

Kafes yapıların JAYA algoritmasıyla doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımı

JAYA algorithm for optimum design of truss structures under natural frequency constraints

S. Özgür Değertekin^{1*}, Gülay Yalçın Bayar²

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, sozgurd@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8885-6468

² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, gybayar@dicle.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-7575-8559

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 18 Nisan 2020
Düzeltilme: 8 Mayıs 2020
Kabul: 15 Mayıs 2020

Anahtar kelimeler:

Optimum Tasarım, Kafes Yapılar,
Doğal Frekans Sınırlayıcıları,
JAYA Algoritması.

ÖZET

Bu çalışma ile düzlem ve uzay kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında Jaya algoritması kullanılarak optimum (minimum ağırlıklı) tasarımı yapılmıştır. Jaya, Sanskritçe'de "Zafer" