu yapı için sekiz farklı tasarım değişkeni (eleman grubu) belirlenmiştir. Her eleman grubu için çekme ve basınç gerilmelerine ait sınır değerler Çizelge 4.5.'teki gibidir. Tasarım değişkenlerine atanabilecek minimum enkesit alanı 0.0645 cm^2'dir. Her düğüm noktası için deplasman sınır değeri ±8.89 mm olarak tanımlanmıştır. Kafes yapıya etkiyen iki farklı yükleme durumu aşağıdaki gibidir:

Yükleme durumu I: 1 nolu düğüm noktasına pozitif *y* yönünde ve 2 nolu düğüm noktasına negatif *y* yönünde 88.96 kN ile 1 ve 2 nolu düğüm noktalarına negatif *z* yönünde 22.24 kN etki ettirilmiştir.

Yükleme durumu II: 1 nolu düğüm noktasına pozitif *x* yönünde 4.448 kN, 1 ve 2 nolu düğüm noktalarına pozitif *y* yönünde 44.48 kN ve negatif *z* yönünde 22.24 kN, 3 ve 6 nolu düğüm noktalarına pozitif *x* yönünde 2.224 kN etki ettirilmiştir.



Şekil 4.4. 25 elemanlı uzay kafes yapı

Çizelge 4.5. 25 elemanlı uzay kafes yapıda eleman gerilme sınır değerleri

Tasarım değişkenleri	Basınç gerilmesi için sınır değerler	Çekme gerilmesi için sınır değerler
A_i (cm^2)	(MPa)	(MPa)
A_1	241.951	275.790
A_2-A_5	79.910	275.790
A_6-A_9	119.314	275.790
A_{10}-A_{11}	241.951	275.790
A_{12}-A_{13}	241.951	275.790
A_{14}-A_{17}	46.602	275.790
A_{18}-A_{21}	47.981	275.790
A_{22}-A_{25}	76.408	275.790

JA ve diğer optimizasyon metotlarından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6.'da sunulmuştur. JA yöntemiyle optimum ağırlık 247.2805 kg olarak 12214 analizde elde edilmiştir. JA ve diğer yöntemlerin istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Çizelge 4.7.'de gösterildiği üzere SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), CA (Jalili ve Hosseinzadeh 2015), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) ve FPA (Bekdaş ve ark. 2015) yöntemleriyle elde edilen optimum ağırlık değerleri JA ile bulunan değerden daha hafif olmasına rağmen sınırlayıcıları ihlal ettiğinden, JA'dan elde edilen sonuç daha iyi ve geçerlidir. Ayrıca JA'nın standart sapma değerinin (0.00338 kg), diğer yöntemlere kıyasla çok daha küçük olması, JA'nın optimum tasarım bulmada tutarlı ve sağlam bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6. 25 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Tasarım Değişkenleri	(Sonmez 2011a)	(Degertekin 2012)	(Degertekin ve Hayalioglu 2013)	(Talatahari ve ark. 2013)	(Jalili ve Hosseinzadeh 2015)	(Kaveh ve ark. 2014)	(Bekdaş ve ark. 2015)	(Kaveh ve Bakhshpoori 2016)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	ABC-AP	SAHS	TLBO	MSPSO	CA	HPSSO	FPA	WEO	JA
A_1	0.0710	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645
A_2-A_5	12.7677	13.3806	13.3626	12.8051	13.0364	12.8432	11.8116	12.3767	12.7907
A_6-A_9	19.3742	19.1032	19.0774	19.3264	19.4666	19.2780	20.5380	19.3696	19.3548
A_{10}-A_{11}	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645
A_{12}-A_{13}	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645
A_{14}-A_{17}	4.4516	4.4581	4.4458	4.4206	4.4763	4.4026	4.5271	4.4045	4.4178
A_{18}-A_{21}	10.8322	10.4322	10.4574	10.8245	10.5433	10.8155	11.1393	10.8245	10.8234
A_{22}-A_{25}	17.1096	17.2516	17.2696	17.1606	17.1146	17.1974	16.5890	17.1690	17.1561
Ağırlık (kg)	247.2941	247.261	247.2474	247.2846	247.2292	247.2809	247.2787	247.2818	247.2805 [247.2941][1] [247.2846][2] [247.2818][3]
Analiz sayısı	300 000	9051	15318	10800	9380	13326	8149	19750	12214

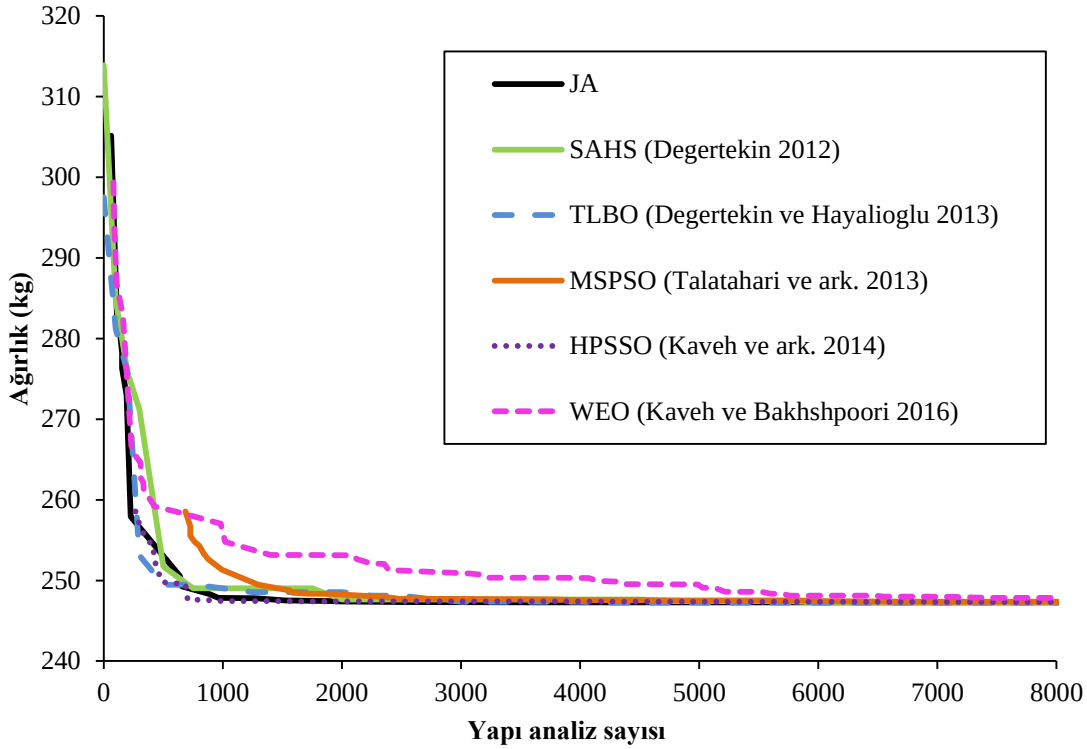
[1]JA ile 247.2941 kg (ABC-AP'ye ait optimum ağırlık değeri) 3665 analizde bulunmuştur.
[2]JA ile 247.2846 kg (MSPSO'ya ait optimum ağırlık değeri) 4270 analizde bulunmuştur.
[3]JA ile 247.2818 kg (WEO'ya ait optimum ağırlık değeri) 7757 analizde bulunmuştur.

Çizelge 4.7. 25 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
ABC-AP	247.2927	*	247.3336	*	0
SAHS	247.261	247.6329	247.9323	0.412767	2.98
TLBO	247.2474	247.3925	247.8098	0.190508	2.75
MSPSO	247.2846	247.6737	248.9211	0.362872	0
CA	247.2292	247.6284	*	0.703065	2.37
HPSSO	247.2809	247.4587	248.1092	0.195951	0.0013
FPA	247.2787	247.5377	*	0.267618	0.138
WEO	247.2818	247.3091	247.4751	0.037648	1.168
JA	247.2805	247.2859	247.3068	0.003384	0

* Mevcut değil.

Optimum tasarım arama sürecinde yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi JA ve literatürdeki bazı yöntemler için Şekil 4.5.'te çizilmiştir. Şekil 4.5.'e göre, JA'nın SAHS (Degertekin 2012), MSPSO (Talatahari ve ark. 2013) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) yöntemlerine göre daha hızlı bir şekilde optimum tasarımı bulduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. 25 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi

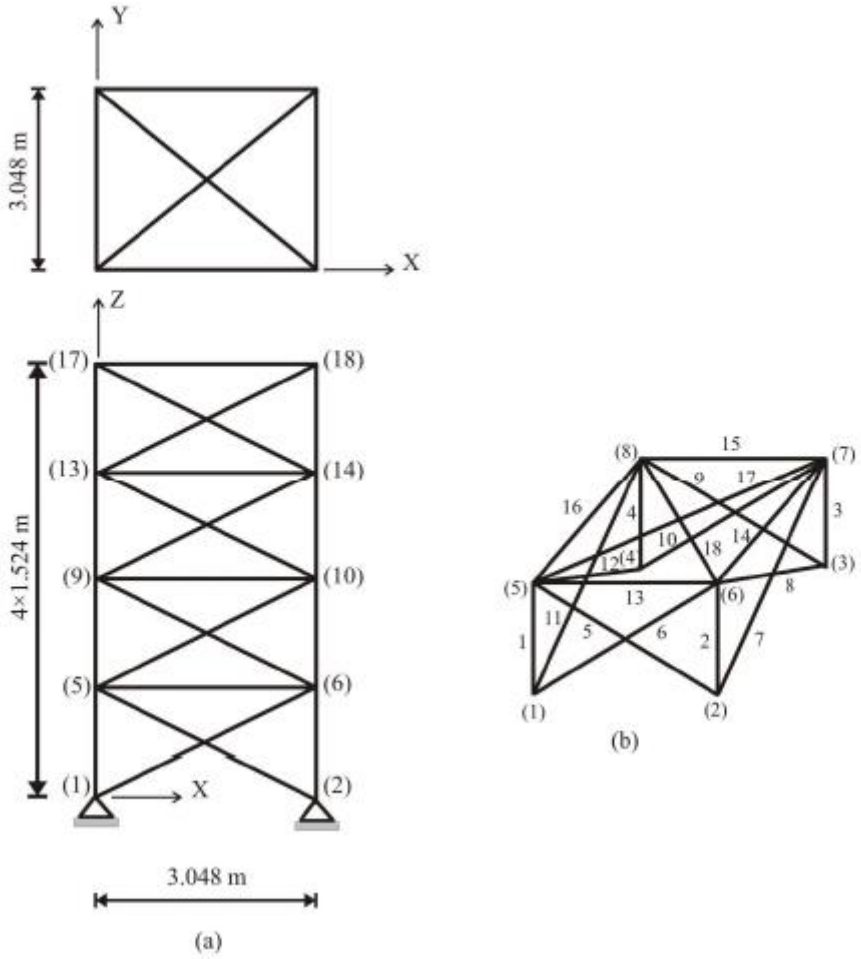
4.1.3. 72 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Uzay Kafes Yapı

72 elemanlı uzay kafes yapının geometrisi ve I. kat için eleman ve düğüm noktası numaralandırılması Şekil 4.6.'da gösterilmiştir. Malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı sırasıyla 68948 MPa ve 2.77 gr/cm^3'tür. Kafes yapıda (1) A_1-A_4, (2) A_5-A_{12}, (3) A_{13}-A_{16}, (4) A_{17}-A_{18}, (5) A_{19}-A_{22}, (6) A_{23}-A_{30}, (7) A_{31}-A_{34}, (8) A_{35}-A_{36}, (9) A_{37}-A_{40}, (10) A_{41}-A_{48}, (11) A_{49}-A_{52}, (12) A_{53}-A_{54}, (13) A_{55}-A_{58}, (14) A_{59}-A_{66}, (15) A_{67}-A_{70}, (16) A_{71}-A_{72} şeklinde 16 farklı tasarım değişkeni (eleman grubu) mevcuttur. Yapıya etkiyen iki farklı yükleme durumu aşağıdaki gibidir:

Yükleme durumu I: 17 nolu düğüm noktasına pozitif *x*, pozitif *y* ve negatif *z* yönlerinde 22.24 kN etki ettirilmiştir.

Yükleme durumu II: 17, 18, 19 ve 20 nolu düğüm noktalarına negatif *z* yönünde 22.24 kN etki ettirilmiştir.

Bütün elemanlarda çekme ve basınç durumu için gerilme sınır değeri ±172.369 MPa, düğüm noktaları için deplasman sınır değeri ise ±0.635 cm'dir. Tasarım değişkenlerine atanacak enkesit alanlarına göre iki farklı optimizasyon durumu göz önüne alınacaktır. I. optimizasyon durumu için minimum enkesit alanı 0.645 cm^2, II. optimizasyon durumu için ise minimum enkesit alanı 0.0645 cm^2 olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.6. 72 elemanlı uzay kafes yapı (a) Plan ve yandan görünüş (b) I. kat için eleman ve düğüm noktası numaralandırılması

Çizelge 4.8.'de I. optimizasyon durumu için JA ile elde edilen sonuçlar HBB-BC (Kaveh ve Talatahari 2009a), SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), CA (Jalili ve Hosseinzadeh 2015) ve FPA (Bekdaş ve ark. 2015) yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlere ait istatistiksel değerler ve sınırlayıcı

ihlal yüzdeleri Çizelge 4.9.'de verilmiştir. JA, optimum yapı ağırlığı olarak 172.191 kg değerini 14341 yapı analizinde elde etmiştir. Çizelge 4.9.'da görüldüğü üzere FPA (Bekdaş ve ark. 2015) yöntemiyle elde edilen sonuç diğer yöntemlere kıyasla en hafif tasarım olmasına rağmen %0.2039 değeriyle tasarım sınırlayıcılarını ihlal ettiği göz önüne alınarak JA'nın tasarım sınırlayıcılarını sağlayan en hafif tasarımı elde ettiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.8. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Tasarım değişkenleri	(Kaveh ve Talatahari 2009a)	(Degertekin 2012)	(Degertekin ve Hayalioglu 2013)	(Jalili ve Hosseinzadeh 2015)	(Bekdaş ve ark. 2015)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	HBB-BC	SAHS	TLBO	CA	FPA	JA
A_1-A_4	12.285	12.000	12.134	12.006	12.102	12.153
A_5-A_{12}	3.330	3.361	3.317	3.286	3.329	3.315
A_{13}-A_{16}	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
A_{17}-A_{18}	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
A_{19}-A_{22}	8.117	8.342	8.201	8.148	8.383	8.149
A_{23}-A_{30}	3.248	3.297	3.323	3.251	3.385	3.298
A_{31}-A_{34}	0.645	0.645	0.645	0.645	0.646	0.645
A_{35}-A_{36}	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
A_{37}-A_{40}	3.341	3.219	3.430	3.375	3.207	3.384
A_{41}-A_{48}	3.364	3.232	3.312	3.389	3.283	3.330
A_{49}-A_{52}	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645	0.645
A_{53}-A_{54}	0.650	0.645	0.645	0.662	0.645	0.646
A_{55}-A_{58}	1.010	1.084	1.010	1.006	1.016	1.009
A_{59}-A_{66}	3.497	3.768	3.503	3.571	3.438	3.521
A_{67}-A_{70}	2.666	2.794	2.633	2.711	2.638	2.662
A_{71}-A_{72}	3.714	3.355	3.699	3.623	3.697	3.681
Ağırlık (kg)	172.21	172.6454	172.1973	172.2236	171.9537	172.191 [172.21][1] [172.6454][2] [172.1973][3] [172.2236][4]
Yapı analiz sayısı	13200	13742	21542	18460	9029	14341

[1]JA ile 172.21kg (HBB-BC'ye ait optimum ağırlık değeri) 6016 analizde bulunmuştur.
[2]JA ile 172.645 kg (SAHS'ye ait optimum ağırlık değeri) 2737 analizde bulunmuştur.
[3]JA ile 172.197 kg (TLBO'ya ait optimum ağırlık değeri) 7835 analizde bulunmuştur.
[4]JA ile 172.223 kg (CA'ya optimum ağırlık değeri) 5270 analizde bulunmuştur.

Çizelge 4.9. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. optimizasyon durumu için istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HBB-BC	172.21	173.2033	Mevcut değil	0.544762	0
SAHS	172.6454	173.4619	174.1287	0.625954	0
TLBO	172.1973	172.4549	172.7407	0.185972	0
CA	172.2236	172.7543	Mevcut değil	0.839459	0
FPA	171.9537	172.1528	Mevcut değil	0.123376	0.2039
JA	172.191	172.1921	172.1937	0.000935	0

II. optimizasyon durumunda JA sonuçları, Çizelge 4.10.'da ABC-AP (Sonmez 2011a), SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), MSPSO (Talatahari ve ark. 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Çizelgeden görüleceği gibi, JA ile bulunan kafes yapı ağırlığının tüm yöntemler arasında en iyi değer olduğu görülmektedir. Bu durum için istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri Çizelge 4.11.'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

Tasarım değişkenleri	(Sonmez 2011a)	(Degertekin 2012)	(Degertekin ve Hayalioglu 2013)	(Talatahari ve ark. 2013)	(Kaveh ve ark. 2014)	(Kaveh ve Bakhshpoori 2016)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	ABC-AP	SAHS	TLBO	MSPSO	HSSO	WEO	JA
A_1-A_4	12.1980	12.1871	12.2122	12.2613	12.2146	12.0116	12.1980
A_5-A_{12}	3.3329	3.3548	3.3290	3.2619	3.2976	3.3587	3.3329
A_{13}-A_{16}	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0677	0.0645
A_{17}-A_{18}	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645
A_{19}-A_{22}	8.3664	8.3161	8.3335	8.3316	8.3305	8.0355	8.3664
A_{23}-A_{30}	3.3490	3.3806	3.3393	3.3277	3.3233	3.3400	3.3490
A_{31}-A_{34}	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0652	0.0645
A_{35}-A_{36}	0.0652	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0645	0.0652
A_{37}-A_{40}	3.3600	3.4774	3.3738	3.3406	3.4586	3.4368	3.3600
A_{41}-A_{48}	3.3406	3.3484	3.3500	3.3471	3.3624	3.2961	3.3406
A_{49}-A_{52}	0.0645	0.0968	0.0645	0.0697	0.0646	0.0645	0.0645
A_{53}-A_{54}	0.6761	0.6774	0.6432	0.7516	0.7153	0.7774	0.6761
A_{55}-A_{58}	1.0806	1.0774	1.0835	1.0703	1.0754	1.0677	1.0806
A_{59}-A_{66}	3.4490	3.4323	3.4577	3.5348	3.4451	3.4819	3.4490
A_{67}-A_{70}	2.8664	2.7419	2.8752	2.8626	2.9272	2.9381	2.8664
A_{71}-A_{72}	3.7439	3.7355	3.7536	3.6252	3.7070	3.8677	3.7439
Ağırlık (kg)	165.0338	165.1294	165.0346	165.0614	165.0424	165.0989	165.0324 [165.1294][1] [165.0346][2] [165.0614][3] [165.0424][4] [165.0989][5]
Yapı analiz sayısı	400 000	12852	17954	18400	13086	19860	14751

[1]JA ile 165.1294 kg (SAHS'ye ait optimum ağırlık değeri) 3934 analizde bulunmuştur.

[2]JA ile 165.0346 kg (TLBO'ya ait optimum ağırlık değeri) 10341 analizde bulunmuştur.

[3]JA ile 165.0614 kg (MSPSO'ya ait optimum ağırlık değeri) 5923 analizde bulunmuştur.

[4]JA ile 165.0424 kg (HPSSO'ya ait optimum ağırlık değeri) 7947 analizde bulunmuştur.

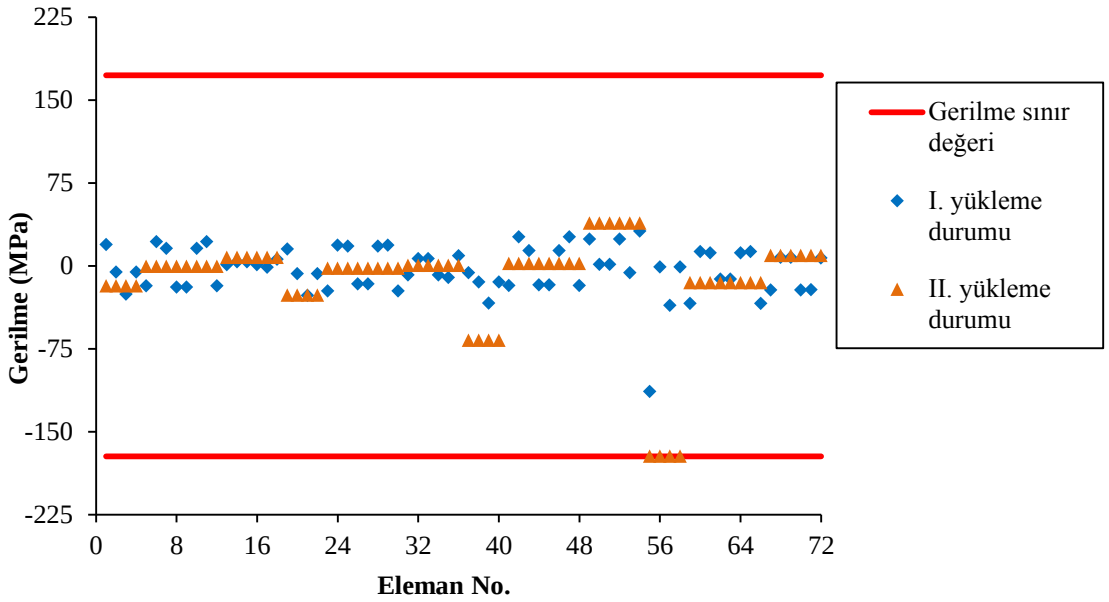
[5]JA ile 165.0989 kg (WEO'ya ait optimum ağırlık değeri) 5427 analizde bulunmuştur.

Çizelge 4.11. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. optimizasyon durumu için istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

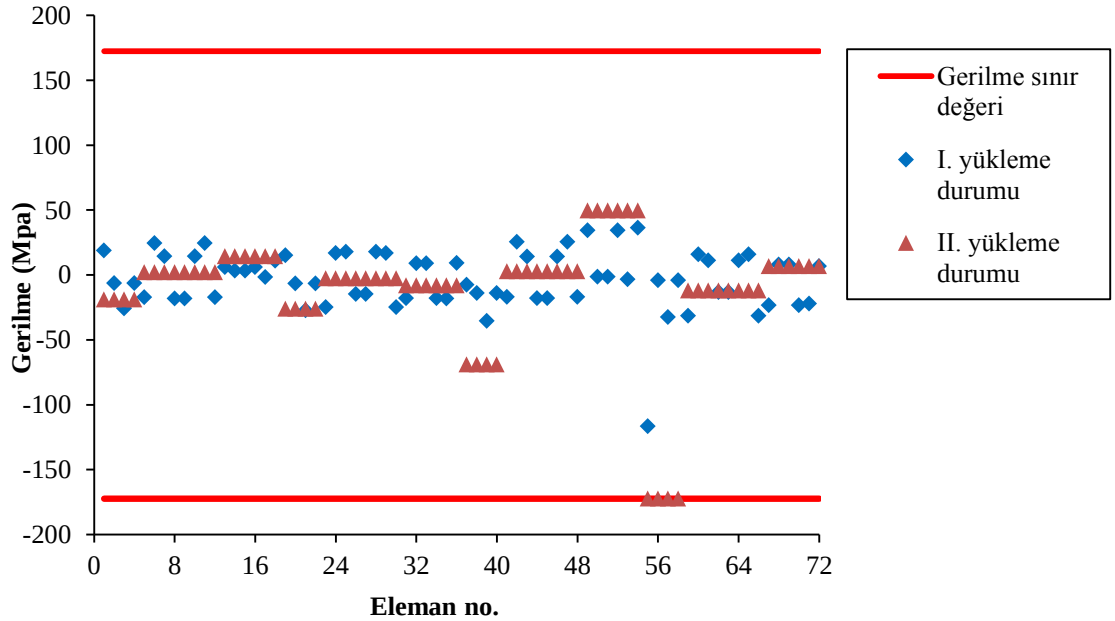
Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
ABC-AP	165.0338	Mevcut değil	Mevcut değil	Mevcut değil	0
SAHS	165.1294	166.2725	167.4427	0.916252	0
TLBO	165.0346	165.2973	165.5649	0.222259	0
MSPSO	165.0614	165.1362	165.9459	0.145149	0.0864
HPSSO	165.0424	165.1362	165.5449	0.138345	0
WEO	165.0989	165.2671	165.511	0.09607	0
JA	165.0324	165.0343	165.0401	0.003117	0

Değinilmesi gereken bir önemli nokta da JA'nın her iki optimizasyon durumunda da diğer yöntemlere göre en küçük standart sapma değerine sahip olmasıdır. Çizelge 4.9. ve Çizelge 4.11. incelendiğinde, diğer yöntemlerin standart sapma değerleri I. durum için 0.123 kg ile 0.839 kg değerleri arasında değişirken JA'da standart sapma değeri yalnızca 0.0031 kg değerinde; II. durum için diğer yöntemlere ait standart sapma değerleri 0.096 kg ile 0.916 kg arasında iken JA'da bu değerin yalnızca 0.00009 kg olduğu görülmektedir. Bu değerler, JA'nın tutarlı bir optimizasyon yöntemi olduğunu göstermektedir.

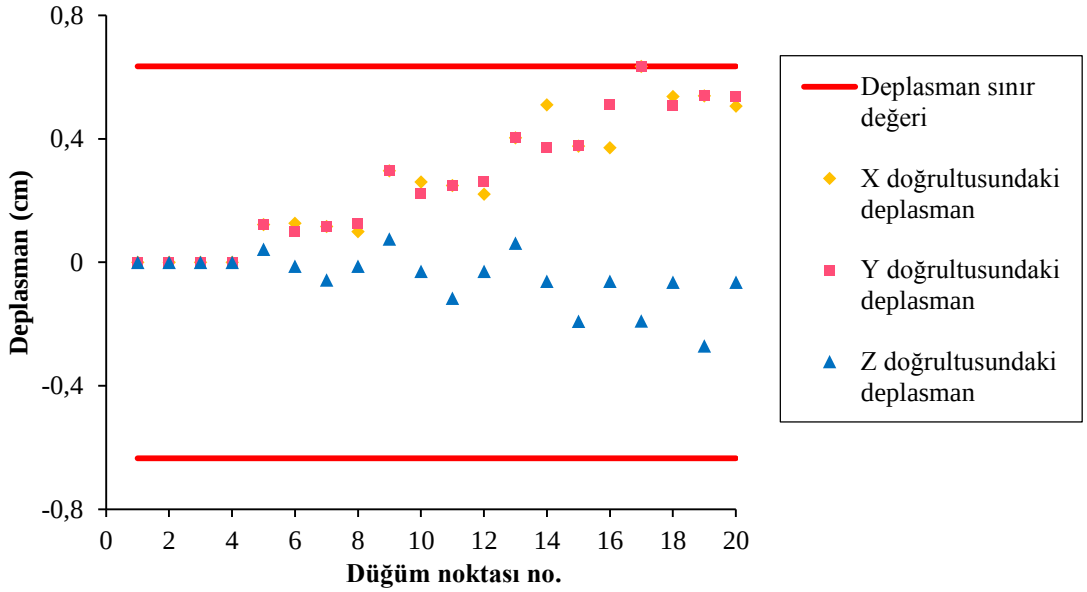
Her iki optimizasyon durumunda da JA ile bulunan optimum tasarımlar için mevcut yükleme durumlarında oluşan eleman gerilmeleri ve düğüm noktası deplasmanlarının sınır değerlere göre karşılaştırmalı grafikleri Şekil 4.7.-4.12.'de gösterilmiştir. Bu şekillerden düğüm deplasman ve eleman gerilme değerlerinin tasarım sınırlayıcılarını sağladığı görülmektedir.



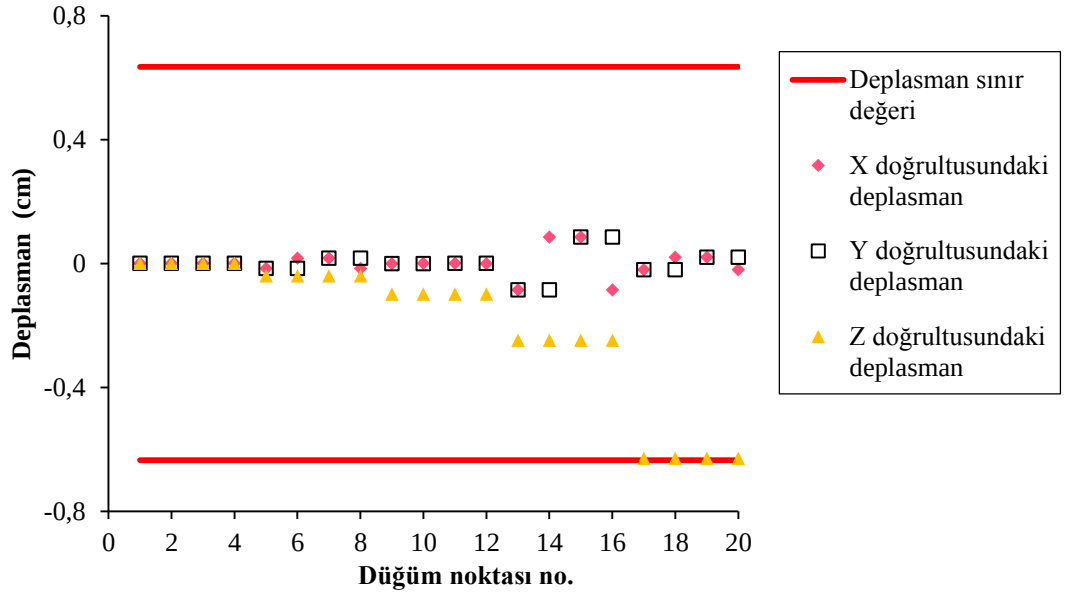
Şekil 4.7. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri (I. optimizasyon durumu)



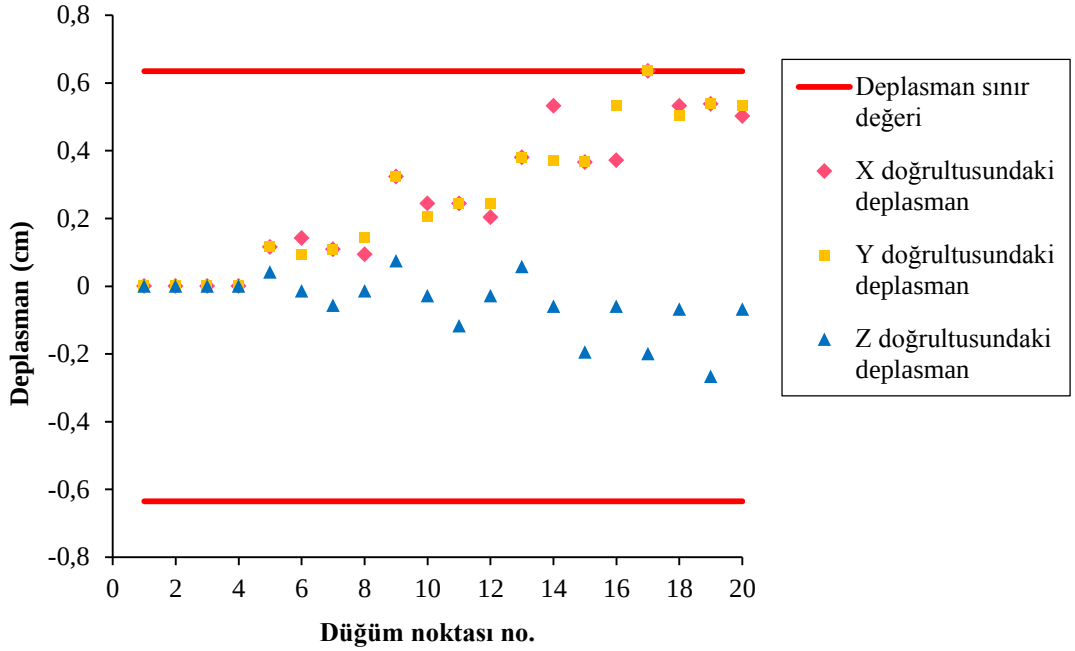
Şekil 4.8. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri (II. optimizasyon durumu)



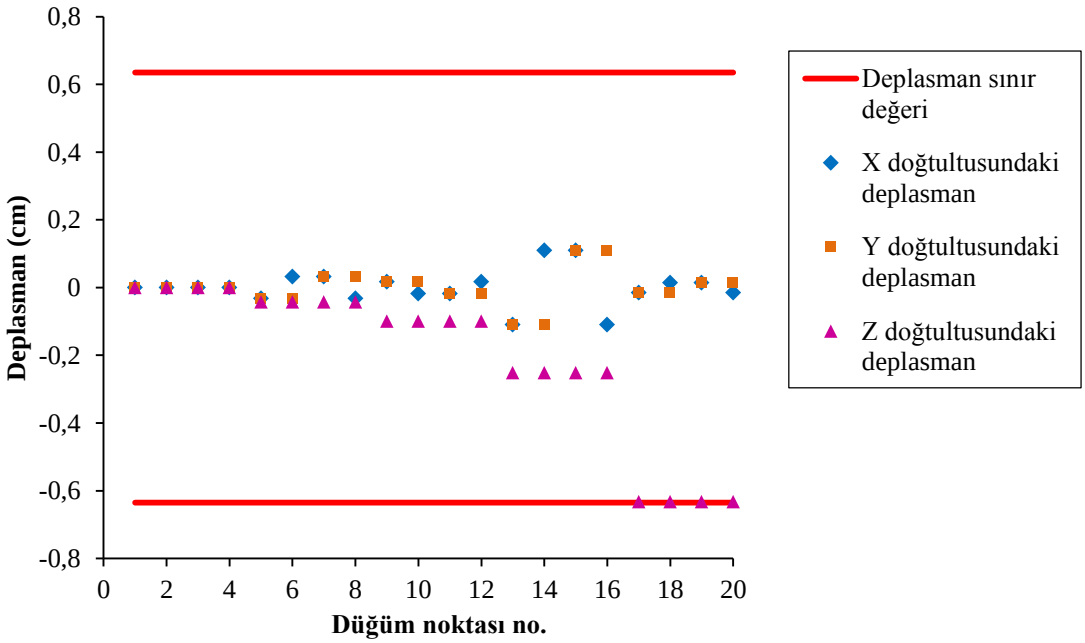
Şekil 4.9. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (I. optimizasyon durumu)



Şekil 4.10. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (I. optimizasyon durumu)



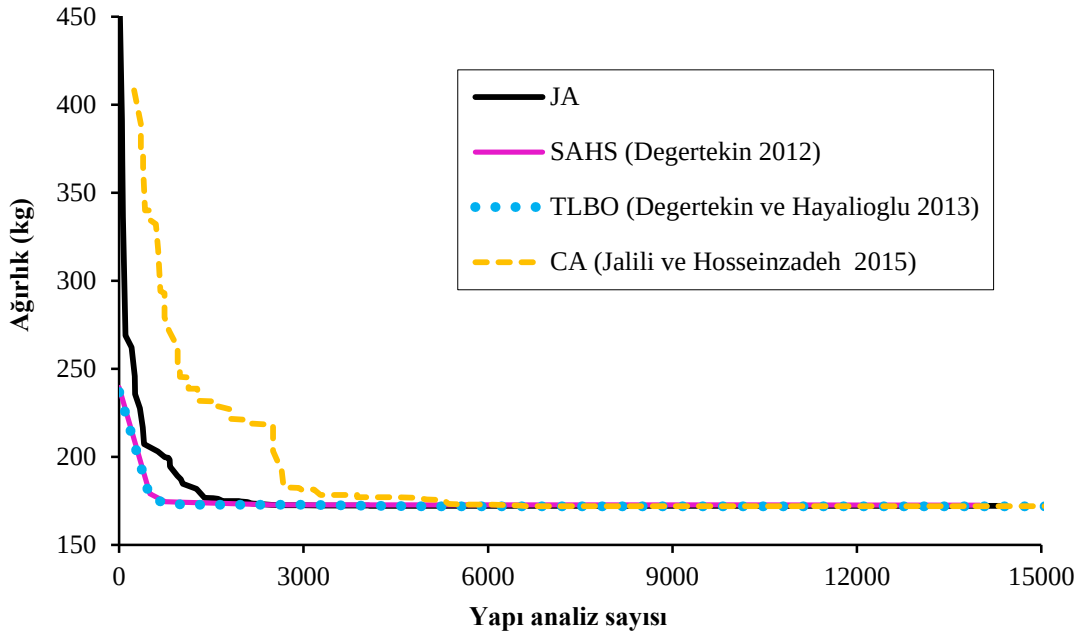
Şekil 4.11. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (II. optimizasyon durumu)



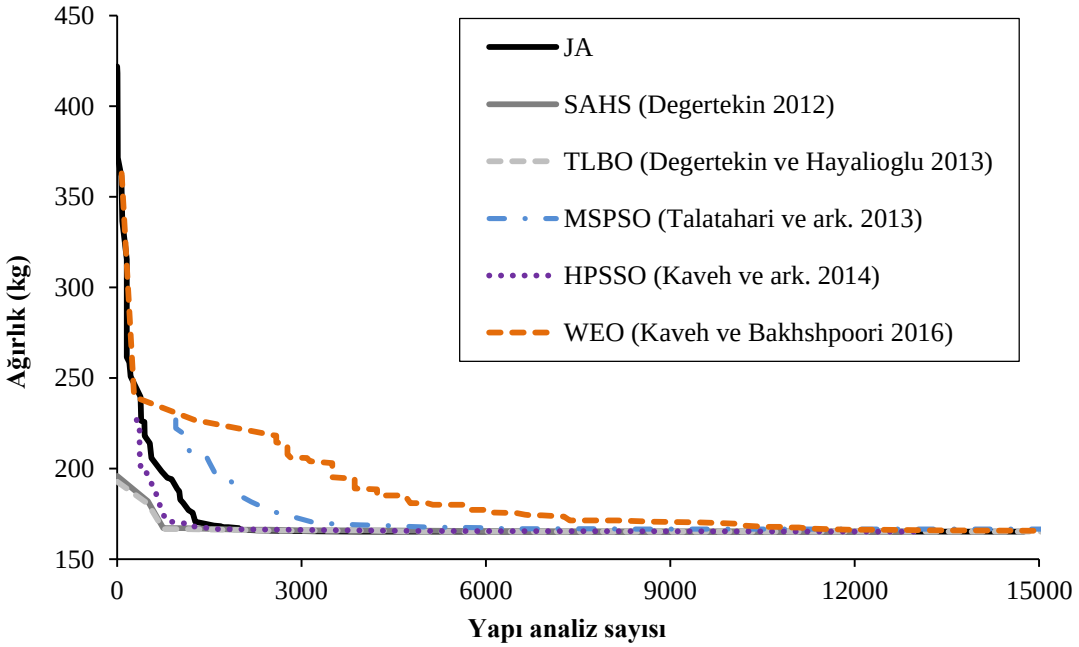
Şekil 4.12. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. yükleme durumunda optimum tasarımı için düğüm deplasman değerleri (II. optimizasyon durumu)

72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. ve II. optimizasyon durumları için yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimini gösteren eğriler Şekil 4.13. ve 4.14.'te verilmiştir. JA ile 15000 analiz sayısına yakın bir değerde optimum tasarım elde edildiğinden dolayı eğriler, yöntemlerin ilk 15000 analize ait değerlerine göre çizilmiştir. Diğer yöntemlere göre JA'nın çok güçlü bir yakınsama eğrisine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.13. ve 4.14.'te de gösterildiği üzere 6000 analiz sayısından itibaren JA, optimum tasarıma çok yakın değerler bulmayı başarmıştır.

Çizelge 4.8.'den JA'nın, HBB-BC (Kaveh ve Talatahari 2009a), SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013) ve CA (Jalili ve Hosseinzadeh 2015)'ya ait sonuçları sırasıyla 6016, 2737, 7835 ve 5270 yapı analizi sonunda bulduğu görülmektedir. Benzer şekilde Çizelge 4.10.'dan JA'nın, SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), MSPSO (Talatahari ve ark. 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) ile bulunan optimum ağırlık değerlerini sırasıyla 3934, 10341, 5923, 7947 ve 5427 yapı analizi sonunda bulduğu görülmektedir. Bu sonuçlar JA'nın kıyaslanan diğer yöntemlere göre daha hızlı bir yöntem olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 4.13. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu)



Şekil 4.14. 72 elemanlı sürekli tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu)

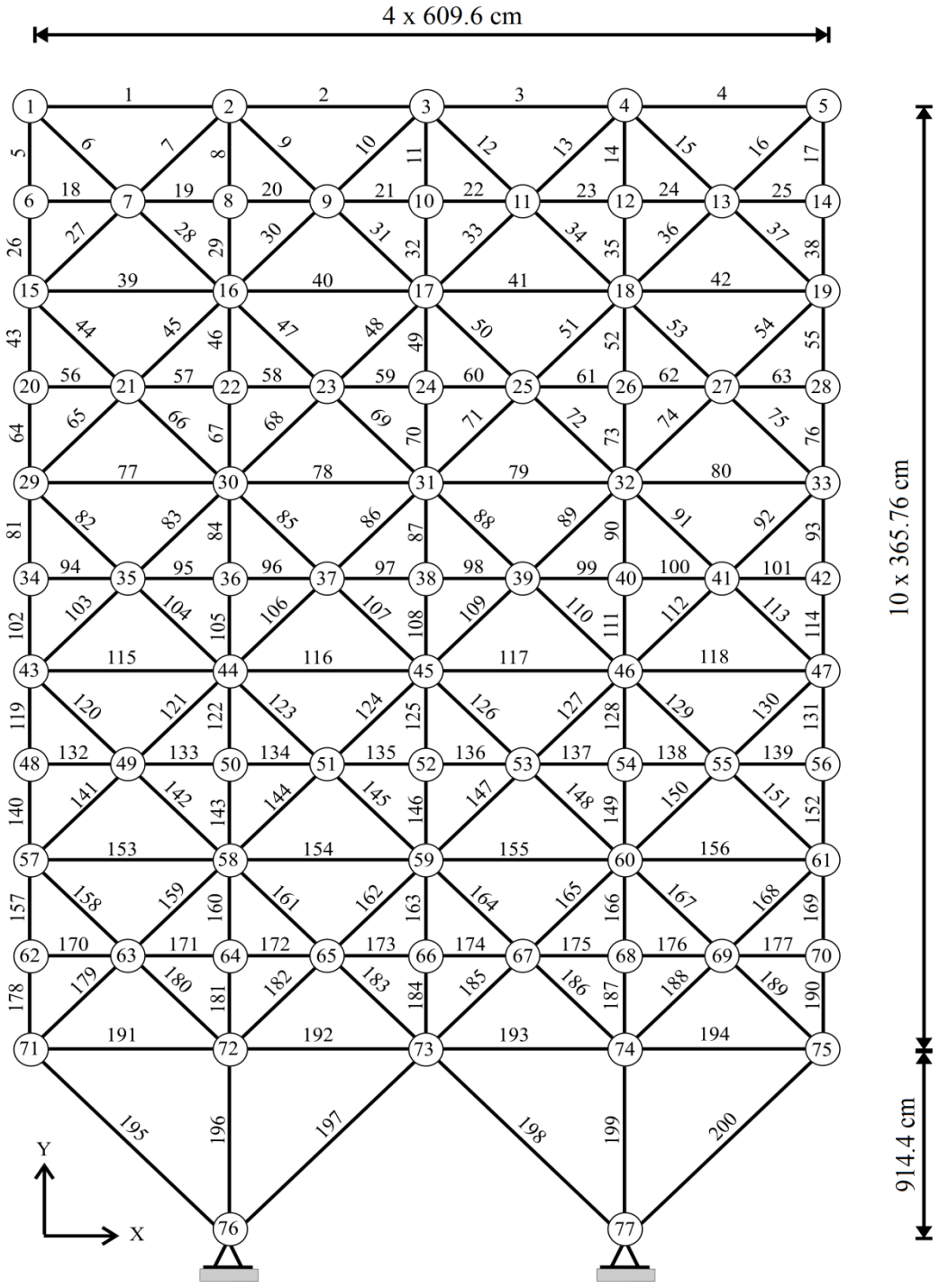
4.1.4. 200 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı

200 elemanlı düzlem kafesin geometrisi, eleman ve düğüm noktası numaralandırması Şekil 4.15.'te verilmiştir. Kafes yapıda malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı sırasıyla 206843 MPa ve 7.83 gr/cm^3'tür. Basınç ve çekme kuvvetine maruz elemanlar için gerilme sınır değeri ±68.95 MPa'dır. Düğüm noktası deplasmanları için herhangi bir deplasman sınırlayıcısı bulunmamaktadır. Tasarım değişkenlerine atanacak enkesit alanları, minimum 0.645 cm^2 olarak tanımlanmıştır. Kafes yapı elemanları Çizelge 4.12.'de gösterildiği gibi 29 eleman grubuna ayrılmıştır. Yapıya etkiyen üç farklı yükleme durumu aşağıdaki gibidir:

Yükleme durumu I: 1, 6, 15, 20, 29, 34, 43, 48, 57, 62 ve 71 nolu düğüm noktalarına pozitif *x* yönünde 4.448 kN etki ettirilmiştir.

Yükleme durumu II: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 26, 28,29 30, 31, 32, 33, 34,36, 38, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 68, 70, 71, 72, 73, 74 ve 75 nolu düğüm noktalarına etkiyen negatif *y* yönünde 44.48 kN etki ettirilmiştir.

Yükleme durumu III: I. ve II. yükleme durumlarının beraber etki ettiği durumdur.



Şekil 4.15. 200 elemanlı düzlem kafes yapı

Çizelge 4.12. 200 elemanlı düzlem kafes yapının tasarım değişkenleri

Tasarım değişkenleri	Eleman no.	Tasarım değişkenleri	Eleman no.
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		

Çizelge 4.13'te JA ile ABC-AP (Sonmez 2011a), SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014), FPA (Bekdaş ve ark. 2015) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) yöntemlerinden elde edilen optimum sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre JA'nın 11555.88 kg optimum ağırlık değeri ile çizelgede belirtilen diğer tüm yöntemlerden daha hafif bir tasarım elde ettiği açıkça görülmektedir. JA ile optimum tasarım 49115 analiz sonunda elde edilirken TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) ve WEO (Kaveh ve Bakhshpoori 2016) yöntemleri sırasıyla 28059, 14406 ve 19410 analiz sonunda optimum ağırlığı bulmuştur. Bununla birlikte Çizelge 4.13.'te görüldüğü gibi JA'nın, TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) ve WEO (Kaveh

ve Bakhshpoori 2016) ait sonuçları sırasıyla 6016, 2737, 7835 ve 5270 yapı analizi sonunda bulduğu görülmektedir. JA ve diğer yöntemler için istatistiksel değerler ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri Çizelge 4.14.'te gösterilmiştir. JA'nın 20 farklı icrası sonunda bulunan 20 nihai değer için hesaplanan standart sapma değeri 28.3917 kg olup ortalama ağırlık değeri olan 11597.48 kg'ın yaklaşık %0.25'idir. Bu durum JA'nın yöntem olarak optimum tasarımı bulmadaki sağlamlığını kanıtlamaktadır. Şekil 4.16'da her bir eleman grubundaki en büyük gerilme değerleri, gerilme sınır değeriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.16.'dan JA ile elde edilen optimum tasarımın gerilme sınırlayıcısını sağladığı teyit edilmiştir.

Çizelge 4.13. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

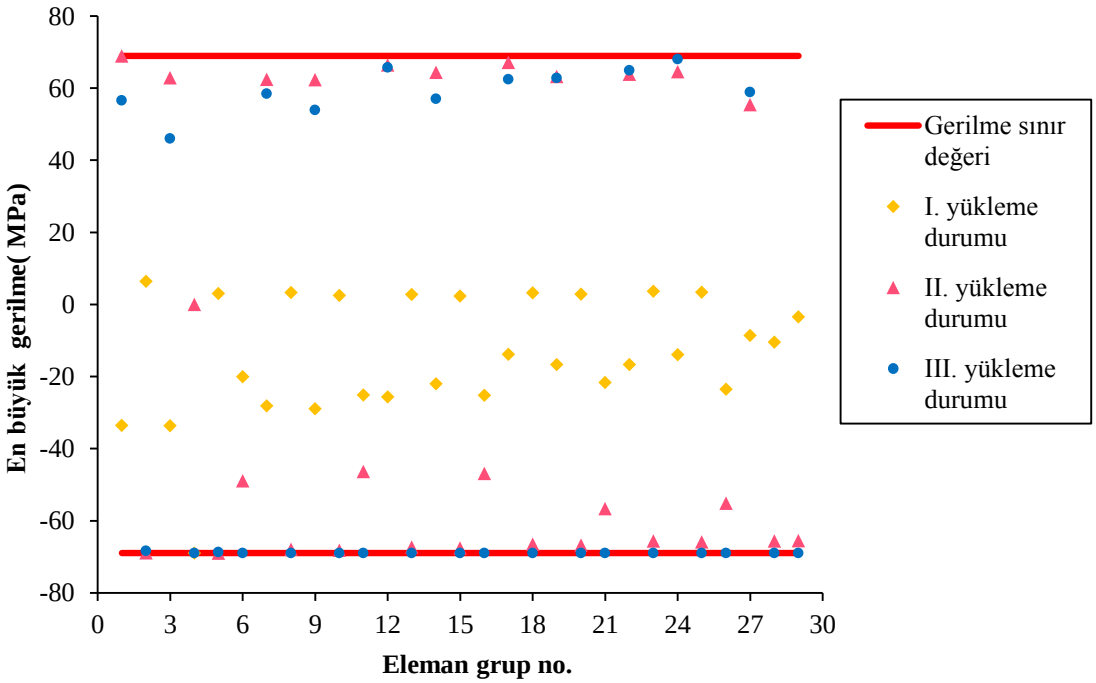
Tasarım değişkenleri	(Sonmez 2011a)	(Degertekin 2012)	(Degertekin ve Hayalioglu 2013)	(Kaveh ve ark. 2014)	(Bekdaş ve ark. 2015)	(Kaveh ve Bakhshpoori 2016)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	ABC-AP	SAHS	TLBO	HPSSO	FPA	WEO	JA
1	0.6703	0.9935	0.9419	0.7826	0.9194	0.7381	0.9364
2	6.1051	6.0710	6.0710	6.0813	6.2174	6.0922	6.0876
3	0.6690	0.6452	0.6452	0.7871	0.6484	0.8452	0.6452
4	0.7265	0.6452	0.6516	0.6452	0.6452	0.6555	0.6452
5	12.5935	12.5290	12.5226	12.9955	12.5897	13.1309	12.5354
6	1.8903	1.9419	1.9097	1.8064	1.9077	2.0168	1.9105
7	0.6865	0.6452	0.6452	1.0252	0.7458	1.0832	0.6619
8	20.1606	20.0516	20.1354	19.7845	20.0858	20.3490	20.1101
9	0.6948	0.6452	0.6452	0.6465	0.6490	0.6471	0.6452
10	26.6361	26.4903	26.9225	26.0761	26.5161	26.4548	26.5640
11	2.7419	2.6387	2.5871	2.6723	2.6871	2.8064	2.5658
12	0.6748	1.2323	1.1677	3.1303	1.1890	0.7406	0.6733
13	35.3567	35.0193	34.9870	34.9651	35.2044	34.7244	34.7241
14	0.6839	0.6452	0.6452	0.6452	0.6452	1.0368	0.6460
15	41.8406	41.4644	41.4322	41.1283	41.6509	41.3883	41.1757
16	3.6129	3.7484	3.6839	4.3955	3.7419	3.6316	3.3858
17	1.1774	0.9742	1.0064	1.0168	0.9981	2.5871	3.0330
18	51.8999	51.4386	51.3418	52.5463	51.6980	51.4418	51.1367
19	0.6619	0.6452	0.6452	0.6452	0.6452	0.7045	0.6452
20	58.2799	57.8967	57.7934	58.6579	58.1515	58.1644	57.5878
21	5.0606	4.6387	4.6452	4.8142	4.7684	5.5664	5.6417
22	4.8426	2.7226	3.0839	1.3639	5.0774	1.4323	1.2983
23	72.9399	70.2708	70.3031	70.7011	72.1257	71.1315	70.9971
24	1.4245	0.6452	0.6452	0.6452	0.9432	0.9013	0.6457
25	79.1805	76.6902	76.7547	77.3108	78.5798	77.6386	77.4489
26	9.0677	6.7097	6.9677	5.9619	8.6606	6.4793	6.1269
27	33.2903	42.8773	41.6902	43.6618	35.3832	42.4270	42.8488
28	64.4708	69.7031	69.6708	70.7347	65.4012	69.2031	69.3671
29	94.8478	89.4837	89.8192	89.1521	93.7172	90.1069	89.5409
Ağırlık (kg)	11581.87	11562.87	11561.17	11656.74	11576.44	11645.85	11555.88 [11561.17][1] [11656.74][2] [11645.85][3]
Yapı analiz sayısı	1 450 000	19670	28059	14406	10685	19410	49155

[1]JA ile 11561.17 kg (TLBO 'ya ait optimum ağırlık değeri) 27988 analizde bulunmuştur.
[2]JA ile 11656.74 kg (HPSSO'ya ait optimum ağırlık değeri) 11733 analizde bulunmuştur.
[3]JA ile 11645.85 kg (WEO'ya ait optimum ağırlık değeri) 12033 analizde bulunmuştur.

Çizelge 4.14. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
ABC-AP	11581.87	*	*	*	13.136
SAHS	11562.87	11616.53	11702.3	64.34174	0
TLBO	11561.17	11581.58	11595.14	12.44651	0
HPSSO	11656.74	12875.93	*	1089.977	0
FPA	11576.44	11586.28	*	8.223587	0.169
WEO	11645.85	12071.59	*	318.7831	0
JA	11555.88	11597.48	11646.98	28.3902	0

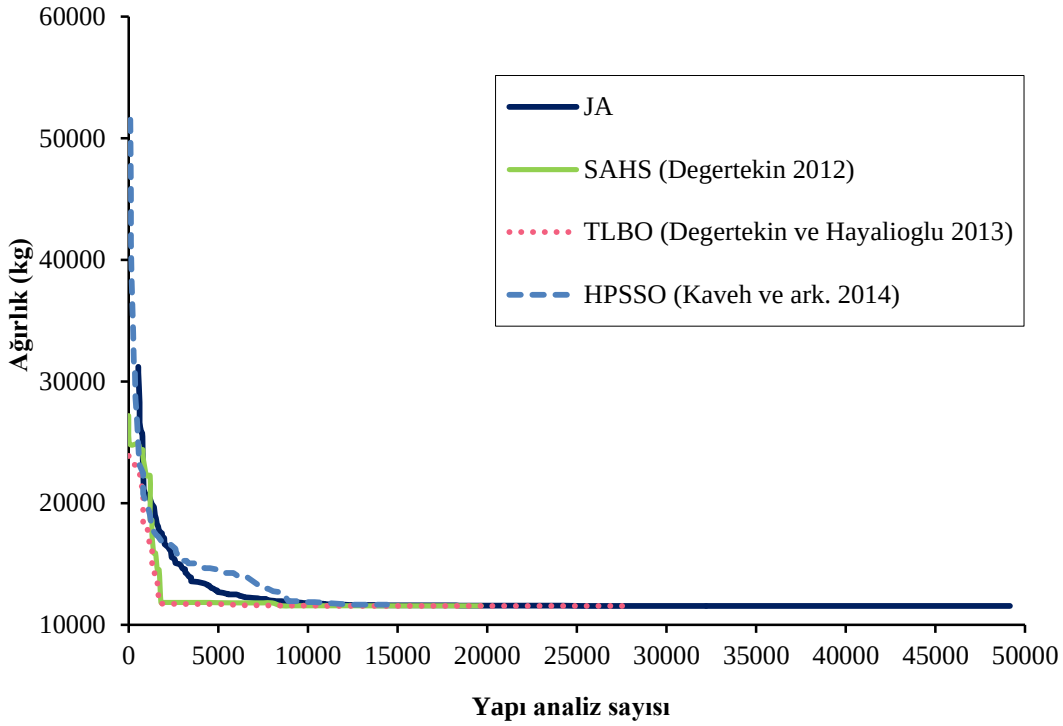
*Mevcut değil



Şekil 4.16. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarımında eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri

Şekil 4.17.'de JA, SAHS (Degertekin 2012), TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013), HPSSO (Kaveh ve ark. 2014) yöntemlerinin optimizasyon işlemi sürecinde yapı ağırlığı ile analiz sayılarının değişimi çizilmiştir. JA, yaklaşık olarak 15000 analizden sonra optimum tasarımın yakınında değerler elde etmiş ve HPSSO

(Kaveh ve ark. 2014) yönteminden daha güçlü bir yakınsama göstermiştir. SAHS (Degertekin 2012) ve TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013) yöntemleri başlangıçta daha güçlü yakınsama performansına sahip olsa da JA, 10000 yapı analizinden sonra SAHS (Degertekin 2012) ve TLBO (Degertekin ve Hayalioglu 2013) ile yaklaşık olarak aynı tasarımları bulmuştur.



Şekil 4.17. 200 elemanlı sürekli tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi

4.1.5. 942 Elemanlı Sürekli Tasarım Değişkenli Kule Kafes Yapı

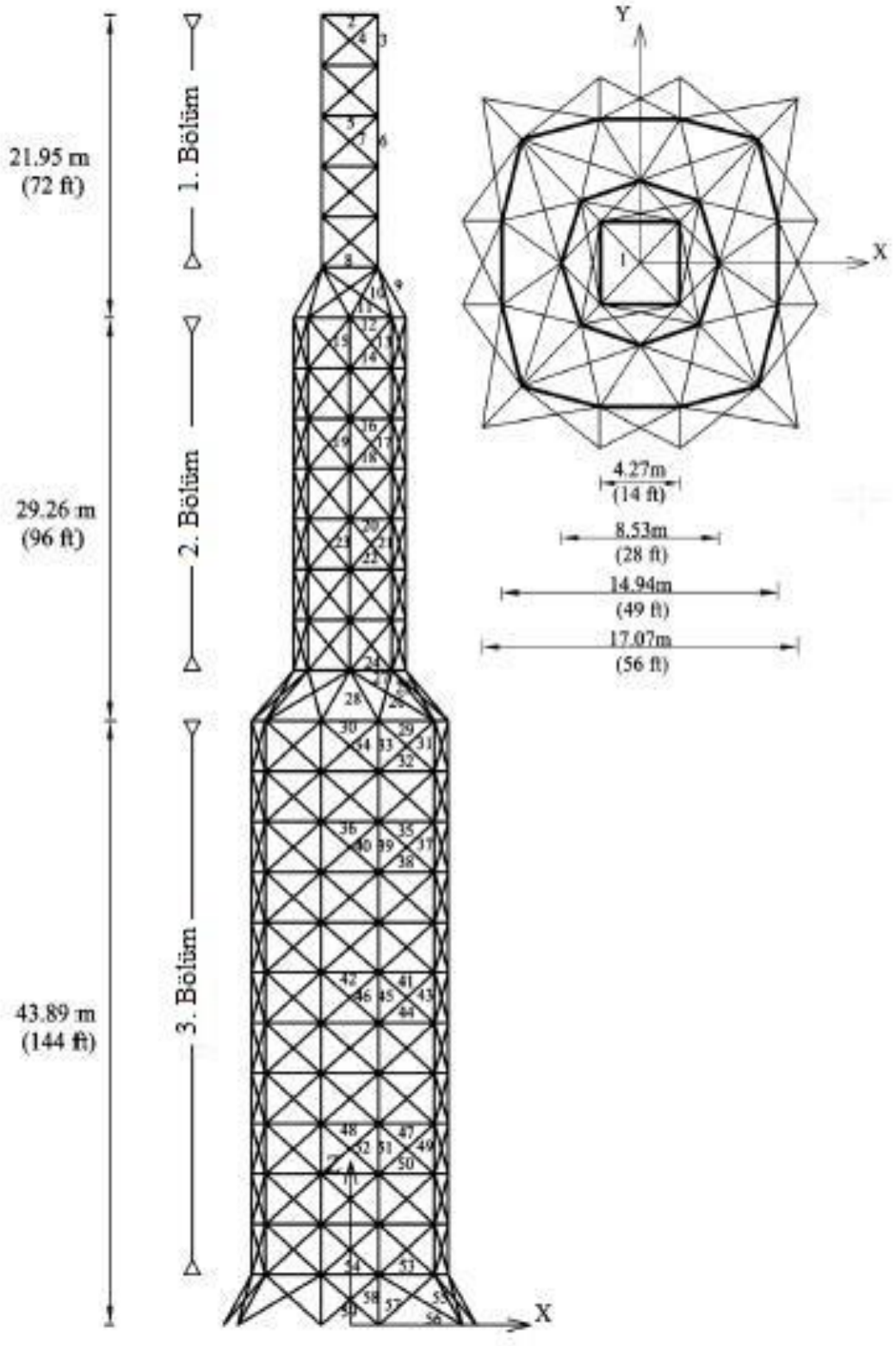
Sürekli tasarım değişkenli son örnek olarak 942 elemanlı kule kafes yapının optimizasyonu yapılmıştır. Bu yapı, *x* ve *y* yönlerinde simetrik olup 59 farklı tasarım değişkenine (eleman grubuna) sahiptir. Kule yapı, üç farklı bölgeye ayrılmıştır. Yapının geometrisi ve eleman gruplandırması Şekil 4.18.'de gösterilmiştir. Kule yapı daha önceki çalışmalarda genetik algoritma (GAs) (Adeli ve Cheng 1994), adaptif evrim stratejisi (ESs) (Hasançebi 2008), tavlama benzeşimi yöntemi (SA) (Hasançebi ve Erbatur 2002), hibrit genetik algoritma ve tek yönlü arama metodu (GNMS) (Rahami

ve ark. 2011), guguk kuşu algoritması (CS) (Gandomi ve ark. 2013) ve ateşböceği algoritması (FA) (Talatahari ve ark. 2014) kullanılarak optimize edilmiştir. Malzeme elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı sırasıyla 68948 MPa ve 2.77 gr/cm^3'tür. Bütün elemanlar için gerilme sınır değeri ± 172.37 MPa, yapının en üst seviyesindeki dört düğüm noktasının *x, y,* ve *z* doğrultularındaki deplasman değeri ± 38.1 cm olarak sınırlandırılmıştır. Tasarım değişkenlerine, 0.645 cm^2 ve 1290.32 cm^2 aralığında enkesit alanı atanabilecektir. Yapıya etkiyen tek yükleme durumu aşağıdaki gibidir:

z yönünde kulenin 1. bölgesindeki düğüm noktalarına -13.345 kN, 2. bölgesindeki düğüm noktalarına -26.90 kN, 3. bölgesindeki düğüm noktalarına -40.034 kN ,

y yönünde kulenin tüm serbest düğüm noktalarına 4.448 kN,

x yönünde kulenin sol tarafındaki her bir düğüm noktasına 6.672 kN, sağ tarafındaki her bir düğüm noktasına etkiyen 4.448 kN etki ettirilmiştir.



Şekil 4.18. 942 elemanlı kule kafes yapının X-Z ve X-Y kesiti

JA ile elde edilen optimizasyon sonuçları, GAs (Adeli ve Cheng 1994), SA(Hasançebi ve Erbatur 2002), ESs (Hasançebi 2008), GNMS (Rahami ve ark. 2011), CS (Gaondomi ve ark 2013) ve FA (Talatahari ve ark. 2014) yöntemleriyle Çizelge 4.15'te karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlere ait istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri Çizelge 4.16'da verilmiştir. GAs (Adeli ve Cheng 1994) ve FA (Talatahari ve ark. 2014) yöntemleriyle bulunan optimum tasarımların enkesit alanları belirtilmediğinden sınırlayıcı ihlal yüzdesi tespit edilememiştir. CS (Gaondomi ve ark 2013) yöntemiyle bulunan optimum sonuç, en hafif tasarım olmasına rağmen tasarım sınırlayıcılarını %23.28 oranında ihlal ettiğinden JA ile elde edilen sonucun en iyi tasarım olduğu söylenebilir. Çizelge 4.15.'ten JA 63987.44 kg ağırlığındaki optimum tasarımı 98586 analiz sonunda bulurken, SA (Hasançebi ve Erbatur 2012) ve ESs (Hasançebi 2008) 65061.14 kg ve 64065.51 kg ağırlığındaki tasarımları sırasıyla 39834 ve 150000 analiz sonunda bulduğu görülmektedir. Ancak JA'nın 65061.14 kg ve 64065.51 kg ağırlıklarını sırasıyla 23371 ve 63523 analizden sonra bulduğu tespit edilmiştir. Bu durum aynı ağırlık değerleri göz önüne alındığında JA'nın SA (Hasançebi ve Erbatur 2012) ve ESs (Hasançebi 2008) kıyasla çok daha hızlı bir optimizasyon yöntemi olduğunu göstermektedir. JA ile elde edilen optimum tasarımda her eleman grubu için en büyük gerilme değeri ve gerilme sınır değerleri Şekil 4.19.'da, kule yapının en üst dört noktasının deplasman değerleri ve deplasman sınır değerleri Şekil 4.20.'de gösterilmiştir. Bu iki çizelgeden JA'nın tasarım sınırlayıcılarını sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.15. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2)	(Adeli ve Cheng 1994) GAs	(Hasançebi ve Erbatur 2002 SA	(Hasançebi 2008) ESs	(Rahami ve ark. 2011) GNMS	(Gandomi ve ark. 2013) CS	(Talatahari ve ark. 2014) FA	Mevcut çalışma JA
1	*	6.4516	6.5806	17.9735	6.4516	*	6.4516
2	*	6.4516	6.6903	8.7561	6.4516	*	6.4581
3	*	19.3548	18.9871	32.4915	19.4193	*	22.8709
4	*	6.4516	12.3871	14.4503	11.2903	*	12.0968
5	*	6.4516	6.6129	7.8877	6.4516	*	6.6129
6	*	109.6772	96.5224	96.4998	92.0643	*	100.8966
7	*	19.3548	19.8322	19.0761	18.9032	*	20.0000
8	*	45.1612	43.7418	70.3470	6.4516	*	43.4773
9	*	129.0320	119.8707	93.0172	6.4516	*	127.6643
10	*	6.4516	15.5806	23.9290	60.5160	*	26.4580
11	*	51.6128	42.4773	36.8232	28.5806	*	27.9806
12	*	45.1612	40.5870	31.7832	29.2903	*	33.4386
13	*	122.5804	99.2450	91.4521	105.8708	*	98.2643
14	*	12.9032	13.5484	12.2858	15.0322	*	14.6967
15	*	32.2580	38.8451	18.1296	48.4515	*	27.2967
16	*	6.4516	6.5935	6.4516	6.4516	*	6.4516
17	*	141.9352	149.0255	121.3352	144.9675	*	139.1933
18	*	19.3548	18.6387	16.8716	17.4193	*	18.3613
19	*	58.0644	51.3547	80.8566	87.6127	*	54.2838
20	*	6.4516	6.5032	7.2993	6.4516	*	6.4516
21	*	219.3544	184.1803	196.8525	186.6448	*	191.0125
22	*	19.3548	21.6064	21.5871	20.8387	*	21.0709
23	*	122.5804	104.1546	109.9675	153.9997	*	106.3288
24	*	174.1932	160.1416	116.6353	268.8382	*	165.1352
25	*	270.9672	247.7479	253.3653	232.3866	*	256.6963
26	*	6.4516	24.4322	16.8142	41.3548	*	6.4581
27	*	77.4192	79.4837	63.4212	153.4836	*	86.2643
28	*	103.2256	109.9095	84.5973	183.1609	*	108.0320
29	*	122.5804	95.0514	88.3205	125.0320	*	92.4708
30	*	90.3224	96.9740	109.5327	131.0320	*	101.1611
31	*	270.9672	249.0124	242.5840	202.6448	*	254.0059
32	*	25.8064	22.6516	19.7432	16.5806	*	23.1225
33	*	25.8064	19.3354	35.5522	26.9677	*	23.5870
34	*	25.8064	19.7419	11.6219	21.4838	*	17.5677
35	*	6.4516	7.0064	7.4632	6.4516	*	6.4774
36	*	6.4516	9.4322	8.0148	6.4516	*	8.8387
37	*	399.9992	383.4379	404.9934	303.9349	*	396.8960
38	*	19.3548	23.4322	21.4683	15.1613	*	21.8516
39	*	12.9032	12.1742	27.3348	24.4516	*	12.7419
40	*	25.8064	26.2709	11.0980	21.2903	*	23.1290

Çizelge 4.15.(devam) 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

41	*	6.4516	10.2903	6.5471	6.4516	*	6.4968
42	*	12.9032	23.6838	35.2438	6.4516	*	16.2193
43	*	496.7732	512.9732	503.2854	408.5798	*	531.2118
44	*	19.3548	21.8967	20.7780	20.7096	*	21.5096
45	*	12.9032	10.2000	23.1832	31.3548	*	11.1355
46	*	19.3548	27.1225	30.7535	14.3226	*	27.0451
47	*	12.9032	8.5742	7.4393	6.4516	*	10.5935
48	*	19.3548	14.4645	13.9987	6.4516	*	15.0580
49	*	645.1600	625.0697	642.8413	496.3216	*	628.9536
50	*	25.8064	23.9354	26.7541	22.8387	*	22.8774
51	*	6.4516	6.8064	13.9355	25.2258	*	6.4516
52	*	25.8064	29.4580	26.7735	14.5161	*	29.9677
53	*	38.7096	61.9741	72.3031	73.8063	*	48.8451
54	*	19.3548	19.2516	71.5508	75.0966	*	23.0516
55	*	316.1284	296.2381	231.9344	238.3221	*	275.8962
56	*	6.4516	6.4516	14.1529	6.4516	*	6.4516
57	*	399.9992	402.7476	426.9056	310.3220	*	420.1927
58	*	6.4516	19.2064	21.5496	37.9354	*	14.7613
59	*	19.3548	6.4516	26.1451	6.4516	*	7.9419
Ağırlık (kg)	77110.3	65061.14	64065.51	64543.93	60835.49	62993.67	63987.44 [65061.14][1] [64543.93][2] [64065.51][3]
Yapı analiz sayısı	*	39834	150000	*	75000	50000	98586

* Mevcut değil.

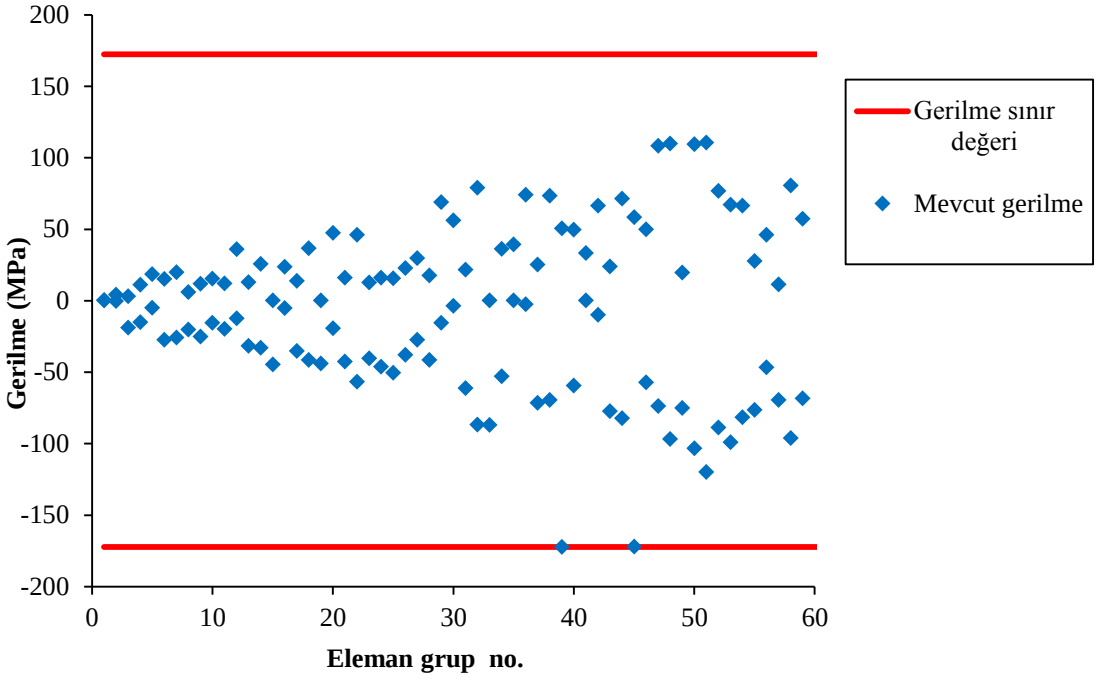
[1]JA ile 65061.14 kg (SA optimum ağırlık değeri) 23371 analizde bulunmuştur.

[2]JA ile 64065.51kg (ESs optimum ağırlık değeri) 63523 analizde bulunmuştur.

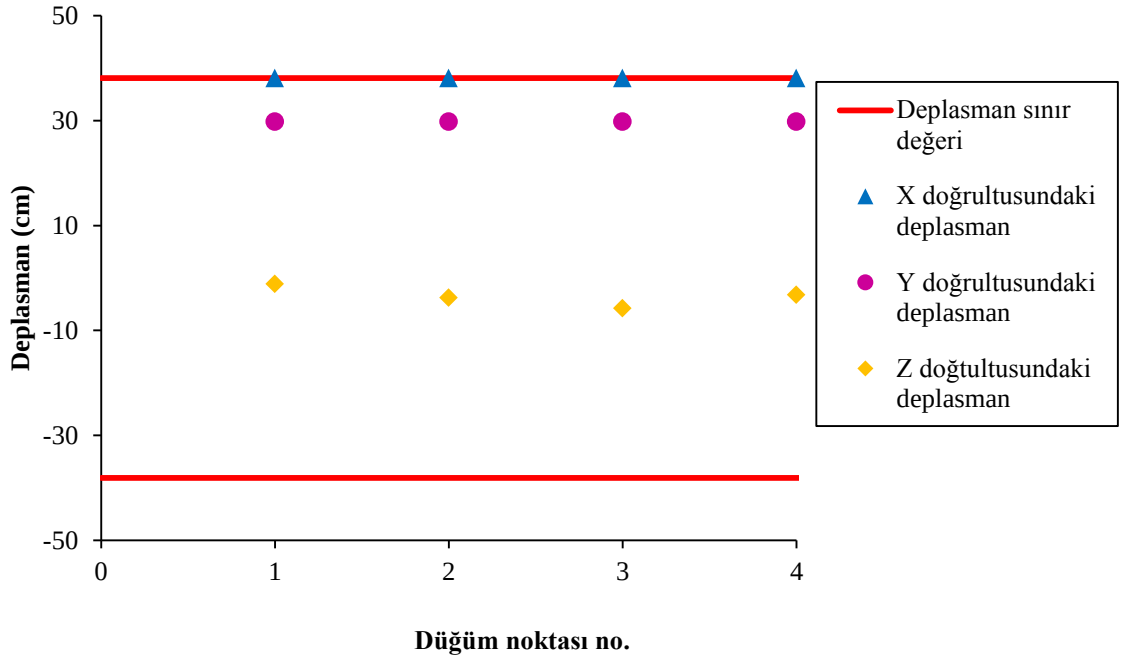
Çizelge 4.16. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının istatistiksel değerlerinin ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
GA	77110.3	*	*	*	*
SA	65061.14	*	*	*	0
ESs	64065.51	*	*	*	0
GNMS	64544.04	*	*	*	7.68
CS	60835.49	61345.64	62621.41	679.0514	23.28
FA	62993.67	63358.36	64529.98	498.0418	*
JA	63987.44	64147.74	64321.6	145.4663	0

*Mevcut değil.

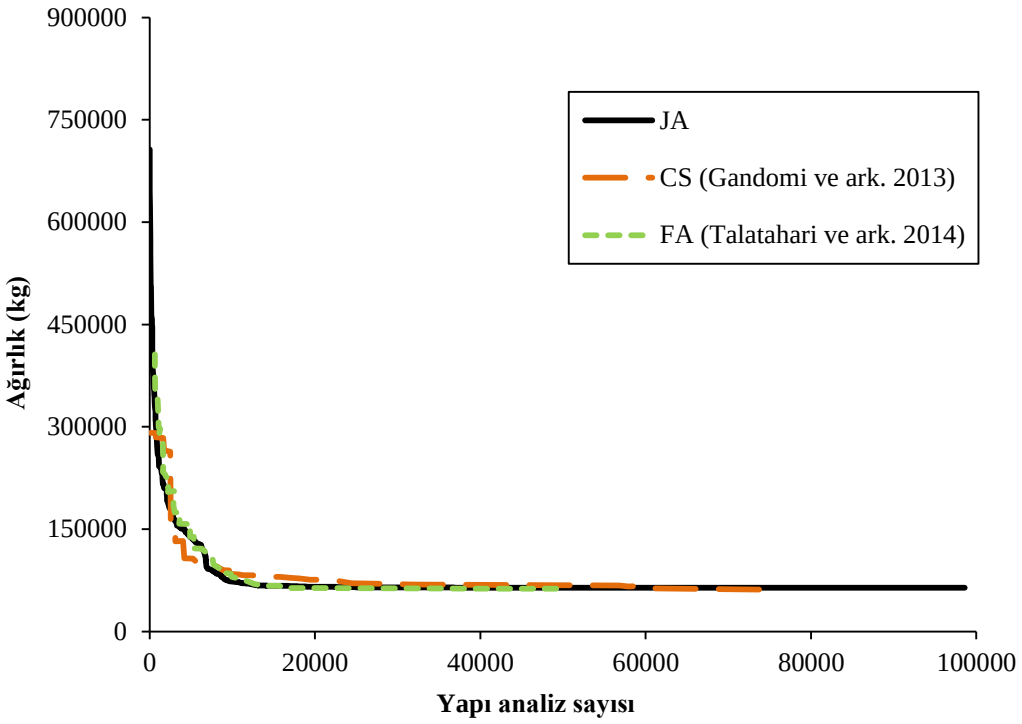


Şekil 4.19. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapının optimum tasarımında eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri



Şekil 4.20. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kule yapıda optimum tasarıma ait en üst dört düğüm noktasının deplasman değerleri

Şekil 4.21.'de JA, CS (Gandomi ve ark. 2013) ve FA (Talatahari ve ark. 2014) yöntemlerinin optimum ağırlığa yakınsama eğrileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere JA optimum tasarım bulmada diğer iki yöntemden daha güçlü bir yakınsama performansı sergilemektedir ve 20000 analizden sonra optimum tasarıma çok yakın değerler elde etmiştir.



Şekil 4.21. 942 elemanlı sürekli tasarım değişkenli kafes kulenin optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi

4.2. Ayrık Tasarım Değişkenli Kafes Yapı Örnekleri

Bu bölümde ayrık tasarım değişkenli 10, 47, 52 ve 200 elemanlı düzlem; 25 ve 72 elemanlı uzay kafes yapıların optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonuçları, HS (Lee ve ark. 2005), HPSO (Li ve ark. 2009), DHPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009c), ABC (Sonmez 2011b), MBA (Sadollah ve ark. 2012), CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014), ESASS (Azad ve Hasançebi 2014), TLBO (Dede 2014), AFA (Baghlani ve ark. 2014), WCA ve IMBA (Sadollah ve ark. 2015), HHS (Cheng ve ark. 2016), aeDE (Huu ve ark 2016) yöntemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Her bir kafes yapı için optimizasyon programı yirmi kez çalıştırılmış ve yirmi farklı icra sonucunda bulunan en iyi tasarım değişkenleri çizelgelerde listelenmiştir. Bunun yanı sıra, en iyi ağırlık, en kötü ağırlık, ortalama ağırlık, standart sapma değerleri, en iyi tasarımlar bulmak için gerekli yapı analiz sayısı ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri de çizelgelerde rapor edilmiştir.

JA'da kullanılan tek parametre olan popülasyon sayısının (*np*) en uygun değerinin belirlenmesi amacıyla birinci ve ikinci tasarım örnekleri için farklı popülasyon sayıları için bulunan değerler Çizelge 4.17'de verilmiştir. Buna göre minimum ağırlık ve yapı analiz sayısının elde edildiği popülasyon sayısının 20 olduğu görülmektedir. Dolayısıyla sürekli tasarım değişkenli örneklerde olduğu gibi ayrık tasarım değişkenli örneklerde de popülasyon sayısı 20 alınmıştır.

Çizelge 4.17. Farklı popülasyon sayıları için elde edilen optimum tasarım sonuçları

Popülasyon Sayısı (*np*)	10 elemanlı kafes I. optimizasyon durumu		10 elemanlı kafes II. optimizasyon durumu		25 elemanlı kafes I. optimizasyon durumu	
	Ağırlık (kg)	Analiz sayısı	Ağırlık (kg)	Analiz sayısı	Ağırlık (kg)	Analiz sayısı
10	2494.02	1270	2341.78	1187	220.41	579
20	2490.56	687	2298.51	1022	219.92	799
30	2490.56	1293	2304.92	2019	219.92	1006
40	2491.01	1877	2309.70	1791	219.92	1670
50	2490.56	2509	2323.23	2004	219.92	1900
60	2493.95	1718	2325.21	1464	220.02	1645

4.2.1. 10 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Kafes Yapı

10 elemanlı düzlemsel kafes yapının geometrisi, eleman ve düğüm noktaları numaralandırılması Şekil 4.1.'deki gibidir. Bölüm 4.1.1.'de sürekli tasarım değişkenli olarak optimum boyutlandırılması yapılan yapı bu bölümde ayrık tasarım değişkenli olarak boyutlandırılacaktır. Yapıda malzeme özellikleri, eleman gerilme ve düğüm noktası deplasman sınırlayıcıları ve eleman gruplandırılması Bölüm 4.1.1.'deki gibidir. Kafes yapıya etkiyen yükler P_1=444.82 kN ve P_2=0 şeklindedir. Bu problemde iki farklı optimizasyon durumu bulunmaktadır. I. optimizasyon durumu için tasarım değişkenleri D=[10.45 11.61 12.83 13.74 15.35 16.90 16.97 18.58 18.90 19.94 20.19 21.81 22.39 22.90 23.42 24.77 24.97 25.03 26.97 27.23 28.97 29.61 30.97 32.06 33.03 37.03 46.58 51.42 74.19 87.10 89.68 91.61 100.00 103.23 109.03 121.29 128.39 141.94 147.74 170.97 193.55 216.13] (cm^2) enkesit listesinden seçilmiştir. II. optimizasyon durumu

için ise D=[0.65 3.23 6.45 9.68 12.90 16.13 19.35 22.58 25.81 29.03 32.26 35.48 38.71 41.94 45.16 48.39 51.61 54.84 58.06 61.29 64.52 67.74 70.97 74.19 77.42 80.65 83.87 87.10 90.32 93.55 96.77 100.00 103.23 106.45 109.68 112.90 116.13 119.35 122.58 125.81 129.03 132.26 135.48 138.71 141.94 145.16 148.39 151.61 154.84 158.06 161.29 164.52 167.74 170.97 174.19 177.42 180.64 183.87 187.10 190.32 193.55 196.77 200.00 203.22] (cm^2) şeklinde verilen enkesit listesi kullanılmıştır.

I. ve II. optimizasyon durumları için JA ile elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.18 ve 4.20 'de literatürdeki diğer optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.18 ve 4.20'den görüldüğü üzere JA ile sırasıyla I. optimizasyon durumu için 687 analiz sonunda 2490.56 kg ağırlığında ve II. optimizasyon durumu için 1022 analiz sonunda 2298.51 kg ağırlığında kafes yapı tasarımı bulunmuştur. Ayrıca her iki çizelgeden JA'nın optimum tasarımları diğer yöntemlere göre çok daha az analiz sayısında bulduğu görülmektedir. I. optimizasyon durumunda JA optimum tasarımı 687 analiz sayısı sonunda bulurken diğer yöntemler optimum tasarımları 1000-50000 analiz sayısında bulabilmişlerdir. II. optimizasyon durumu için JA'nın 1022 yapı analizi sayısına karşın diğer yöntemler 3000-50000 analiz sayısı sonunda optimum değerleri elde etmişlerdir. Çizelge 4.19 ve 4.21'de JA ve diğer yöntemlere ait istatiksel değerler ve sınırlayıcı ihlal yüzdeleri verilmiştir. AFA (Baghlani ve ark. 2014)'dan elde edilen sonuçların JA ile kıyaslanması doğru değildir. Çünkü AFA(Baghlani ve ark. 2014) her iki optimizasyon durumu için sınırlayıcıları ihlal ederken JA gerek eleman gerilme gerekse düğüm deplasman sınırlayıcılarını her iki durumda da sağlamaktadır. Şekil 4.22'de JA'nın eleman gerilme sınırlayıcılarını ve düğüm deplasmanlarını sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4.19 ve 4.21 incelendiğinde JA'nın en küçük standart sapma değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum JA'nın optimum tasarım veya ona çok yakın çözümleri bulabildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.18. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Tasarım Değişkenleri	Li ve ark. (2009)	Sonmez (2011b)	Sadollah ve ark. (2012)	Dede (2014)	Baghlani ve ark. (2014)	Cheng ve ark. (2016)	Huu ve ark. (2016)	Mevcut Çalışma
A_i (cm^2)	HPSO	ABC	MBA	TLBO	AFA	HHS	aeDE	JA
A_1	193.55	216.13	193.55	216.13	216.13	216.13	216.13	216.13
A_2	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45
A_3	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74
A_4	87.10	91.61	109.03	91.61	89.68	91.61	91.61	91.61
A_5	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45
A_6	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45
A_7	51.42	51.42	51.42	51.42	51.42	51.42	51.42	51.42
A_8	170.97	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74	147.74
A_9	141.94	141.94	147.74	141.94	141.94	141.94	141.94	141.94
A_{10}	11.61	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45
Ağırlık (kg)	2509.27	2490.56	2498.28	2490.56	2485.66	2490.56	2490.56	2490.56
Yapı analiz sayısı	50000	25800	3600	1000	4250	5000	2380	687

Çizelge 4.19. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	2509.27	*	*	*	0
ABC	2490.56	2499.46	2511.53	*	0
MBA	2498.28	2507.14	2511.53	5.16	0
TLBO	2490.56	*	*	*	0
AFA	2485.66	*	*	*	0.1945
HHS	2490.56	2491.81	*	4.74	0
aeDE	2490.56	2495.95	2517.08	9.43	0
JA	2490.56	2490.69	2491.01	0.22	0

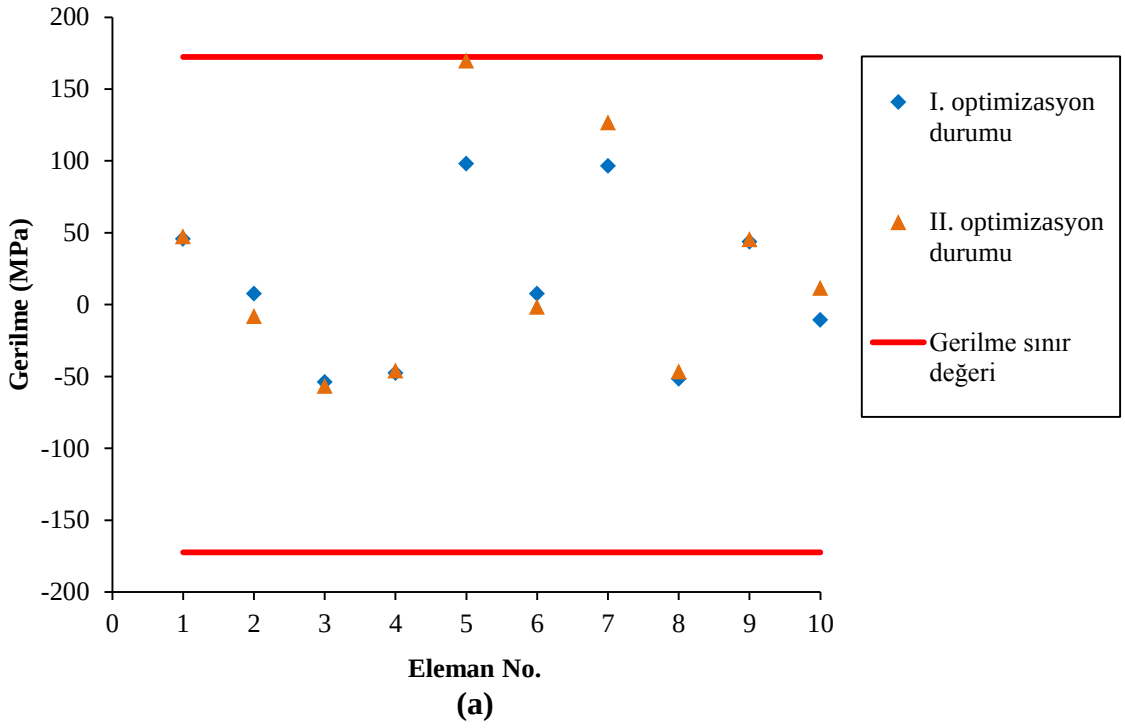
*Mevcut değil.

Çizelge 4.20. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

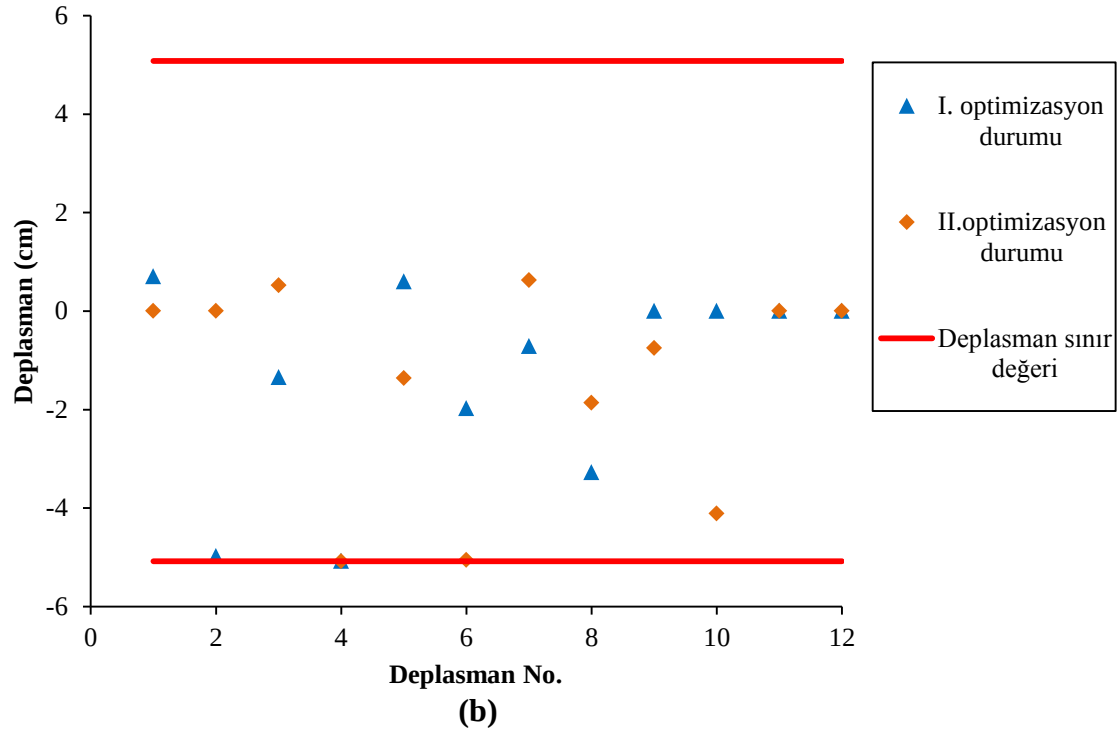
Tasarım Değişkenleri	Li ve ark. (2009)	Sadollah ve ark.(2012)	Baghlani ve ark. (2014)	Mevcut Çalışma
A_i (cm^2)	HPSO	MBA	AFA	JA
A_1	203.23	190.32	200.00	190.32
A_2	0.65	0.65	0.65	0.65
A_3	158.06	154.84	148.39	154.84
A_4	100.00	96.77	96.77	96.77
A_5	0.65	0.65	0.65	0.65
A_6	3.23	3.23	3.23	3.23
A_7	48.39	48.39	48.39	48.39
A_8	132.26	138.71	135.48	138.71
A_9	132.26	138.71	138.71	138.71
A_{10}	0.65	0.65	0.65	0.65
Ağırlık (kg)	2301.31	2298.51	2295.12	2298.51
Yapı analiz sayısı	50000	3000	4750	1022

Çizelge 4.21. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	2301.31	*	*	*	0
MBA	2298.51	*	*	*	0
AFA	2295.12	*	*	*	0.037
JA	2298.51	2301.85	2304.92	3.26	0



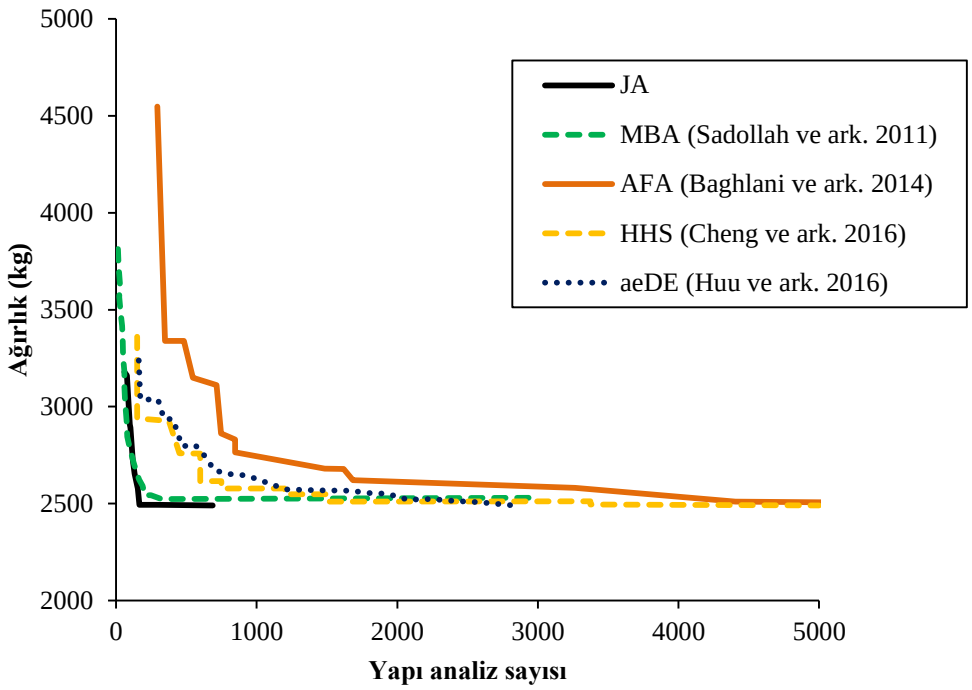
(a)



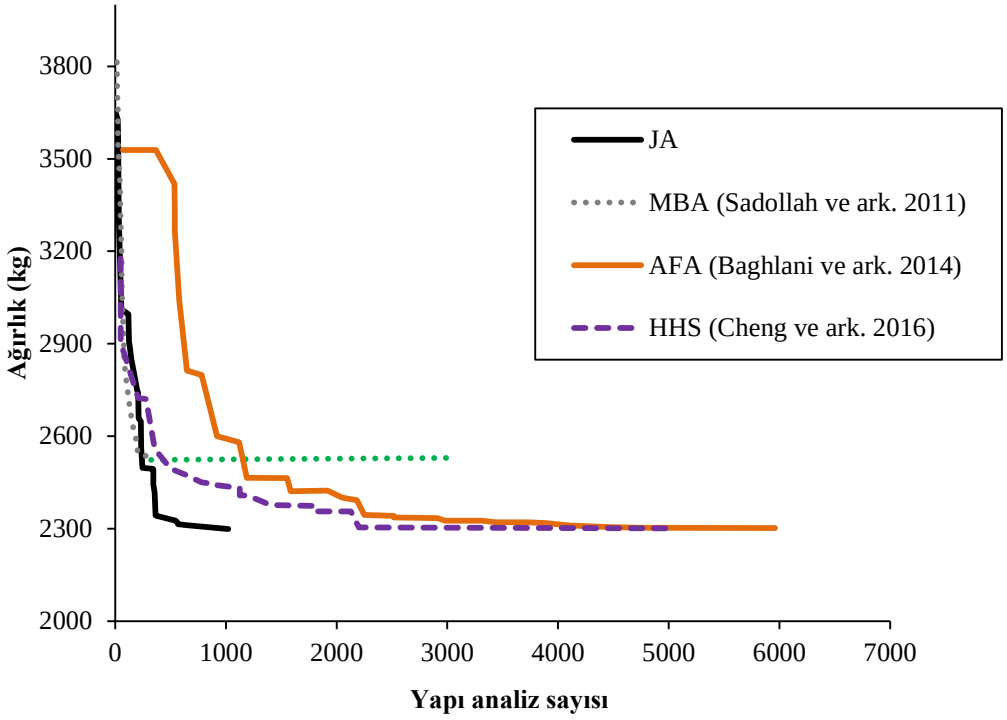
(b)

Şekil 4.22. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapıda optimum tasarıma ait (a) Eleman gerilme değerleri (b) Düğüm deplasman değerleri

I. ve II. optimizasyon durumu için kafes yapı ağırlığının analiz sayısıyla değişimi Şekil 4.23. ve 4.24.'te gösterilmiştir. Her iki şekil incelendiğinde JA'nın tüm yöntemler arasında en hızlı yakınsama performansına sahip olduğu açıkça görülebilmektedir.



Şekil 4.23. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu)



Şekil 4.24. 10 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu)

4.2.2. 25 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Uzay Kafes Yapı

25 elemanlı uzay kafes yapının geometrisi Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Bölüm 4.1.2'de sürekli tasarım değişkenli olarak göz önüne alınan yapı bu bölümde ayrık tasarım değişkenli olarak optimize edilecektir. Yapının malzeme özellikleri ve eleman gruplandırılması Bölüm 4.1.2'deki gibidir. Yapıya etkiyen yükleme durumları Çizelge 4.22.'de listelenmiştir. Tasarım değişkenlerinin seçildiği enkesit listelerine göre üç ayrı optimizasyon durumu belirlenmiştir. I. optimizasyon durumunda tasarım değişkenleri D=[0.645 1.935 2.581 3.226 3.871 4.516 5.161 5.806 6.452 7.097 7.742 8.387 9.032 9.667 10.323 0.968 11.613 12.258 12.903 13.548 14.194 14.839 15.48 16.774 18.064 19.355 20.645 21.935] (cm^2) enkesit listesinden seçilmiş ve yapısal analizde sadece I. yükleme durumu kullanılmıştır. II. optimizasyon durumunda tasarım değişkenleri, D=[0.065 2.581 5.161 7.742 10.323 12.903 15.484 18.065 20.645 23.226 25.806 28.387 30.968 33.548 36.129 38.710] (cm^2) enkesit listesinden seçilmiş ve yapısal analizde II. ve III. yükleme durumları birlikte kullanılmıştır. III. optimizasyon durumunda ise ayrık tasarım değişkenleri; Çizelge 4.23.'deki American Institute of Steel Construction (AISC 1989)'daki standart enkesit alanlarından seçilmiş ve analizde II. ve III. yükleme

durumları uygulanmıştır. Çekme ve basınç kuvvetine maruz elemanlarda gerilme sınır değeri ±275.79 MPa, mesnet noktaları haricindeki tüm düğüm noktalarında deplasman değeri ±8.89 mm olarak sınırlandırılmıştır.

Çizelge 4.22. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapıda yükleme şartları

Optimizasyon durumu	Yükleme Durumu	Düğüm Noktası	Yükler (kN)		
			P_x	P_y	P_z
I	I	1	4.448	-44.48	-44.48
		2	0.0	-44.48	-44.48
		3	2.224	0.0	0.0
		6	2.669	0.0	0.0
II ve III	II	1	0.0	88.96	-22.24
		2	0.0	-88.96	-22.24
	III	1	0.0	-44.48	-22.24
		2	4.448	-44.48	-22.24
		3	2.224	0.0	0.0
		6	2.224	0.0	0.0

Çizelge 4.23. AISC (1989) standart enkesit alanları

No.	Alan (cm^2)	No.	Alan (cm^2)	No.	Alan (cm^2)
1	0.72	23	16.90	45	51.42
2	0.91	24	16.97	46	55.03
3	1.26	25	18.58	47	60.00
4	1.61	26	18.90	48	70.00
5	1.98	27	19.94	49	74.19
6	2.52	28	20.19	50	87.10
7	2.85	29	21.81	51	89.68
8	3.63	30	22.39	52	91.61
9	3.88	31	22.90	53	100.00
10	4.94	32	23.42	54	103.23
11	5.06	33	24.77	55	109.03
12	6.41	34	24.97	56	121.29
13	6.45	35	25.03	57	128.39
14	7.92	36	26.97	58	141.94
15	8.17	37	27.23	59	147.74
16	9.40	38	28.97	60	158.06
17	10.08	39	29.61	61	170.97
18	10.45	40	30.97	62	180.64
19	11.61	41	32.06	63	193.55
20	12.84	42	33.03	64	216.13
21	13.74	43	37.03		
22	15.35	44	46.58		

Çizelge 4.24, 4.26 ve 4.8'de 25 elemanlı uzay kafes yapıda üç farklı optimizasyon durumu için JA ve literatürdeki yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. I. ve III. optimizasyon durumlarında tüm yöntemlerle, aynı ağırlık değeri bulunmuştur. II. optimizasyon durumu için JA, DHPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009c) ve AFA (Baghlani ve ark. 2014) yöntemleri haricindeki diğer yöntemlerle aynı tasarımı bulmuştur. II. optimizasyon durumu için DHPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009c) ve AFA (Baghlani ve ark. 2014) daha hafif bir tasarım elde etmelerine karşın JA ile karşılaştırılmaları mümkün değildir. Bunun nedeni, DHPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009c) ve AFA (Baghlani ve ark. 2014) tasarım sınırlayıcılarını %0.1 oranında ihmal etmeleri buna karşın JA'nın Çizelge 4.25 ve 4.27.'den görüldüğü gibi tasarım sınırlayıcılarını sağlamasıdır. Çizelge 4.24, 4.26. ve 4.28.'de verilen analiz sayılarına bakıldığında I., II. ve III. optimizasyon durumları JA'nın sırasıyla 799, 530 ve 946 analiz sonunda optimum tasarıma, diğer yöntemlerin ise I. optimizasyon durumu için 1440-25000, II. optimizasyon durumu için 950-25000, III. optimizasyon durumu için 9100-25000 analiz arasunda değişen değerler sonunda optimum tasarıma ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç optimum tasarımı bulmak için JA'nın kıyaslanan diğer yöntemlerden daha çok hızlı olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.25. 4.27. ve 4.29.'daki standart sapma değerlerinin ortalama ağırlığa kıyasla oldukça küçük çıkması, JA'nın optimum veya optimuma yakın tasarımları bulabilmede kararlı bir yöntem olduğunun ispatıdır.

Çizelge 4.24. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Tasarım Değişkenleri A_i (cm^2)	Hasançebi ve ark. (2009)	Li ve ark. (2009)	Sonmez (2011b)	Sadollah ve ark. (2012)	Hasançebi ve ark. (2013)	Dede (2014)	Baghlani ve ark. (2014)	Cheng Ve ark. (2016)	Huu ve ark. (2016)	Mevcut Çalışma
	PSO	HPSO	ABC	MBA	BI	TLBO	AFA	HHS	aeDE	JA
A_1	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_2-A_5	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94
A_6-A_9	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94
A_{10}-A_{11}	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{12}-A_{13}	13.55	13.55	13.55	13.55	13.55	13.55	13.55	13.55	13.55	13.55
A_{14}-A_{17}	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45	6.45
A_{18}-A_{21}	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
A_{22}-A_{25}	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94	21.94
Ağırlık (kg)	219.93	219.93	219.93	219.93	219.93	219.93	219.93	219.93	219.93	219.93
Yapı analiz sayısı	1600	25000	24250	2150	2900	4000	7100	5000	1440	799

Çizelge 4.25. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
PSO	219.93	*	*	*	0
HPSO	219.93	*	*	*	0
ABC	219.93	219.97	220.02	*	0
MBA	219.93	219.94	220.02	0.03	0
BI	219.93	220.34	*	0.48	0
TLBO	219.93	*	*	*	0
AFA	219.93	*	*	*	0
HHS	219.93	219.97	*	0.17	0
aeDE	219.93	220.00	220.49	0.12	0
JA	219.93	219.93	219.93	0	0

*Mevcut değil

Çizelge 4.26. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II.optimizasyon durumu)

Tasarım değişkenleri	Li ve ark (2009)	Kaveh ve Talatahari (2009)	Sadollah ve ark. (2012)	Baghlani ve ark. (2014)	Cheng ve ark. (2016)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	HPSO	DHPSACO	MBA	AFA	HHS	JA
A_1	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
A_2-A_5	12.90	10.32	12.90	10.32	12.90	12.90
A_6-A_9	23.23	20.65	23.23	20.65	23.23	23.23
A_{10}-A_{11}	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
A_{12}-A_{13}	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
A_{14}-A_{17}	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16
A_{18}-A_{21}	10.32	12.90	10.32	12.90	10.32	10.32
A_{22}-A_{25}	15.48	15.48	15.48	15.48	15.48	15.48
Ağırlık (kg)	254.28	250.21	254.28	250.21	254.28	254.28
Yapı analiz sayısı	25000	*	950	6200	5000	530

*Mevcut değil

Çizelge 4.27. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	254.28	*	*	*	0
DHPSACO	250.21	*	*	*	0.1
MBA	254.28	254.28	254.28	0	0
AFA	250.21	*	*	*	0.1
HHS	254.28	254.37	*	0.34	0
JA	254.28	254.67	256.22	0.85	0

*Mevcut değil

Çizelge 4.28. 25 elemanlı ayrık tasam değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (III. optimizasyon durumu)

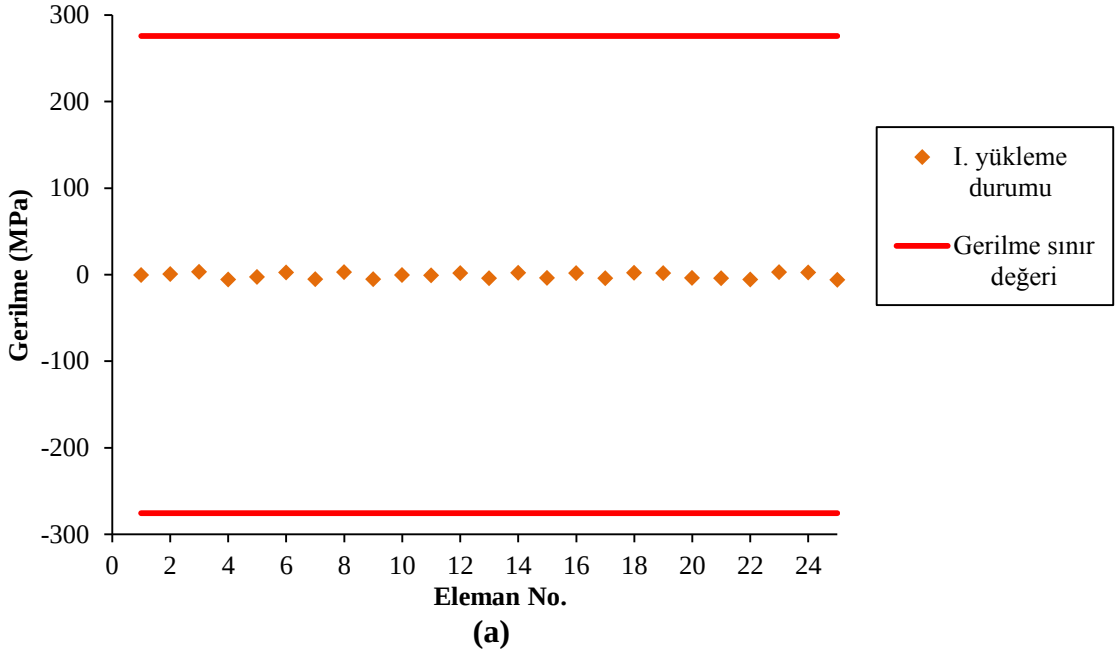
Tasarım değişkenleri	Li ve ark (2009)	Kaveh ve Talatahari (2009c)	Sadollah ve ark. (2012)	Baghlani ve ark. (2014)	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	HPSO	DHPSACO	MBA	AFA	JA
A_1	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_2-A_5	13.74	13.74	13.74	13.74	13.74
A_6-A_9	18.58	18.58	18.58	18.58	18.58
A_{10}-A_{11}	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{12}-A_{13}	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{14}-A_{17}	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94
A_{18}-A_{21}	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45
A_{22}-A_{25}	16.90	16.90	16.90	16.90	16.90
Ağırlık (kg)	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00
Yapı analiz sayısı	25000	*	2400	9100	946

Çizelge 4.29. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (III. optimizasyon durumu)

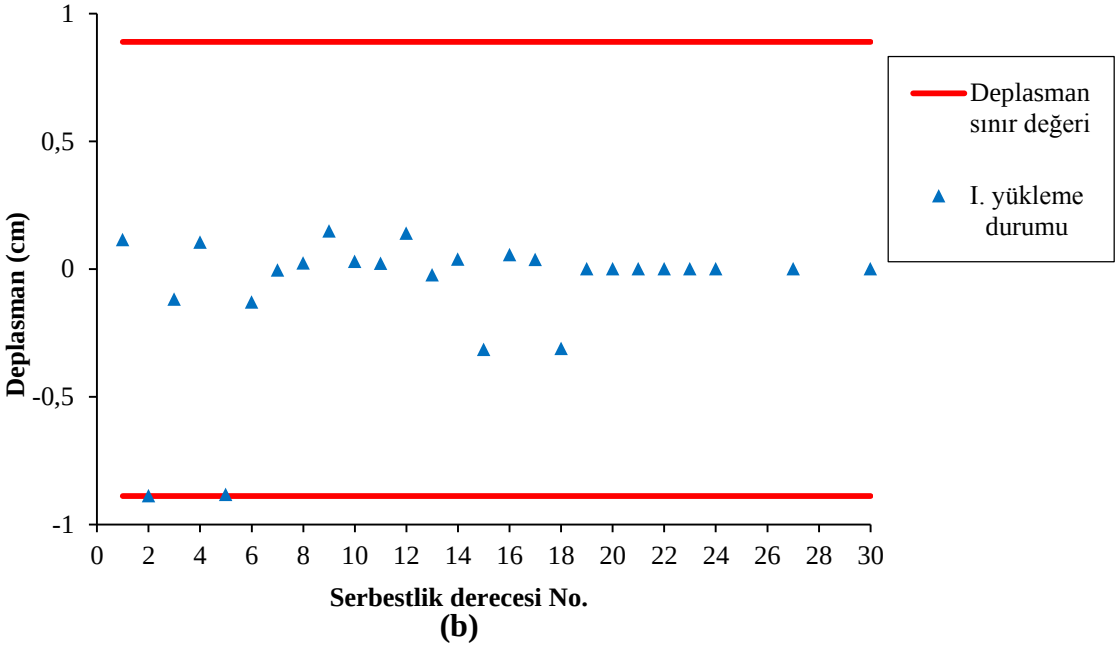
Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	250.00	*	*	*	0
DHPSACO	250.00	*	*	*	*
MBA	250.00	250.18	251.32	0.45	0
AFA	250.00	*	*	*	0
JA	250.00	250.30	251.53	0.73	0

*Mevcut değil

Şekil 4.25, 4.26, ve 4.27.'de sırasıyla I., II. ve III. optimizasyon durumları için optimum tasarıma ait eleman gerilme ve düğüm deplasman değerleri gösterilmiştir. Bu çizelgelerden JA'nın tüm optimizasyon durumları için tasarım sınırlayıcılarını sağladığı bir kez de şekiller üzerinde gösterilmiştir.

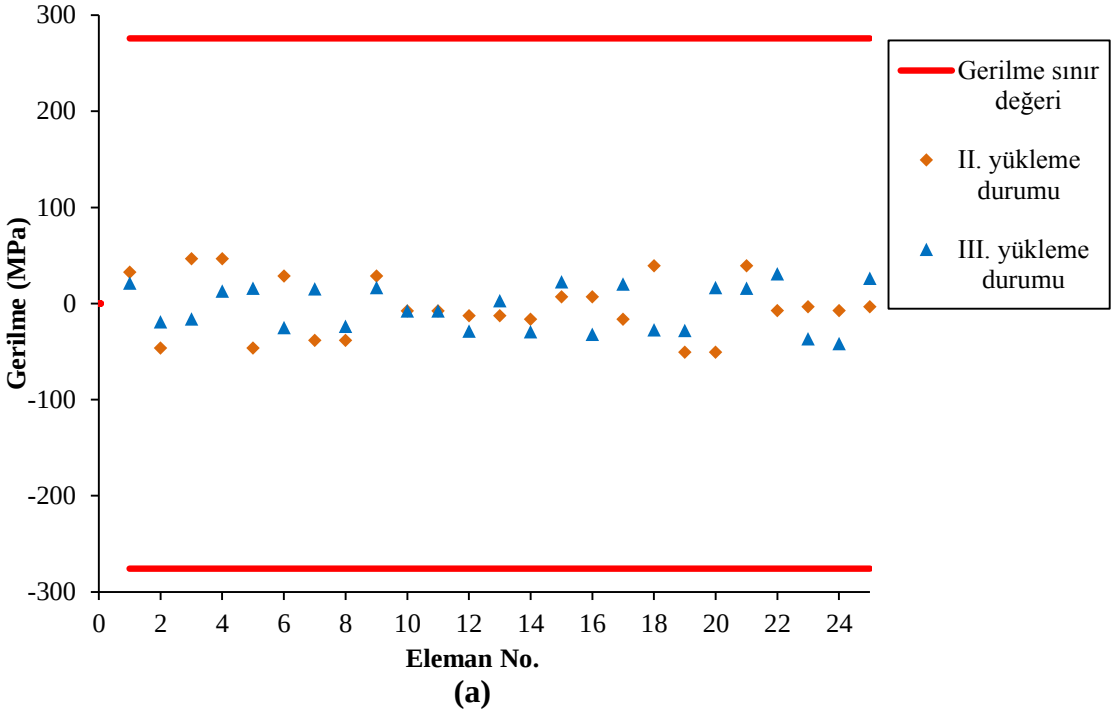


(a)

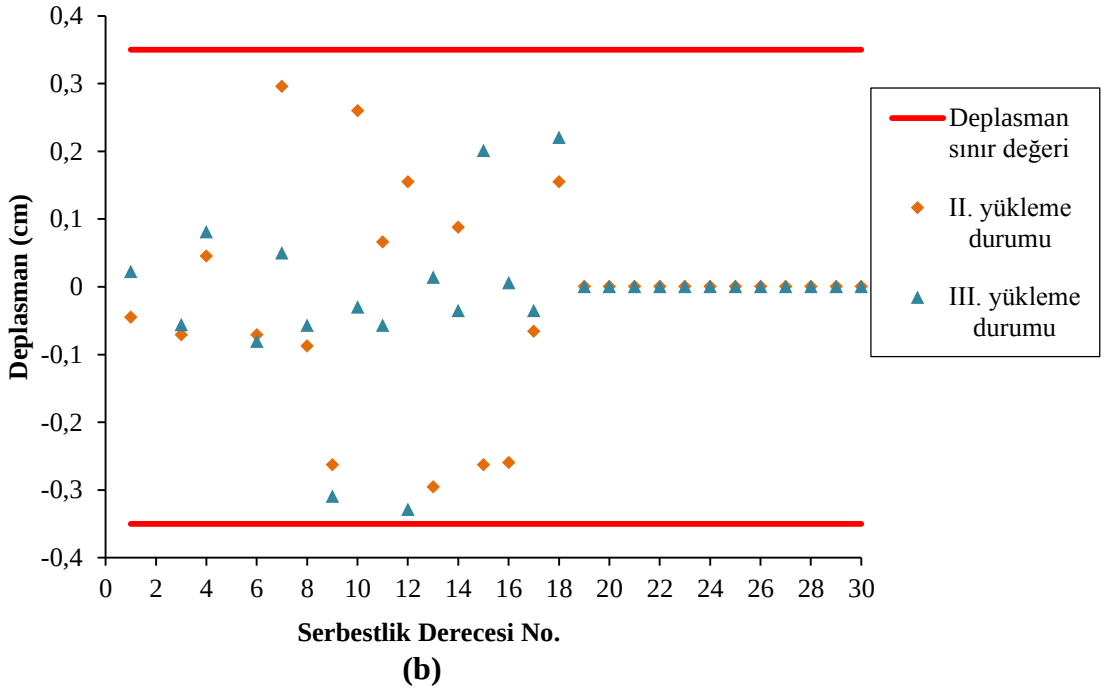


(b)

Şekil 4.25. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait a) Eleman gerilme değerleri b) Düğüm deplasman değerleri

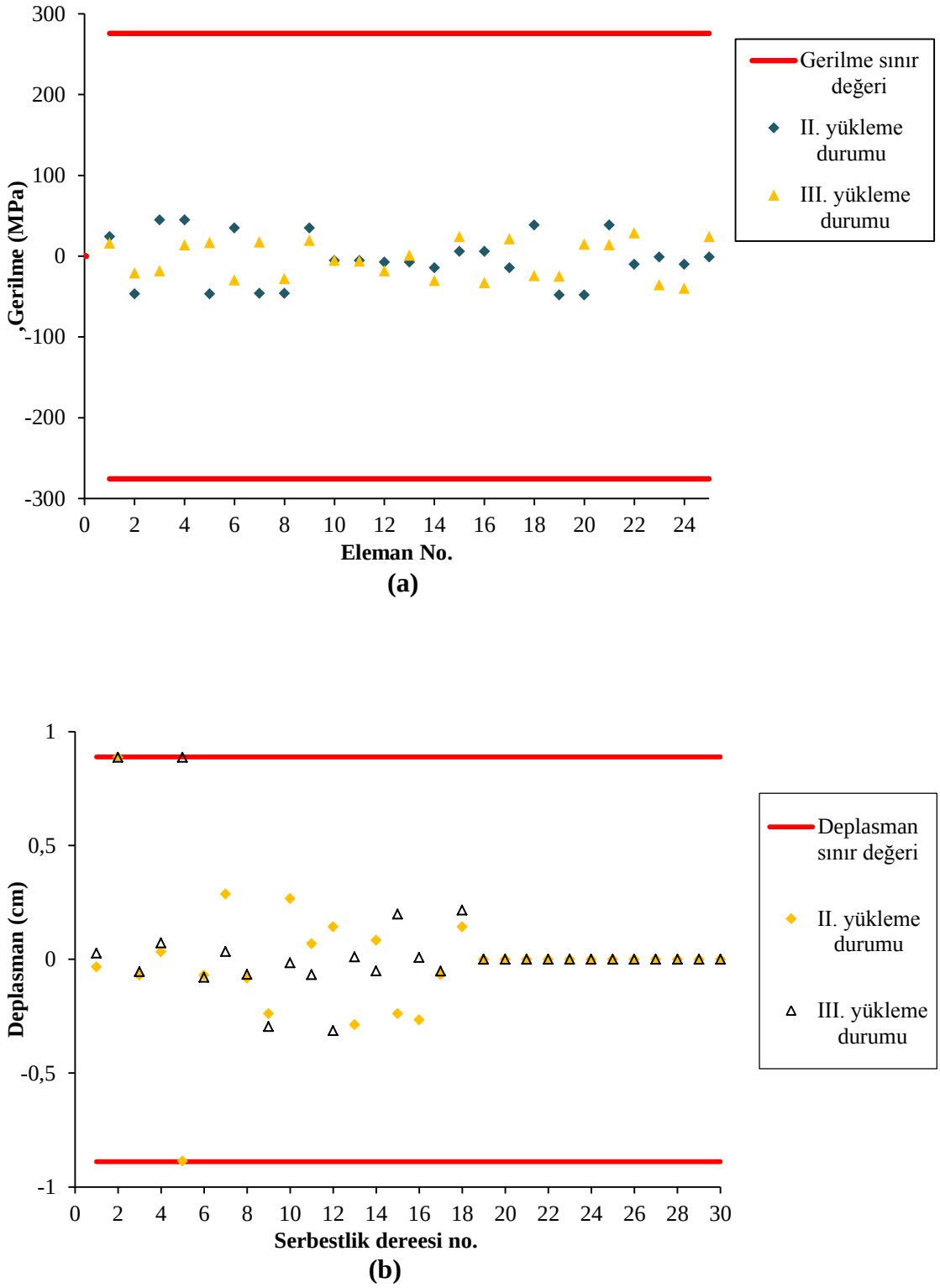


(a)



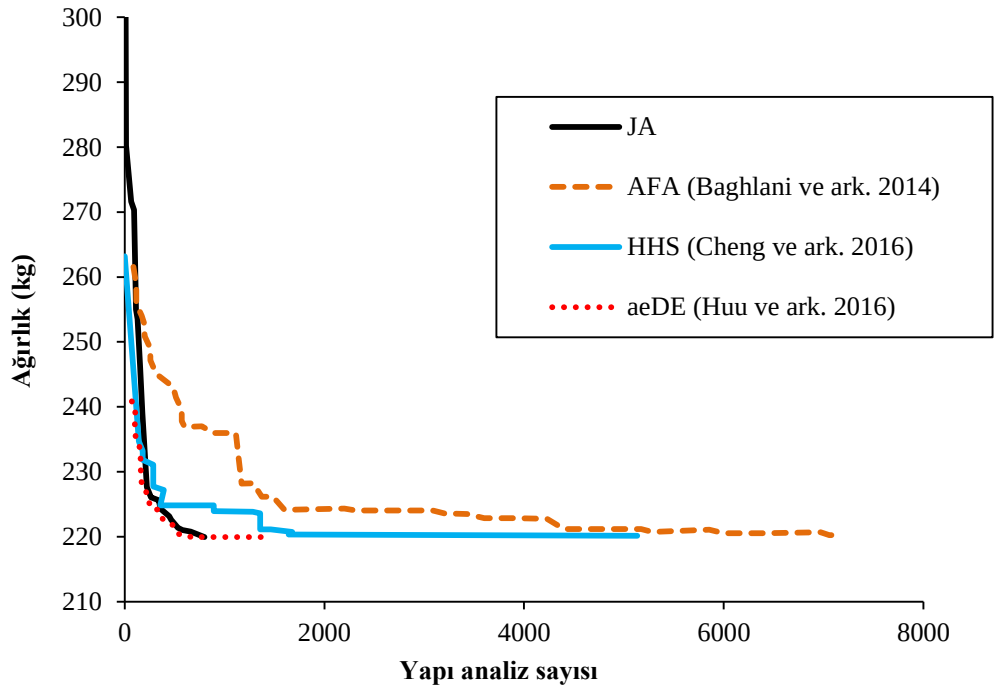
(b)

Şekil 4.26. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait a) Eleman gerilme değerleri b) Düğüm deplasman değerleri

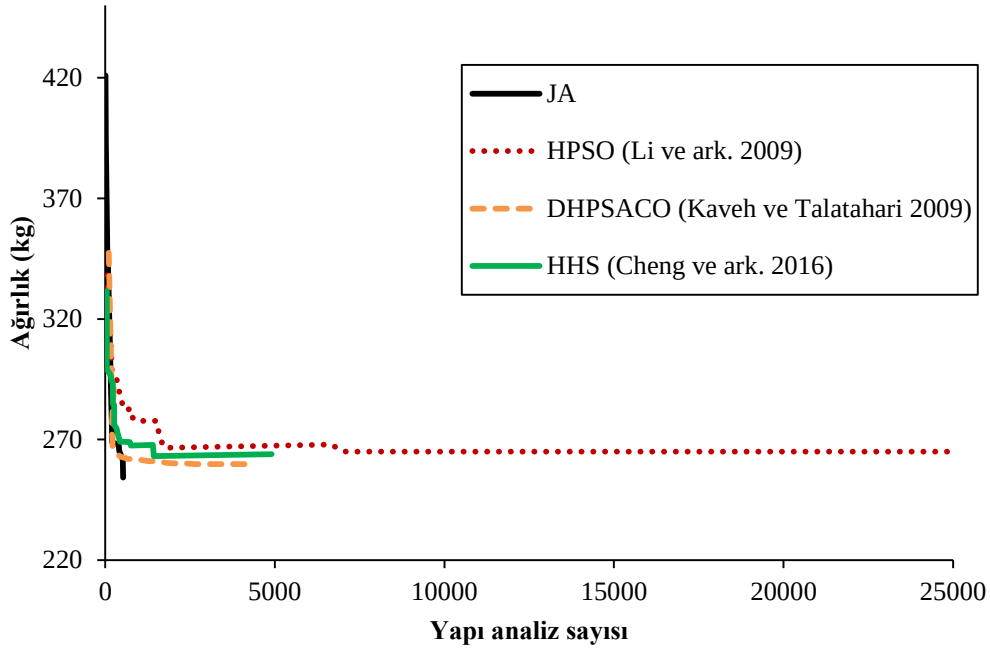


Şekil 4.27. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının III. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait a) Eleman gerilme değerleri b) Düğüm deplasman değerleri

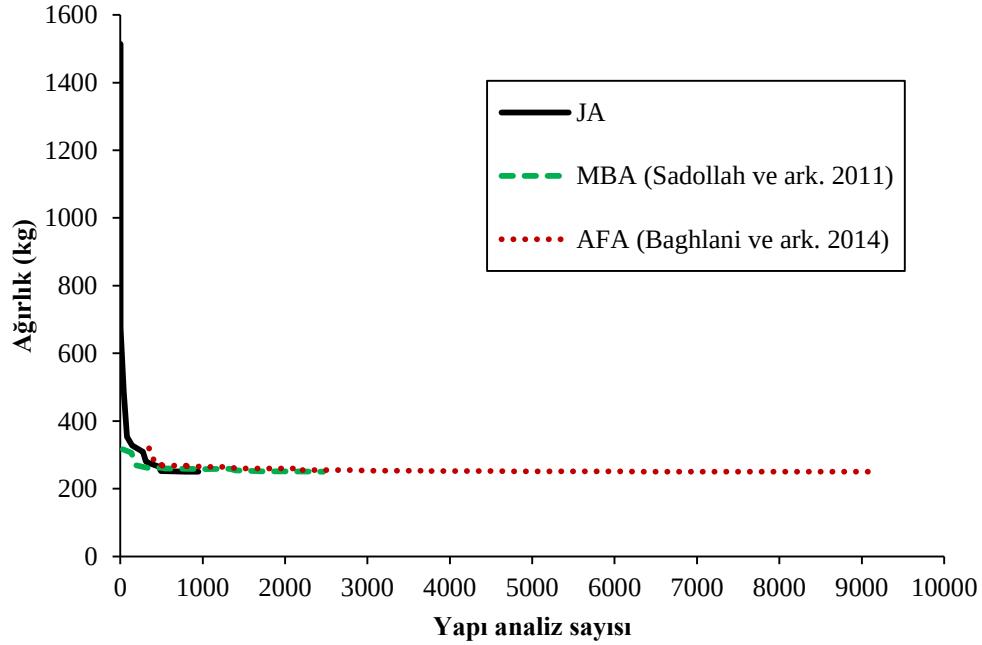
25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının üç ayrı optimizasyon durumu için yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi Şekil 4.28., 4.29. ve 4.30.'da gösterilmiştir. Şekildeki eğriler incelendiğinde JA'nın diğer optimizasyon yöntemlerine göre bariz bir şekilde en güçlü yöntem olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu)



Şekil 4.29. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu)



Şekil 4.30. 25 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (III. optimizasyon durumu)

4.2.3. 47 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Kule

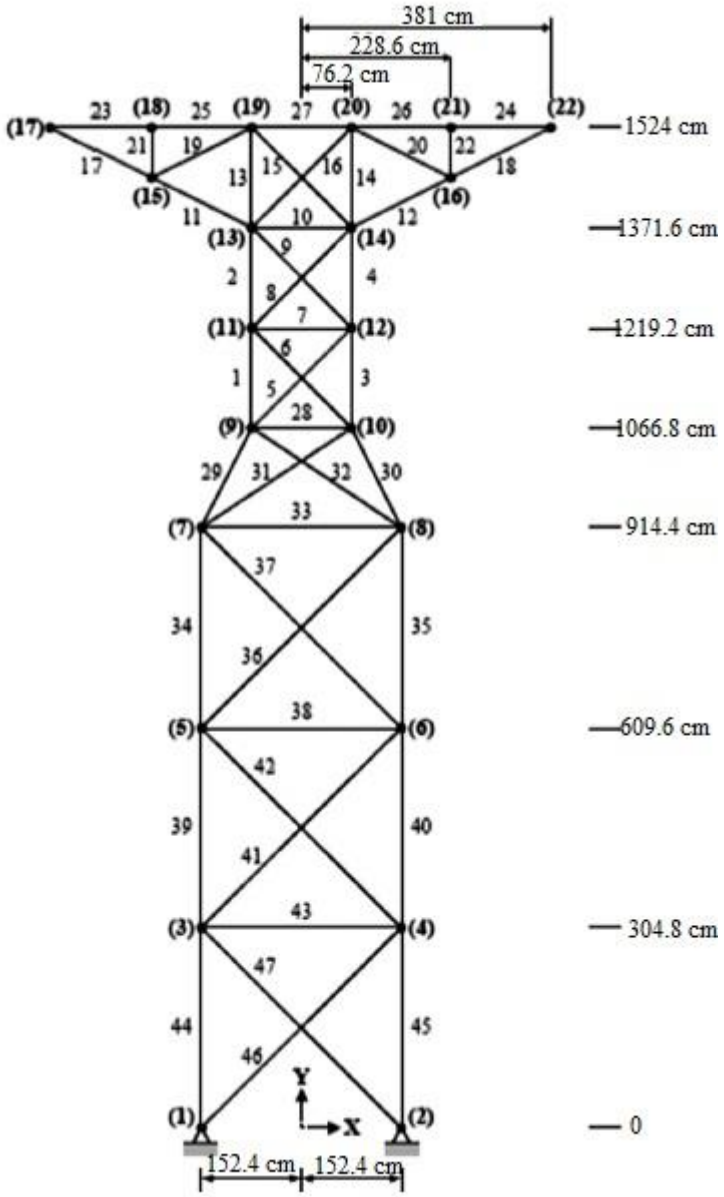
47 elemanlı düzlem kafes kule Şekil 4.31.'de gösterilmiştir. Bu kule, daha önceden HS (Lee ve ark. 2005) ve CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014) yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Malzemenin özgül ağırlığı 8.30 gr/cm^3 ve elastisite modülü 206843 MPa'dır. Yapıya etkiyen üç farklı yükleme durumu şu şekildedir:

Yükleme durumu I: 17. ve 22. düğüm noktalarına pozitif *x* yönünde 26.69 kN ve negatif *y* yönünde 62.28 kN,

Yükleme durumu II: Sadece 17. düğüm noktasına pozitif x yönünde 26.69 ve negatif y yönünde 62.28 kN,

Yükleme durumu III: Sadece 22. düğüm noktasına pozitif *x* yönünde 26.69 ve negatif *y* yönünde 62.28 kN etki ettirilmiştir.

I. yükleme durumu, kuleye belli bir açıyla bağlı iki enerji hattının yükünü, II. ve III. yükleme durumu ise kuleye bağlı iki enerji hatlarından birinin kopması durumunda oluşan yükü temsil etmektedir. Kafes yapı elemanları 1) A_1=A_3, (2) A_2 =A_4, (3) A_5=A_6, (4) A_7, (5) A_8=A_9, (6)A_{10}, (7) A_{11}=A_{12}, (8) A_{13}=A_{14}, (9) A_{15}=A_{16}, (10) A_{17}=A_{18}, (11) A_{19}=A_{20}, (12) A_{21}=A_{22}, (13) A_{23}=A_{24}, (14) A_{25}=A_{26}, (15) A_{27}, (16) A_{28}, (17) A_{29}=A_{30}, (18) A_{31}=A_{32}, (19) A_{33}, (20)A_{34}=A_{35}, (21) A_{36}=A_{37}, (22) A_{38}, (23) A_{39}=A_{40}, (24) A_{41}=A_{42}, (25) A_{43}, (26) A_{44}=A_{45} ve (27) A_{46}=A_{47} olmak üzere 27 eleman grubuna ayrılmıştır. Bu yapıda kullanılan enkesit alanları Çizelge 4.23.'de listelenmiştir.



Şekil 4.31. 47 elemanlı enerji nakil hattı kafes yapısı

Kafes yapının optimizasyonu gerilme ve burkulma sınırlayıcıları altında yapılacaktır. Gerilme sınır değeri, eksenel çekme kuvvetine maruz elemanlar için 137.90 MPa, eksenel basınç kuvvetine maruz elemanlar için 103.42 MPa olarak belirlenmiştir. Burkulma sınırlayıcısı olarak göz önüne alınan Euler burkulma sınır değeri aşağıdaki ifadeyle hesaplanacaktır.

$$\sigma_i^{cr} = \frac{-KEA_i}{L_i^2} \qquad i=1,2,\ldots,47 \qquad (4.1)$$

Burada *K:* kesit geometrisine bağlı bir sabit olup 3.96 olarak alınmıştır. *E*: malzeme elastisite modülü, L_i: *i-nci* elemanın uzunluğunu, A_i*: i-nci* elemanın en kesit alanını göstermektedir.

47 elemanlı düzlem kafes yapının JA sonuçları, Çizelge 4.30.'da literatürdeki JA ve diğer yöntemlerle bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.30.'da görüldüğü üzere JA ile HS (Lee ve ark. 2005) ve CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014) yöntemlerine göre daha hafif bir tasarım çok daha az analiz sayısı sonunda bulunmuştur. JA, 8046 yapısal analiz sonunda optimum tasarımı elde ederken, HS (Lee ve ark. 2005) ve CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014) sırasıyla 45557 ve 25000 analiz sonunda bulmuştur.

Çizelge 4.30. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes kulenin optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

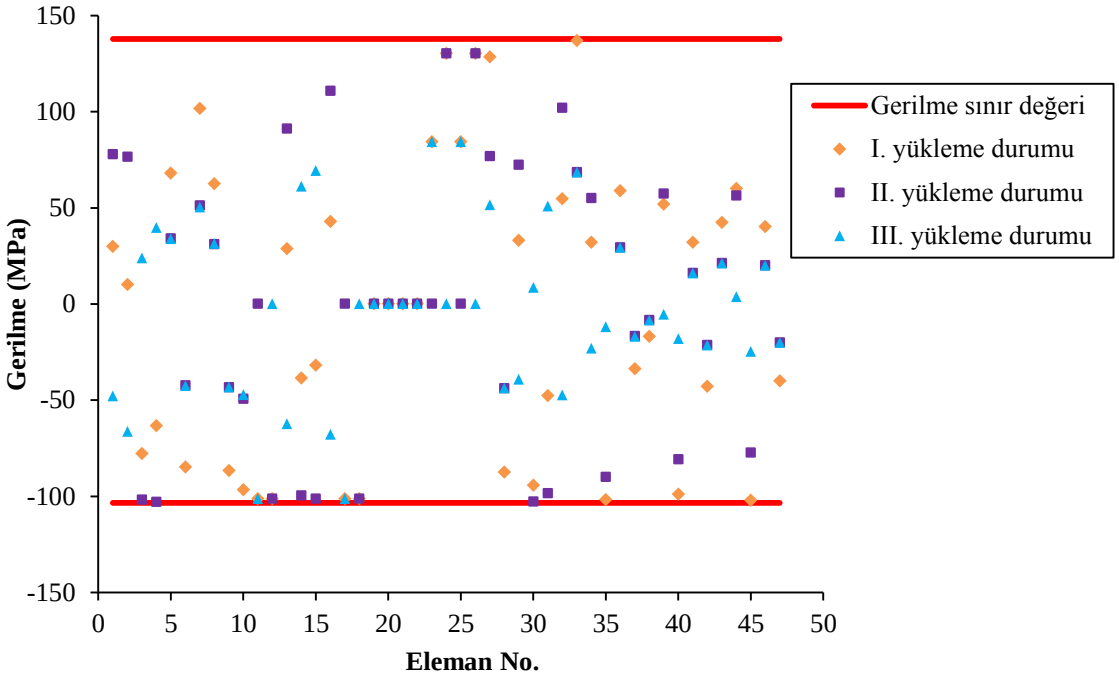
Tasarım Değişkenleri	Li ve ark.	Kaveh ve Mahdavi	Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	(2011)	(2014)	
	HS	CBO	JA
A_{1-} A_3	24.77	24.77	24.77
A_{2-} A_4	21.81	21.81	21.81
A_{5-} A_6	4.94	5.06	4.94
A_7	0.91	1.26	0.72
A_{8-} A_9	5.06	6.41	5.06
A_{10}	12.84	11.61	12.84
A_{11-} A_{12}	13.74	13.74	13.74
A_{13-} A_{14}	7.92	7.92	7.92
A_{15-} A_{16}	10.08	10.08	10.08
A_{17-} A_{18}	13.74	13.74	13.74
A_{19-} A_{20}	0.72	0.72	0.72
A_{21-} A_{22}	0.72	0.72	0.72
A_{23-} A_{24}	11.61	11.61	11.61
A_{25-} A_{26}	11.61	11.61	11.61
A_{27}	9.40	10.08	9.40
A_{28}	2.85	2.85	3.63
A_{29-} A_{30}	23.42	23.42	23.42
A_{31-} A_{32}	9.40	9.40	9.40
A_{33}	2.85	1.98	1.61
A_{34-} A_{35}	23.42	19.94	19.94
A_{36-} A_{37}	9.40	8.17	8.17
A_{38}	1.26	1.98	1.98
A_{39-} A_{40}	24.77	24.77	24.77
A_{41-} A_{42}	10.08	10.08	10.08
A_{43}	1.26	0.72	0.91
A_{44-} A_{45}	29.61	29.61	29.61
A_{46-} A_{47}	9.40	9.40	9.40
Ağırlık (kg)	1087.19	1082.29	1077.76
Analiz sayısı	45557	25000	8046

Çizelge 4.31. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes kulenin istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

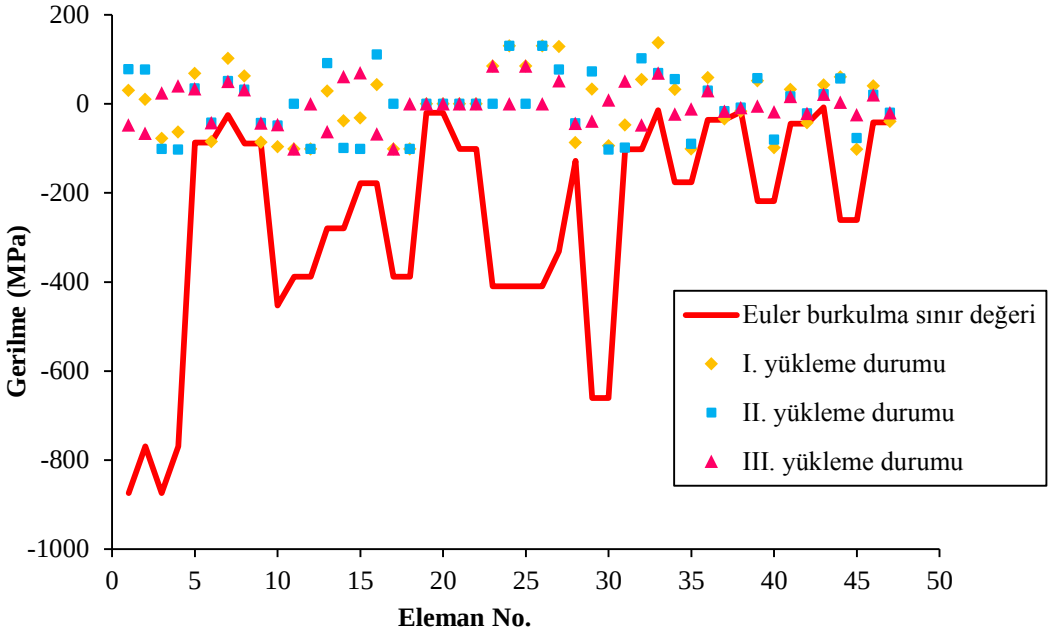
Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HS	1087.19	*	*	*	0
CBO	1082.29	1091.32	1119.36	8.90	0
JA	1077.76	1088.60	1096.89	5.96	0

*Mevcut değil.

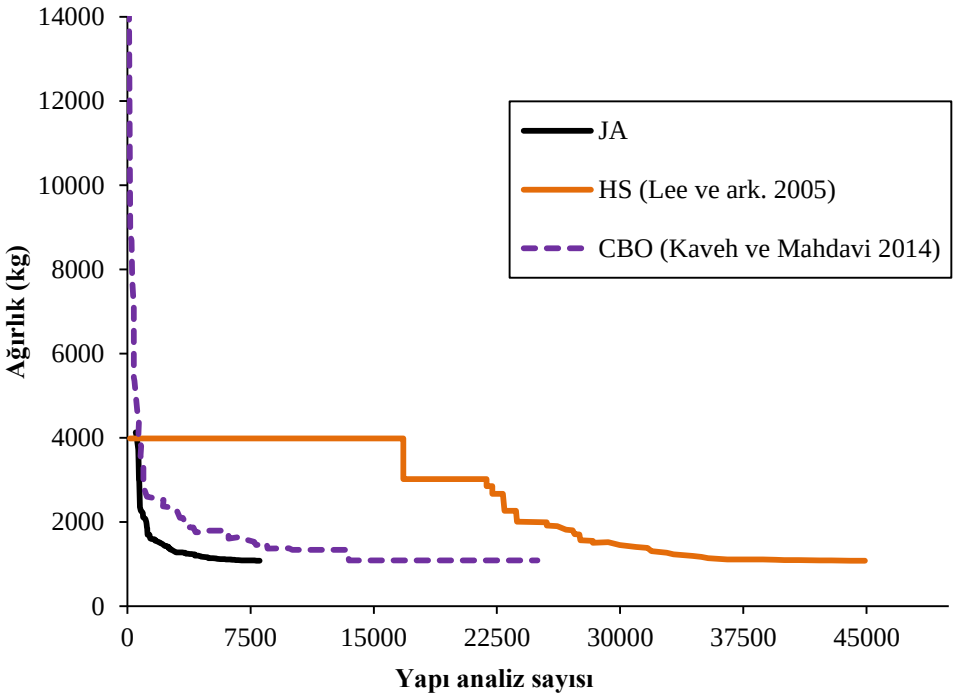
Şekil 4.32. ve 4.33.'de optimum tasarıma ait gerilme ve Euler burkulma gerilmesi değerleri gösterilmiştir. Bu grafikler JA ile yapılan optimizasyonda herhangi bir sınırlayıcı ihlali olmadığını teyit etmektedir. JA, HS (Lee ve ark. 2005) ve CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014) yöntemleriyle yapılan optimizasyon işleminde yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi Şekil 4.34.'teki gibidir. Bu şekilden JA'nın optimum tasarımı diğer yöntemlere göre daha hızlı şekilde elde ettiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.32. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri



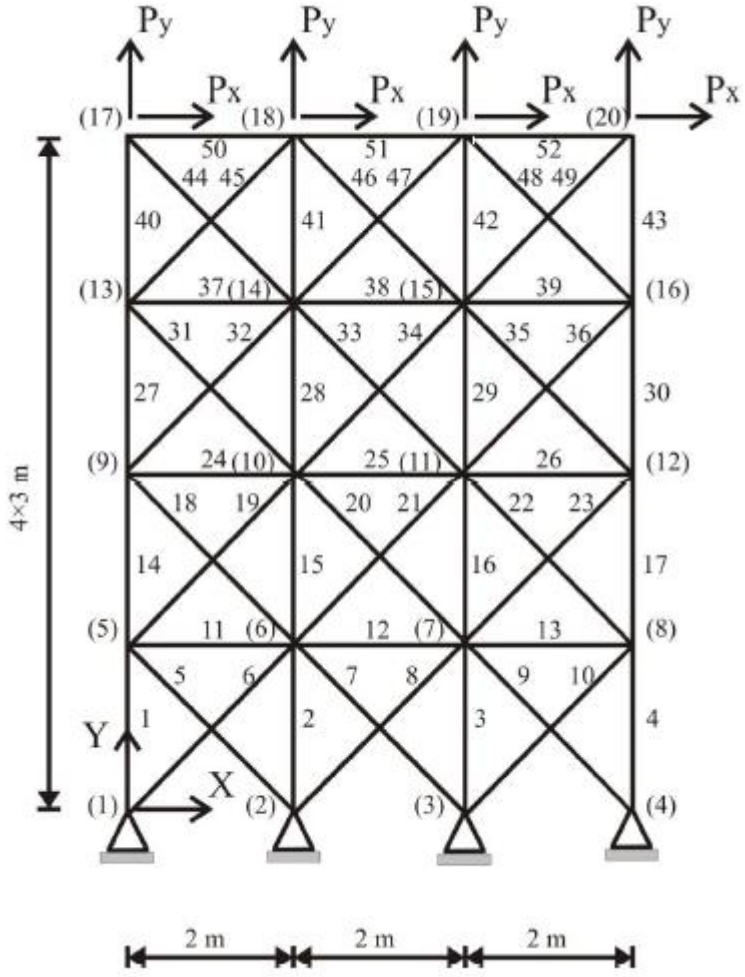
Şekil 4.33. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapıda optimum tasarıma ait Euler burkulma gerilmeleri



Şekil 4.34. 47 elemanlı ayrık tasarım değişkenli kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi

4.2.4. 52 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı

Şekil 4.35. 'te gösterilen 52 elemanlı düzlem kafes yapı literatürde HS (Lee ve ark. 2005), HPSO (Li ve ark. 2009), DHPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009c), MBA (Sadollah ve ark. 2012) CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014), TLBO (Dede 2014), AFA (Baghlani ve ark. 2014), WCA (Sadollah ve ark. 2015), IMBA(Sadollah ve ark. 2015), HHS (Cheng ve ark. 2016) ve aeDE (Huu ve ark 2016) yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Malzemenin özgül ağırlığı 7.86 gr/cm^3 ve elastisite modülü ise 206843 MPa'dır. Eksenel çekme ve basınç kuvvetine maruz elemanlar için gerilme sınır değeri ±179.33 MPa'dır. Yapıda tek bir yükleme durumu bulunmaktadır. Buna göre 17, 18, 19 ve 20 numaralı düğüm noktalarına P_x=100 kN ve P_y=200 kN etkitilmiştir. 52 elemanlı düzlem kafes, (1) A_1-A_4, (2) A_5-A_{10}, (3) A_{11}-A_{13}, (4) A_{14}-A_{17}, (5) A_{18}-A_{23}, (6) A_{24}-A_{26}, (7) A_{27}-A_{30}, (8) A_{31}-A_{36}, (9) A_{37}-A_{39}, (10) A_{40}-A_{43}, (11) A_{44}-A_{49} ve (12) A_{50}-A_{52} olmak üzere 12 eleman grubuna ayrılmıştır. Eleman gruplarına Çizelge 4.23.'te verilen 64 adet enkesit alanından atama yapılacaktır.



Şekil 4.35. 52 elemanlı düzlem kafes yapı

Çizelge 4.32.'de JA ve diğer yöntemlerden elde edilen optimum tasarım sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çizelgede HPSO (Li ve ark. 2009), DHPSACO (Kaveh ve Talatahari 2009c), CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014) ve AFA (Baghlani ve ark. 2014) haricindeki yöntemler 863.01 kg değerini elde etmiştir.

Daha hafif bir tasarım elde eden CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014)' nun JA ile kıyaslanması mümkün değildir. Çünkü; JA Çizelge 4.33.'te görüleceği gibi tasarım sınırlayıcısını sağlarken CBO (Kaveh ve Mahdavi 2014) %0.0484 oranında ihlal etmektedir. JA optimum tasarımı bulmak için gerekli analiz sayısı bakımından en iyi yöntem olarak görülmektedir. Çizelge 4.32.'de JA 3321 analiz sonunda optimum tasarımı bulurken, diğer yöntemler 3720-150000 arasında değişen analiz sayıları

sonunda optimum bir tasarım elde edebilmişlerdir. Çizelge 4.33. incelendiğinde standart sapma açısından en küçük değeri 0.20 kg ile JA'nın elde ettiği görülmektedir.

JA ile elde edilen optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri Şekil 4.36.'da gösterilmiş olup JA'nın gerilme sınırlayıcısını sağladığı görülmektedir. JA, MBA (Sadollah ve ark. 2012), TLBO (Dede 2014) ve aeDE (Huu ve ark 2016) yöntemleri için optimizasyon süresince yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi Şekil 4.37.'de gösterilmiştir. Bu şekilden JA'nın diğer yöntemlere kıyasla daha hızlı bir şekilde optimum tasarım bulabildiği görülmektedir.

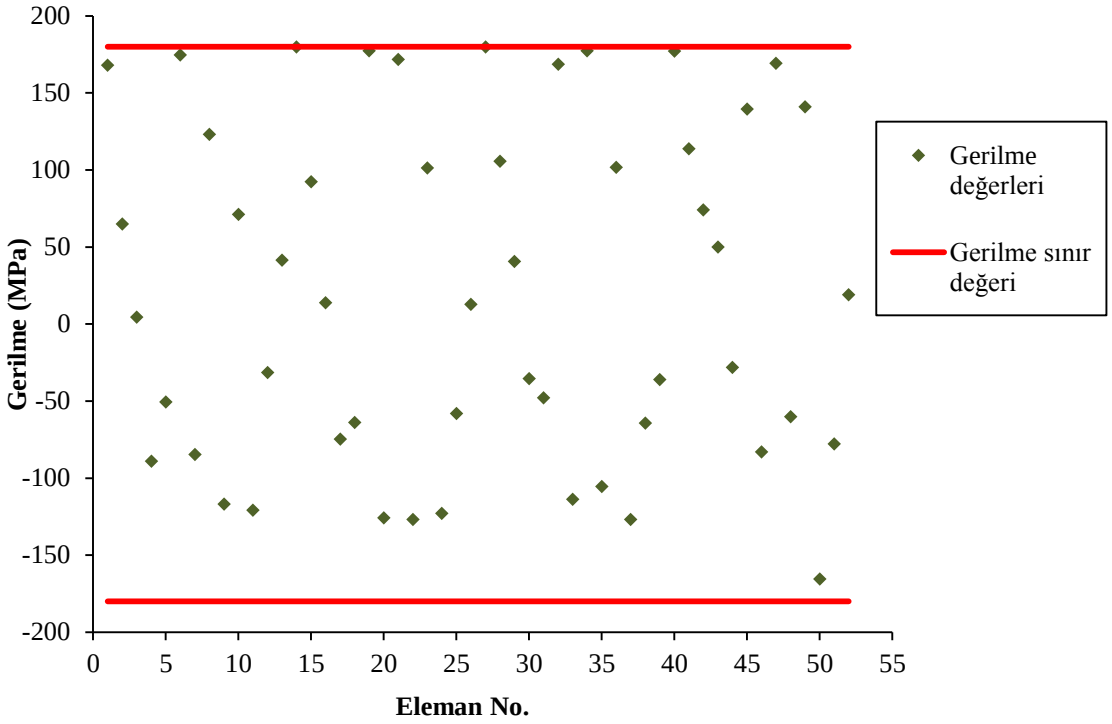
Çizelge 4.32. 52 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri	Li ve ark.	Kaveh ve Talatahari	Sadollah ve ark.	Kaveh ve Mahdavi	Dede	Baghlani ve ark.	Sadollah ve ark.		Cheng ve ark.	Huu ve ark.	Mevcut Çalışma
A_i (cm^2)	(2009)	(2009c)	(2012)	(2014)	(2014)	(2014)	(2015)		(2016)	(2016)	
	HPSO	DHPSACO	MBA	CBO	TLBO	AFA	WCA	IMBA	HHS	aeDE	JA
A_1-A_4	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58	46.58
A_5-A_{10}	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61
A_{11}-A_{13}	3.63	4.94	4.94	3.88	4.94	3.63	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94
A_{14}-A_{17}	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03
A_{18}-A_{23}	9.40	10.08	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40
A_{24}-A_{26}	4.94	2.85	4.94	5.06	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94
A_{27}-A_{30}	22.39	22.90	22.39	22.39	22.39	22.39	22.39	22.39	22.39	22.39	22.39
A_{31}-A_{36}	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08	10.08
A_{37}-A_{39}	3.88	3.88	4.94	5.06	4.94	6.41	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94
A_{40}-A_{43}	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84	12.84
A_{44}-A_{49}	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61	11.61
A_{50}-A_{52}	7.92	5.06	4.94	5.06	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94
Ağırlık (kg)	864.32	864.02	863.01	861.53	863.01	863.35	863.01	863.01	863.01	863.01	863.01
Yapı analiz sayısı	150000	5300	5450	3840	6000	52600	7100	4750	5000	3720	3321

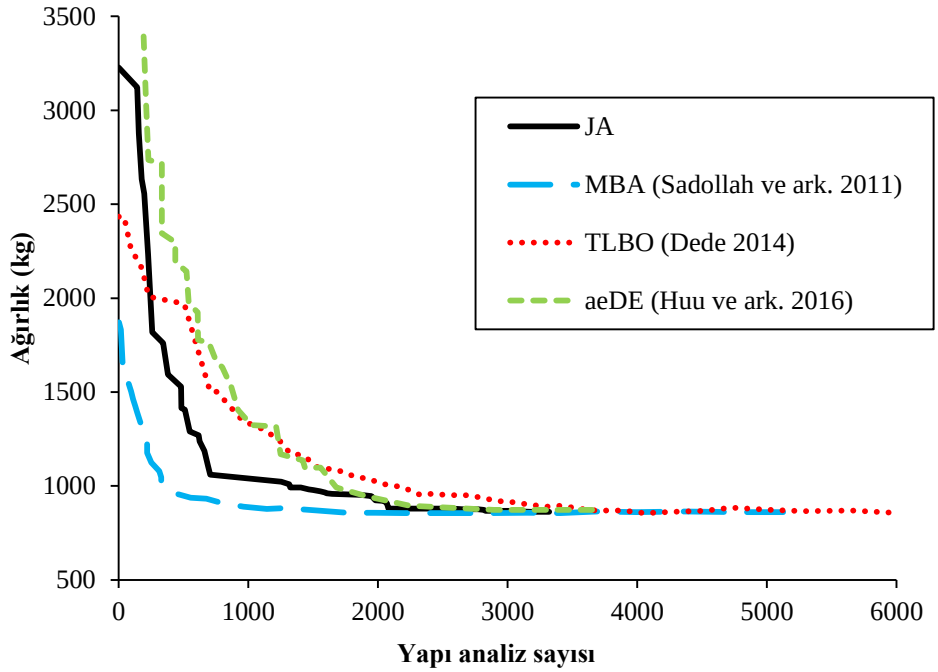
Çizelge 4.33. 52 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	864.32	*	*	*	0
DHPSACO	864.02	*	*	*	0.2726
MBA	863.01	864.58	867.56	1.86	0
CBO	861.53	890.46	1026.39	48.09	0.0484
TLBO	863.01	*	*	*	0
AFA	863.35	*	*	*	0
WCA	863.01	866.30	867.56	3.22	0
IMBA	863.01	863.22	864.02	0.51	0
HHS	863.01	863.91	*	0.59	0
aeDE	863.01	864.88	873.49	3.03	0
JA	863.01	863.07	863.62	0.20	0

*Mevcut değil



Şekil 4.36. 52 elemanlı ayrık değişkenli düzlem kafes yapıda optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri



Şekil 4.37. 52 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi

4.2.5. 72 Elemanlı Uzay Kafes Yapı

72 elemanlı uzay kafes yapının geometrisi ve I. kat için eleman ve düğüm numaralandırılması Şekil 4.6.'daki gibidir. Bölüm 4.1.3.'te sürekli tasarım değişkenli olarak optimize edilen yapı bu bölümde ayrık tasarım değişkenli olarak optimize edilecektir. Yapıda malzeme özellikleri, eleman gerilme ve düğüm noktası deplasman sınırlayıcıları, eleman gruplandırılması ve yapıya etki eden yükler Bölüm 4.1.3.'te açıklandığı gibidir. Tasarım değişkenlerinin seçildiği enkesit listesine göre iki farklı optimizasyon durumu söz konusudur. I. optimizasyon durumunda tasarım değişkenleri D=[0.65 1.29 1.94 2.58 3.23 3.87 4.52 5.16 5.81 6.45 7.1 7.74 8.39 9.03 9.68 10.32 10.97 11.61 12.26 12.90 13.55 14.19 14.84 15.48 16.13 16.77 17.42 18.06 18.71 19.35 20 20.65] (cm^2) şeklinde verilen enkesit listesinden, II. optimizasyon durumunda ise tasarım değişkenleri Çizelge 4.23.'teki enkesitlerden seçilecektir.

Çizelge 4.34. ve 4.36. ile sırasıyla I. ve II. optimizasyon durumu için JA ile elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. I. optimizasyon durumunda MBA (Sadollah ve ark. 2012) ve HPSO (Li ve ark. 2009)

yöntemleri dışında JA da dahil olmak üzere bütün yöntemler aynı tasarımı elde etmiştir. Çizelge 4.34.'te MBA (Sadollah ve ark. 2012) ile elde edilen optimum tasarımın, ilgili çalışmada verilen 174.88 kg değerinden farklı olarak 194.47 kg olduğu ve Çizelge 4.35.'te görüldüğü gibi sınırlayıcı ihlal yüzdesinin % 49.85 olduğu tespit edilmiştir. 2. optimizasyon durumu için Çizelge 4.36.'da görüleceği gibi JA ile bulunan tasarımın AFA (Baghlani ve ark. 2014), WCA ve IMBA (Sadollah ve ark. 2015) ile bulunan tasarımlarla aynı olduğu diğer yöntemlerle bulunan bulunan tasarımlardan ise daha hafif olduğu belirlenmiştir. Her iki optimizasyon durumunda da JA'nın diğer bütün yöntemlerden daha az analiz sayısı sonucunda optimum tasarımı bulduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.35. ve 4.37.'de JA'ya ait standart sapma değerlerinin oldukça küçük olması yöntemin tutarlılığını kanıtlamaktadır. Şekil 4.38. ve 4.39.'da, JA ile elde edilen optimum tasarıma ait eleman gerilme değerleri, Şekil 4.40. ve 4.41.'de ise optimum tasarıma ait düğüm deplasman değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.34. 72 elemanlı ayrık değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2)	Li ve ark. (2009)	Kaveh ve Talatahari (2009)	Sadollah ve ark. (2012)	Kaveh ve Mahdavi (2014)	Dede (2014)	Baghlani ve ark. (2014)	Sadollah ve ark. (2015)		Cheng ve ark. (2016)	Mevcut çalışma
	HPSO	DHPSACO	MBA	CBO	TLBO	AFA	WCA	IMBA	HHS	JA
A_1-A_4	13.55	12.26	12.90	12.26	12.26	12.90	12.26	12.26	12.26	12.26
A_5-A_{12}	3.87	3.23	3.87	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
A_{13}-A_{16}	0.65	0.65	2.58	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{17}-A_{18}	0.65	0.65	3.87	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{19}-A_{22}	9.03	8.39	3.23	9.03	9.03	8.39	9.03	9.03	8.39	9.03
A_{23}-A_{30}	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
A_{31}-A_{34}	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{35}-A_{36}	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{37}-A_{40}	3.23	3.87	9.03	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.87	3.23
A_{41}-A_{48}	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23	3.23
A_{49}-A_{52}	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{53}-A_{54}	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
A_{55}-A_{58}	1.29	1.29	12.26	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
A_{59}-A_{66}	3.23	3.87	3.23	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87
A_{67}-A_{70}	1.94	2.58	0.65	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58
A_{71}-A_{72}	4.52	3.87	0.65	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87
Ağırlık (kg)	176.42	174.88	174.88*	174.88	174.88	174.88	174.88	174.88	174.88	174.88
Analiz sayısı	50000	5330	9450	4500	4000	12200	3200	5750	5000	1873

*MBA algoritmasında bulunan optimum tasarım değişkenlerinin kontrolü yapılmış ve ağırlık değerinin 194.47 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.35. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (I. optimizasyon durumu)

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	176.42	*	*	*	0
DHPSACO	174.88	*	*	*	0.0164
MBA	174.88	175.84	177.18	0.73	49.85
CBO	174.88	181.89	209.10	7.71	0
TLBO	174.88	*	*	*	0
AFA	174.88	*	*	*	0
WCA	174.88	175.02	175.45	0.25	0
IMBA	174.88	174.98	175.97	0.19	0
HHS	174.88	175.11	*	0.52	0
JA	174.88	175.16	175.97	0.47	0

*Mevcut değil

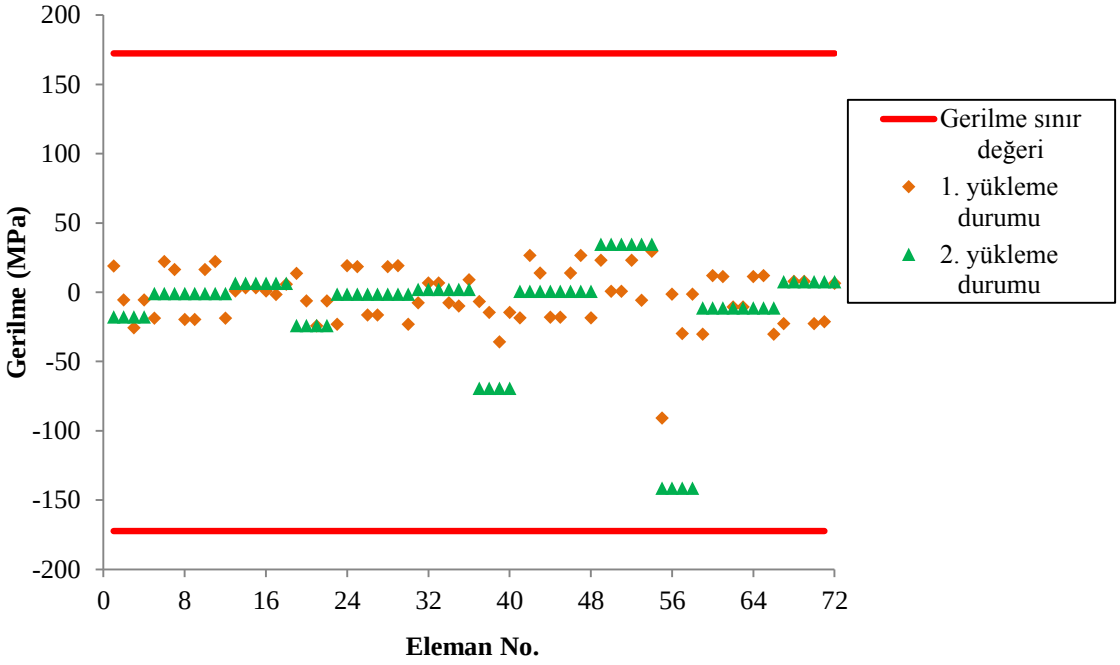
Çizelge 4.36. 72 elemanlı ayrık değişkenli uzay kafes yapının optimum tasarım sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

Tasarım değişkenleri	Li ve ark.	Kaveh ve Talatahari	Sadollah ve ark.	Kaveh ve Mahdavi	Baghlani ve ark.	Sadollah ve ark.		Mevcut çalışma
A_i (cm^2)	(2009)	(2009)	(2012)	(2014)	(2014)	(2015)		
	HPSO	DHPSACO	MBA	CBO	AFA	WCA	IMBA	JA
A_1-A_4	32.06	11.61	1.26	10.45	12.84	12.84	12.84	12.84
A_5-A_{12}	7.92	2.85	3.63	3.63	3.63	2.85	2.85	3.63
A_{13}-A_{16}	0.72	0.91	2.85	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{17}-A_{18}	0.72	0.72	3.88	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{19}-A_{22}	18.58	7.92	2.85	9.40	7.92	7.92	7.92	7.92
A_{23}-A_{30}	9.40	3.63	2.85	2.85	2.85	3.63	3.63	2.85
A_{31}-A_{34}	0.91	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{35}-A_{36}	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{37}-A_{40}	10.08	3.63	8.17	3.88	3.63	3.63	3.63	3.63
A_{41}-A_{48}	7.92	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63
A_{49}-A_{52}	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{53}-A_{54}	1.26	1.61	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
A_{55}-A_{58}	2.52	1.26	11.61	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
A_{59}-A_{66}	9.40	3.63	3.88	3.88	3.63	3.63	3.63	3.63
A_{67}-A_{70}	4.94	2.85	0.72	2.52	2.52	2.52	2.52	2.52
A_{71}-A_{72}	10.08	3.63	0.72	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63
Ağırlık (kg)	423.25	178.44	177.24	177.39	176.60	176.60	176.60	176.60
Analiz sayısı	50000	6750	11600	4500	13200	4600	6250	3376

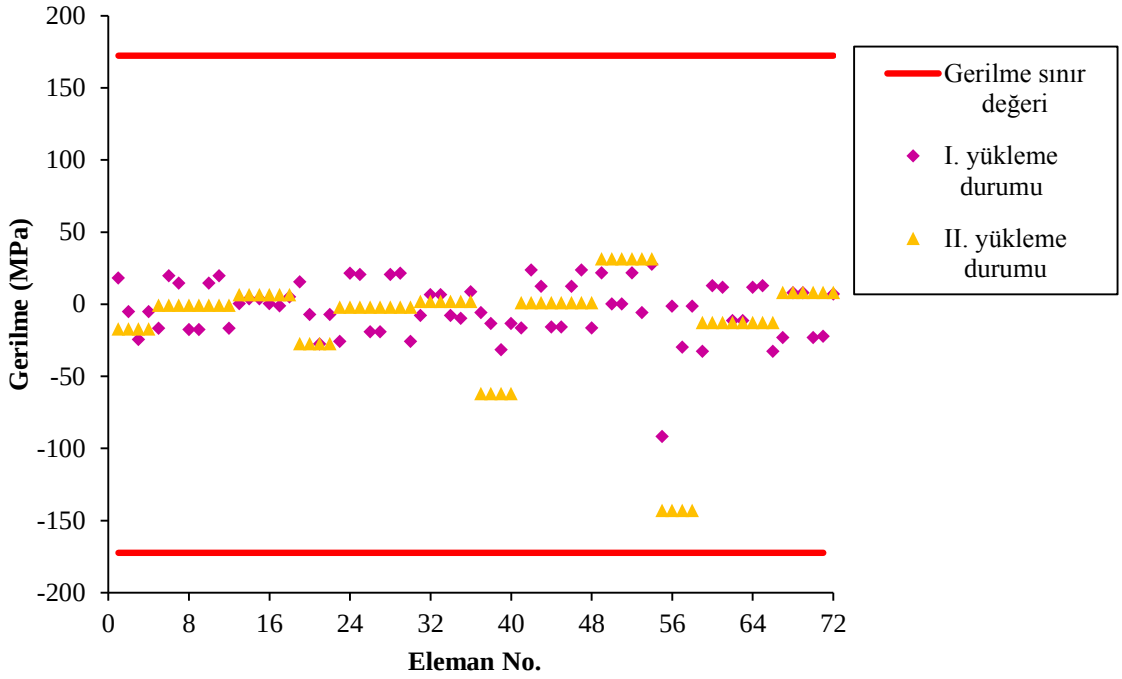
Çizelge 4.37. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması (II. optimizasyon durumu)

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
HPSO	423.25	*	*	*	0
DHPSACO	178.44	*	*	*	0.0424
MBA	177.24	179.37	181.21	1.38	147.37
CBO	177.39	183.12	224.97	11.25	0.0076
AFA	176.60	*	*	*	0
WCA	176.60	176.88	178.62	0.65	0
IMBA	176.60	176.82	176.66	0.38	0
JA	176.60	176.67	176.83	0.07	0

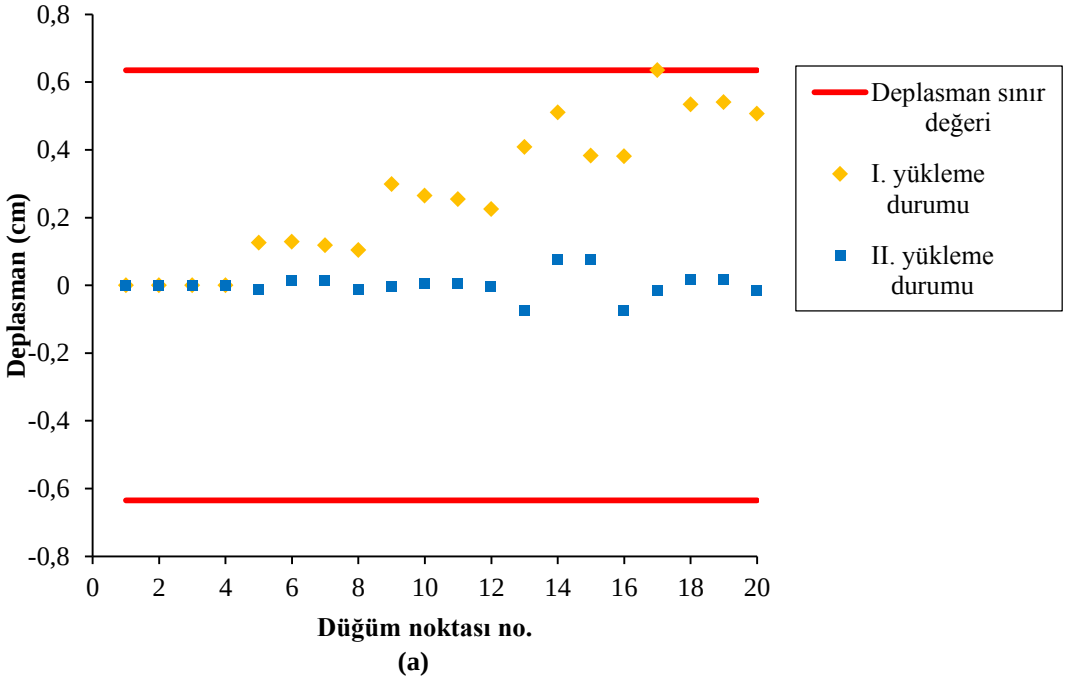
*Mevcut değil



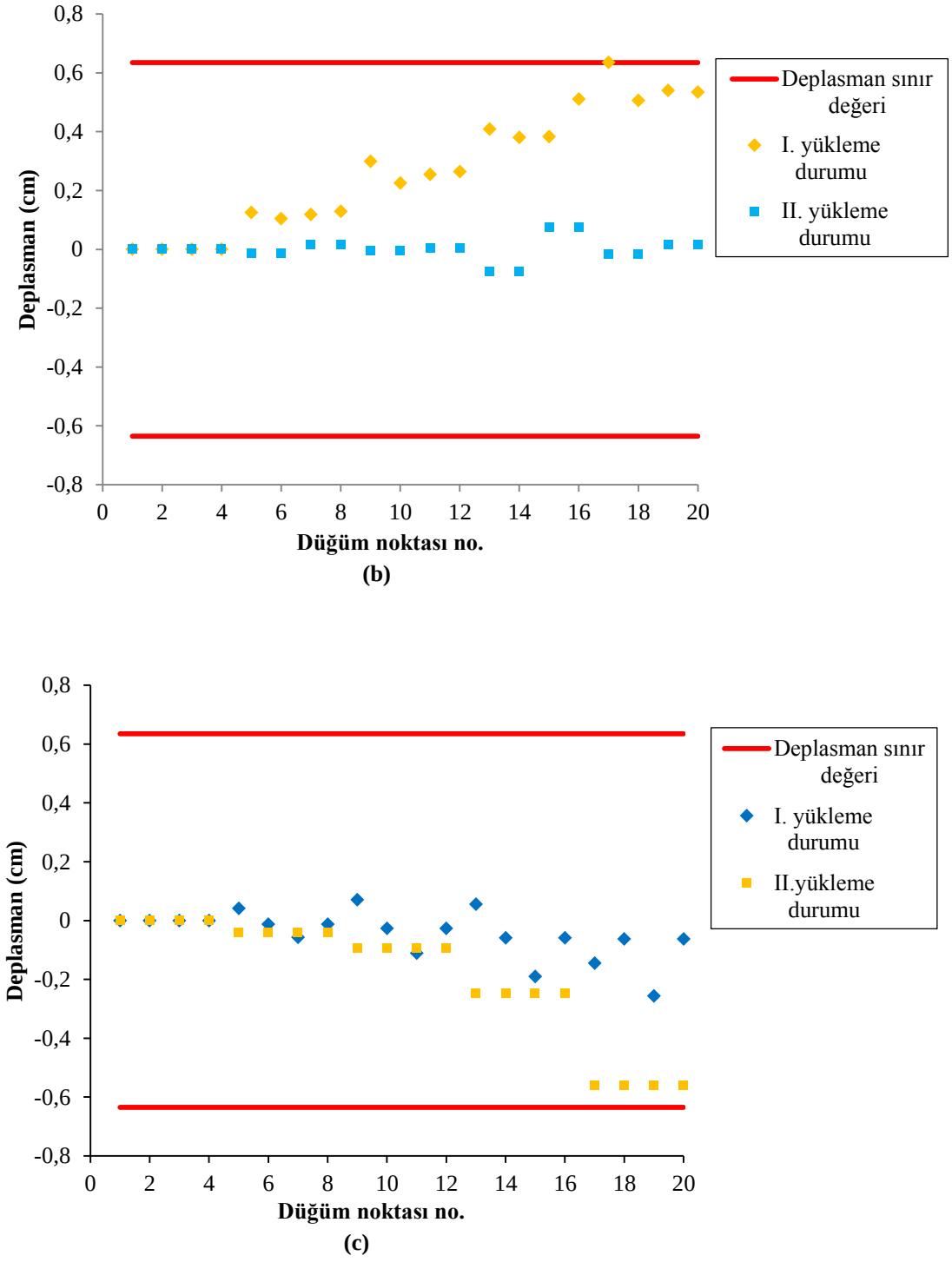
Şekil 4.38. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapıda eleman gerilme değerleri (I. optimizasyon durumu)



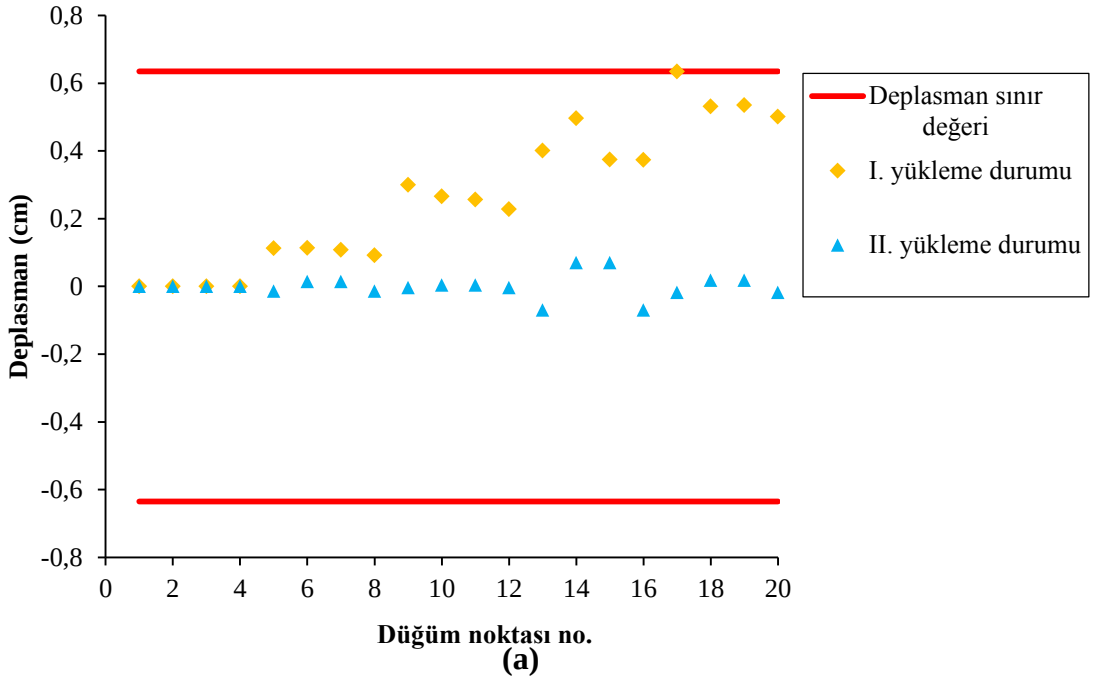
Şekil 4.39. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapıda eleman gerilme değerleri (II. optimizasyon durumu)



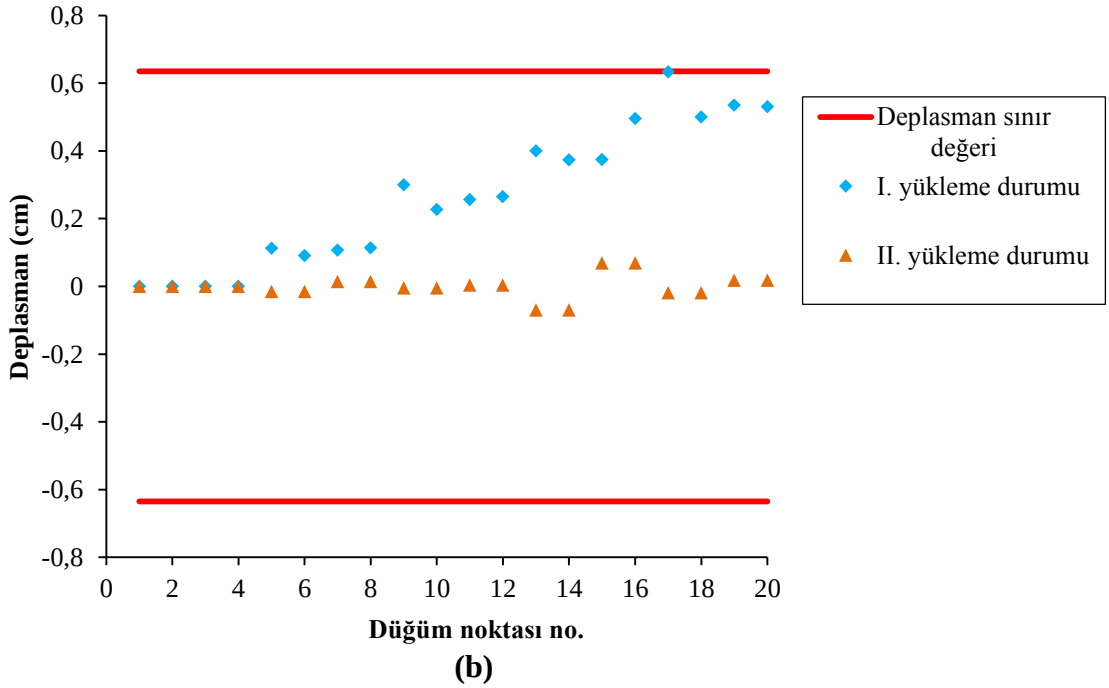
(a)



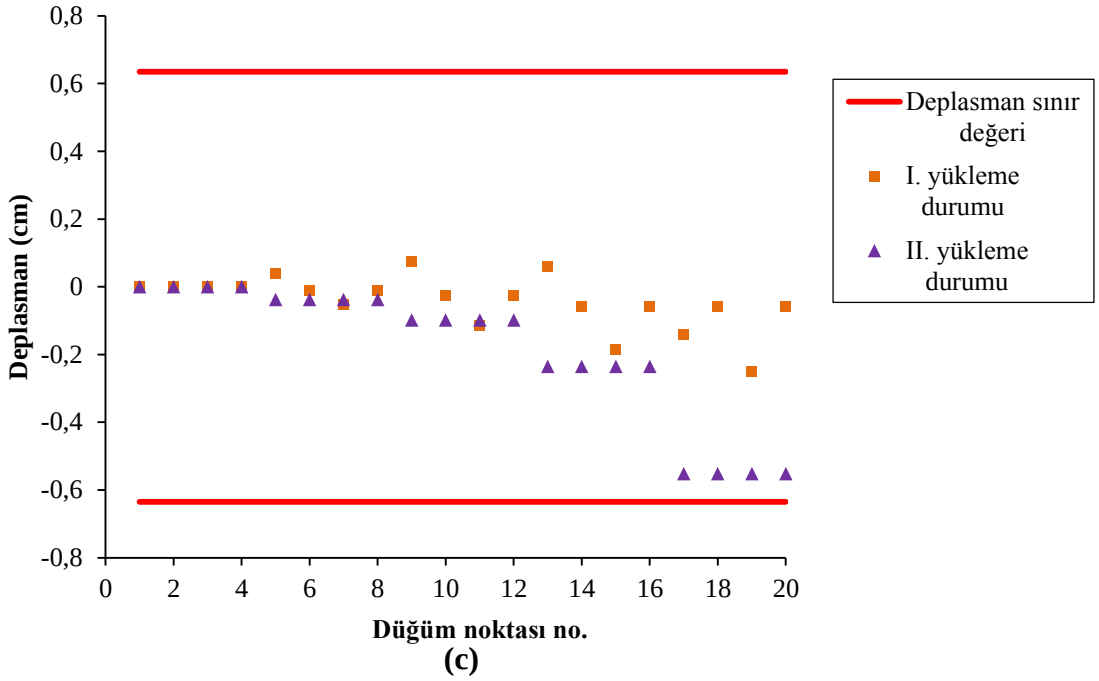
Şekil 4.40. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının I. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait düğüm deplasman değerleri a) *x* doğrultusu b) *y* doğrultusu c) *z* doğrultusu


0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
Deplasman (cm)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Düğüm noktası no.
Deplasman sınır değeri
I. yükleme durumu
II. yükleme durumu

(a)

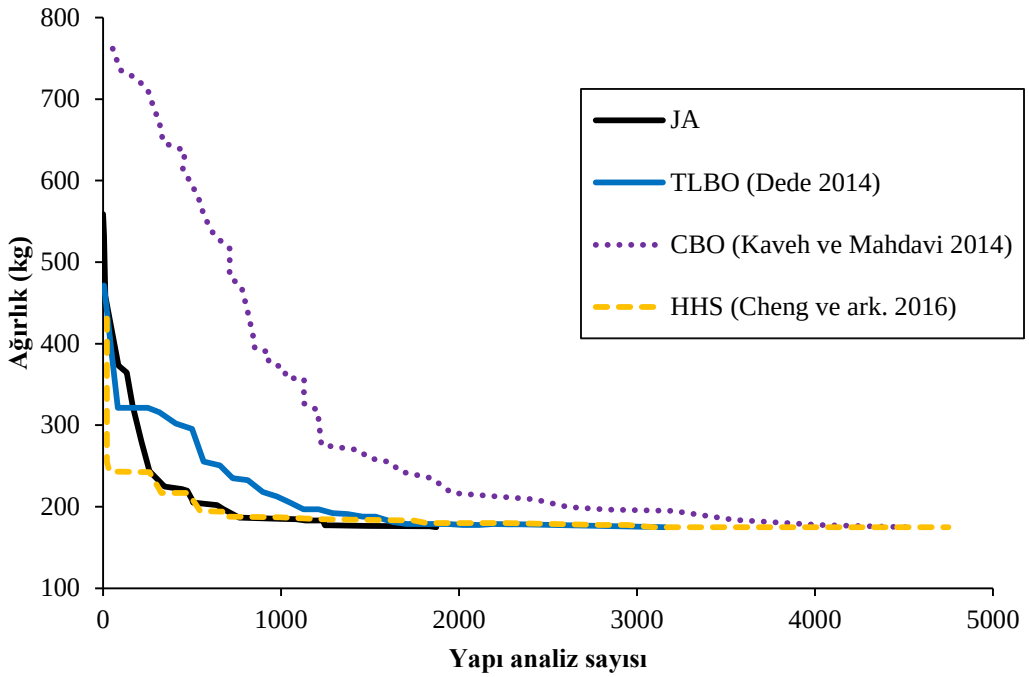

0,8
0,6
0,4
0,2
0
-0,2
-0,4
-0,6
-0,8
Deplasman (cm)
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Düğüm noktası no.
Deplasman sınır değeri
I. yükleme durumu
II. yükleme durumu

(b)

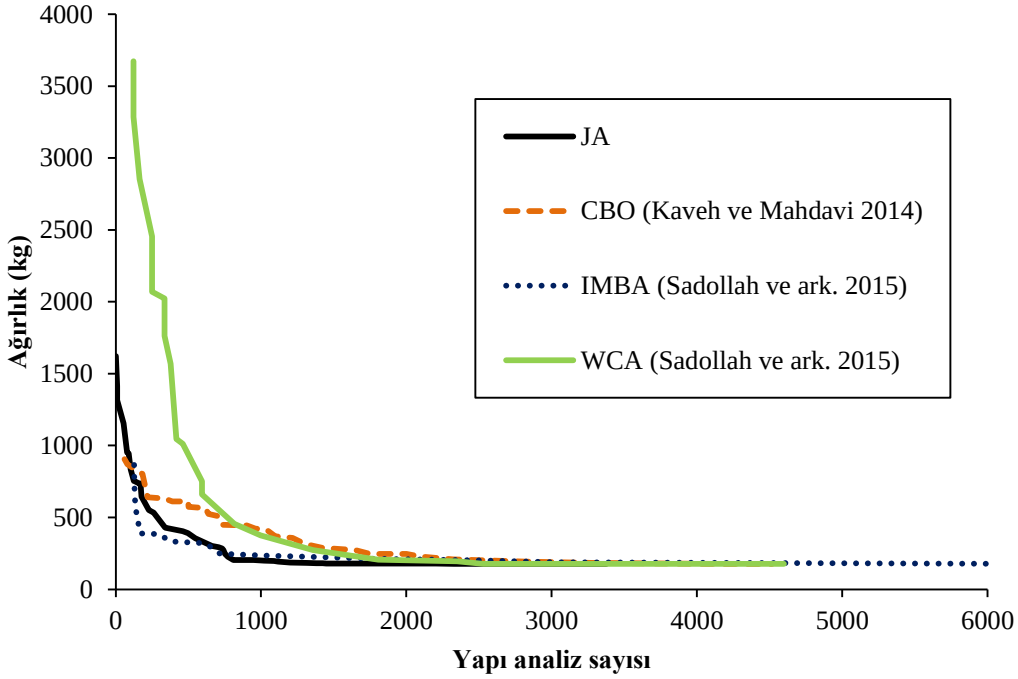


Şekil 4.41. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının II. optimizasyon durumu için optimum tasarıma ait düğüm deplasman değerleri a) *x* doğrultusu b) *y* doğrultusu c) *z* doğrultusu

JA ve literatürdeki bazı yöntemler için optimizasyon sürecinde yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi Şekil 4.42 ve 4.43.'te gösterilmiştir. Bu şekillerden JA'nın diğer tüm yöntemlere göre çok daha hızlı şekilde optimum tasarımı elde ettiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.42 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (I. optimizasyon durumu)



Şekil 4.43. 72 elemanlı ayrık tasarım değişkenli uzay kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi (II. optimizasyon durumu)

4.2.6. 200 Elemanlı Ayrık Tasarım Değişkenli Düzlem Kafes Yapı

200 elemanlı düzlem kafes yapının geometrisi Şekil 4.15.'de gösterilmiştir. Bölüm 4.1.4.'de sürekli tasarım değişkenli olarak göz önüne alınan yapı bu bölümde ayrık tasarım değişkenli olarak optimize edilecektir. Yapıda malzeme özellikleri, gerilme ve düğüm noktası sınırlayıcıları, eleman gruplandırılması ve yükleme durumları Bölüm 4.1.4.'te açıklandığı gibidir.

Ayrık tasarım değişkenleri, D=[0.65 2.24 2.84 3.48 6.15 6.97 7.57 8.60 9.60 11.38 13.82 17.40 18.06 20.20 23 24.60 31 38.40 42.40 46.40 55 60 70 86 92.19 110.77 123.74 152.77 181.16 217.42] (cm^2) enkesit listesinden seçilecektir.

Çizelge 4.38'de JA ve ESASS (Azad ve Hasançebi 2014), HHS (Cheng ve ark. 2016) ve GA (Toğan ve Daloğlu 2008) yöntemleriyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan JA'nın en hafif ağırlıklı kafes yapı tasarımına sahip olduğu görülmektedir. HHS (Cheng ve ark. 2016) yöntemiyle elde edilen tasarım JA ile bulunan tasarıma göre daha hafif olmasına rağmen Çizelge 4.39.'da görüldüğü gibi % 12.53 oranında sınırlayıcı ihlali olduğundan JA ile kıyaslanması mümkün değildir. JA'nın tüm yöntemler arasında 4653 değeriyle optimum tasarımı bulmak için gerekli analiz sayısı bakımından da en iyi yöntem olduğu görülmektedir. JA ile elde edilen optimum tasarımda eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri Şekil 4.44.'te karşılaştırılmıştır. Bu şekilden JA'nın tasarım sınırlayıcısını sağladığı görülmektedir. Şekil 4.45.'te JA, ESASS (Azad ve Hasançebi 2014) ve HHS (Cheng ve ark. 2016) yöntemleriyle yapılan optimizasyonda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden HHS (Cheng ve ark. 2016) ile yaklaşık aynı hızda olduğu, ESASS (Azad ve Hasançebi 2014) yöntemine göre ise daha hızlı şekilde optimum tasarımı bulduğu belirlenmiştir.

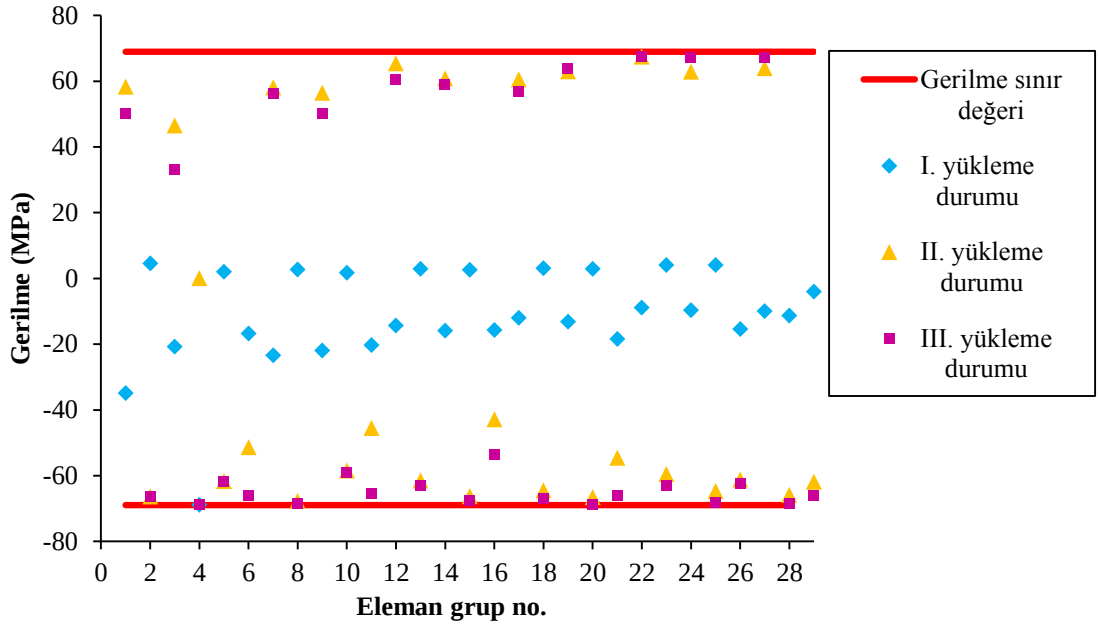
Çizelge 4.38. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimum tasarımı sonuçlarının diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm^2)	Toğan ve Daloğlu (2008)	Azad ve Hasançebi (2014)	Cheng ve ark. (2016)	Mevcut çalışma
	GA	ESASS	HHS	JA
1	2.24	0.65	0.65	0.65
2	6.97	6.15	6.15	6.15
3	0.65	0.65	0.65	2.24
4	0.65	0.65	0.65	0.65
5	13.82	13.82	13.82	13.82
6	2.24	2.24	2.24	2.24
7	0.65	0.65	0.65	0.65
8	23.00	20.20	20.20	20.20
9	2.24	0.65	0.65	0.65
10	31.00	31.00	31.00	31.00
11	2.84	2.24	2.84	2.84
12	2.84	0.65	2.24	2.24
13	38.40	38.40	38.40	38.40
14	2.24	0.65	2.24	0.65
15	42.40	42.40	42.40	42.40
16	6.15	2.84	6.15	6.15
17	0.16	0.24	0.16	0.05
18	3.87	3.26	3.87	3.87
19	0.05	0.20	0.05	0.24
20	4.22	3.87	4.22	4.22
21	6.15	6.15	6.97	6.15
22	11.38	7.57	2.24	0.65
23	85.81	70.00	86.00	86.00
24	2.24	2.84	6.15	0.65
25	85.81	70.00	86.00	86.00
26	13.82	11.38	11.38	6.15
27	31.00	55.00	24.60	38.40
28	60.00	86.00	55.00	70.00
29	110.77	86.00	110.77	92.19
Ağırlık (kg)	12947.56	12735.04	12321.40	12375.37
Analiz sayısı	51360	11156	5000	4693

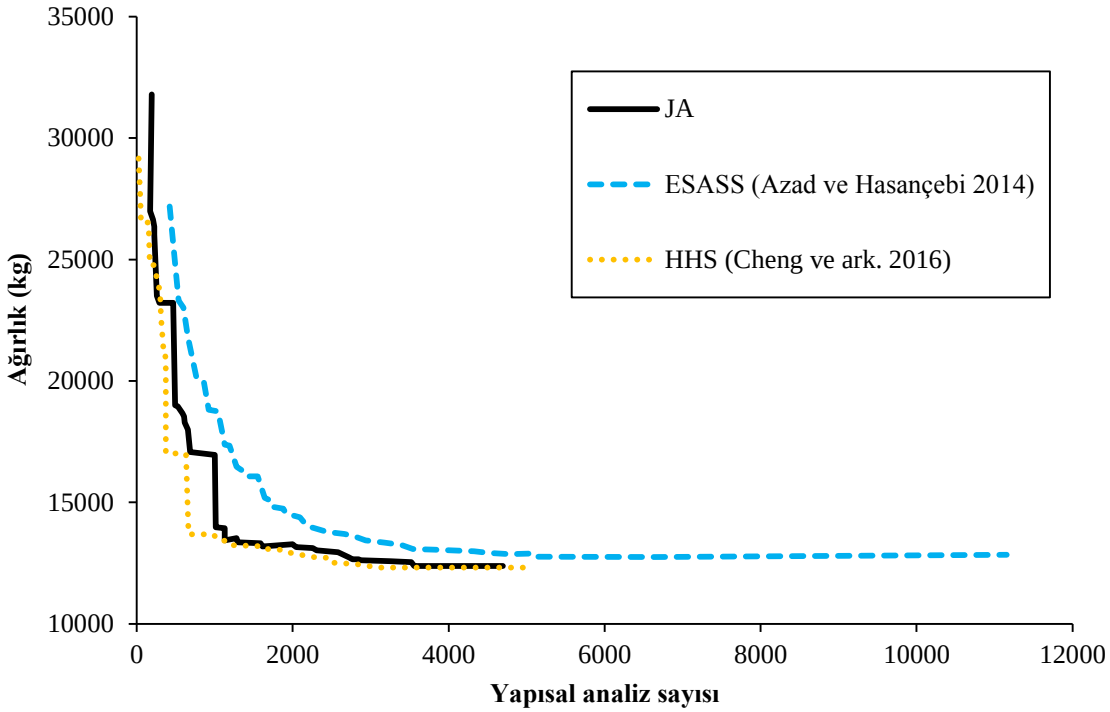
Çizelge 4.39. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının istatistiksel değerleri ve sınırlayıcı ihlal yüzdelerinin karşılaştırılması

Metot	Optimum ağırlık (kg)	Ortalama ağırlık (kg)	En kötü ağırlık (kg)	Standart sapma (kg)	Sınırlayıcı ihlali (%)
GA	12947.56	*	*	*	0
ESASS	12735.04	*	*	*	0
HHS	12321.40	12773.19	*	521.60	12.53
JA	12375.37	12645.58	12750.07	131.83	0

*Mevcut değil



Şekil 4.44. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapıda optimum tasarım için eleman gruplarına ait en büyük gerilme değerleri



Şekil 4.45. 200 elemanlı ayrık tasarım değişkenli düzlem kafes yapının optimizasyonunda yapı ağırlığının analiz sayısı ile değişimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması ile ayrık ve sürekli tasarım değişkenli düzlem ve uzay kafes yapıların optimizasyonu 2016 yılında öne sürülen JAYA algoritması yöntemiyle icra edilmiştir. Sürekli tasarım değişkenli beş kafes yapı ve ayrık tasarım değişkenli olarak da altı kafes yapının optimize edilmesiyle elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanacaktır:

I. JA'ya ile elde edilen optimum tasarımlara ait ağırlık değerleri literatürdeki diğer yöntemlerden elde edilen optimum tasarımlara ait ağırlık değerleriyle karşılaştırıldığında JA'nın bazı durumlarda diğer yöntemlerle aynı ağırlıkta optimum tasarımlar bulduğu ancak çoğu durumda daha hafif tasarımlar elde ettiği belirlenmiştir.

II. Optimum tasarıma ulaşmak için gerekli yapı analiz sayıları karşılaştırıldığında JA'nın diğer yöntemlerden çok daha az yapı analiz sayısı sonunda optimum tasarıma ulaştığı tespit edilmiştir.

III. JA'nın hiçbir tasarım örneğinde sınırlayıcı ihlali yapmasına müsaade edilmeyerek yöntemin güvenilirliği sağlanmıştır.

IV. Tüm örneklerde JA'nın 20 farklı icrası sonucunda elde edilen 20 ağırlık değerinin standart sapması hesaplandığında bu değerin ortalama ağırlık değerine göre oldukça küçük olduğu görülmüştür. Bu sonuç JA'nın oldukça tutarlı bir optimizasyon yöntemi olduğunu teyit etmektedir.

V. JA çok basit ve genel bir yöntem olduğu için ileride yapılacak çalışmalarda çerçeve ve kubbe yapılar gibi farklı sistemlerin optimizasyonunda da kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

Adeli, H., Cheng, N. T. 1994. Concurrent genetic algorithms for optimization of large structures. ***Journal of Aerospace Engineering,*** 7(3): 276-296.

American Institute of Steel Construction (AISC). 1989. Manual of steel construction allowable stress design, 9th ed. Chicago, IL.

Azad, S. K., Hasançebi, O. 2014. An elitist self-adaptive step-size search for structural design optimization. ***Applied Soft Computing,*** 19: 226-235.

Bagal, R.N., Mathada, D.V.S. 2015. Design Optimization of Steel Truss using OpenSees and SAP2000. ***International Journal of Scientific Engineering and Technology Research***, 4(18): 3496,3501

Baghlani, A., Makiabadi, M. H., Sarcheshmehpour, M. 2014. Discrete optimum design of truss structures by an improved firefly algorithm. ***Advances in Structural Engineering***, 17(10): 1517-1530.

Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Yang, X. S. 2015. Sizing optimization of truss structures using flower pollination algorithm. ***Applied Soft Computing***, 37: 322-331.

Cheng, M. Y., Prayogo, D., Wu, Y. W., Lukito, M. M. 2016. A Hybrid Harmony Search algorithm for discrete sizing optimization of truss structure. ***Automation in Construction***, 69: 21-33.

Computer and Structures Inc., SAP2000 v.16, 2013. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.

Dede, T. 2014. Application of teaching-learning-based-optimization algorithm for the discrete optimization of truss structures. ***ksce journal of civil engineering,*** 18(6): 1759-1767.

Değertekin, S.Ö. 2001. Yarı-rijit birleşimli çelik çerçeve sistemlerin genetik algoritma yöntemiyle optimum tasarımı. Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 4.

Degertekin, S.O. 2012. Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures. ***Computers & structures***, 92: 229-241.

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

Dorigo M. 1992. Optimization, learning and natural algorithms (in Italian). PhDThesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, IT;

Gandomi, A. H., Talatahari, S., Yang, X. S., Deb, S. 2013. Design optimization of truss structures using cuckoo search algorithm. ***The Structural Design of Tall and Special Buildings,*** 22(17), 1330-1349.

Geem, Z. W., Kim, J. H., Loganathan, G. V. 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. ***Simulation,*** 76(2), 60-68.

Hasançebi, O., Erbatur, F. 2002. On efficient use of simulated annealing in complex structural optimization problems. ***Acta mechanica,*** 157(1), 27-50.

Hasançebi, O. 2008. Adaptive evolution strategies in structural optimization: Enhancing their computational performance with applications to large-scale structures. ***Computers & structures,*** *86*(1): 119-132.

Ho-Huu, V., Nguyen-Thoi, T., Vo-Duy, T., Nguyen-Trang, T. 2016. An adaptive elitist differential evolution for optimization of truss structures with discrete design variables. ***Computers & Structures,*** 165: 59-75.

Holland, J. H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. *Ann Arbor, MI: University of Michigan Press*.

Jalili, S., Hosseinzadeh, Y. 2015. A cultural algorithm for optimal design of truss structures. ***Latin American Journal of Solids and Structures***, 12(9): 1721-1747.

Kaveh, A., Talatahari, S. 2009a. Size optimization of space trusses using Big Bang–Big Crunch algorithm. ***Computers & structures***, 87(17): 1129-1140.

Kaveh, A., Talatahari, S. 2009b. Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. ***Computers & Structures***, 87(5): 267-283.

Kaveh, A., Talatahari, S. 2009c. A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables. ***Journal of Constructional Steel Research,*** 65(8): 1558-1568.

Kaveh, A., Mahdavi, V. R. 2014. Colliding bodies optimization method for optimum discrete design of truss structures. ***Computers & Structures,*** 139: 43-53.

Kaveh, A., Bakhshpoori, T., Afshari, E. 2014. An efficient hybrid particle swarm and swallow swarm optimization algorithm. ***Computers & Structures,*** 143: 40-59.

Kaveh, A., Bakhshpoori, T. 2016. A new metaheuristic for continuous structural optimization: water evaporation optimization. ***Structural and Multidisciplinary Optimization,*** 54(1): 23-43.

Lee, K. S., Geem, Z. W., Lee, S. H., Bae, K. W. 2005. The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization. ***Engineering Optimization***, 37(7): 663-684.

Li, L. J., Huang, Z. B., Liu, F. 2009. A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables. ***Computers & Structures,*** 87(7): 435-443.

Mathworks, I. 2014. MATLAB: R2014a. Mathworks Inc, Natick.

McGuire, W., Gallagher, R. H. Ve Ziemian, R. D. 2000. Matrix structural analysis , John Wiley &Sons

Nolle, L. 2006. On a hill-climbing algorithm with adaptive step size: towards a control parameter-less black-box optimisation algorithm. ***Computational Intelligence, Theory and Applications,*** 587-595.

OPENSEES v2.5.0, 2017. Erişim:[http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/home/about.php] Erişim tarihi: 12.04.2017

Parkinson, A.R., Balling, R., Hedengren, J.D. 2013. Optimization methods for Engineering design. Brigham Young University, 5.

Rahami, H., Kaveh, A., Aslani, M., Najian Asl, R. 2011. A hybrid modified genetic-nelder mead simplex algorithm for large-scale truss optimization. ***Iran University of Science & Technology,*** 1(1), 29-46.

Rao, R. V., Savsani, V. J., Vakharia, D. P. 2011. Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. ***Computer-Aided Design,*** *43*(3): 303-315.

Rao, R. 2016. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. ***International Journal of Industrial Engineering Computations,*** *7*(1): 19-34.

Rao, R. V., More, K. C., Taler, J., Ocłoń, P. 2016. Dimensional optimization of a micro-channel heat sink using Jaya algorithm. ***Applied Thermal Engineering***, 103: 572-582.

Rao, R. V., Waghmare, G. G. 2017. A new optimization algorithm for solving complex constrained design optimization problems. ***Engineering Optimization***, 49(1): 60-83.

Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H., Hamdi, M. 2012. Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. ***Computers & Structures,*** 102: 49-63.

Sadollah, A., Eskandar, H., Bahreininejad, A., Kim, J. H. 2015. Water cycle, mine blast and improved mine blast algorithms for discrete sizing optimization of truss structures. ***Computers & Structures,*** 149: 1-16.

Sonmez, M. 2011a. Artificial Bee Colony algorithm for optimization of truss structures. ***Applied Soft Computing***, 11(2): 2406-2418.

Sonmez, M. 2011b. Discrete optimum design of truss structures using artificial bee colony algorithm. ***Structural and multidisciplinary optimization***, 43(1): 85-97.

Talatahari, S., Kheirollahi, M., Farahmandpour, C., Gandomi, A. H. 2013. A multi-stage particle swarm for optimum design of truss structures. ***Neural Comp. and App.,*** 23(5): 1297-1309.

Talatahari, S., Gandomi, A. H., Yun, G. J. 2014. Optimum design of tower structures using firefly algorithm. ***The Structural Design of Tall and Special Buildings***, 23(5), 350-361.

Toğan, V., Daloğlu, A. T. 2008. An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping. ***Computers & Structures,*** 86(11), 1204-1218.

Tezcan, S. 1970. Çubuk sistemlerin elektronik hesap makinaları ile çözümü. İTÜ yayını, Sayı:12 İstanbul.

Yang, X.S. 2010. Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic Applications. John Wiley & Sons. UK.

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim Behram UĞUR 1991 yılında Şırnak'ta doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Şırnak'ta tamamladı. 2013 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Ekim 2013'te Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen aynı görevi sürdürmektedir.

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	İBRAHİM BEHRAM UĞUR
ÖĞRENCİ NO	14806009
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2016/2017
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	İNŞAAT MÜH.
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	Ayrık ve Sürekli Tasarım Değişkenli Kafes Yapıların Jaya Algoritması ile Optimizasyonu
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	153
BENZERLİK ORANI	% 9
RAPORLAMA TARİHİ	22/06/ 2017

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 153 sayfalık kısmına ilişkin, 22/06/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 'tür.

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.

İbrahim Behram UĞUR

22/06/2017	22/06/2017
Tez Danışmanı	**Anabilim Dalı Başkanı**
Prof. Dr. S. Özgür DEĞERTEKİN	Doç. Dr. Halil GÖRGÜN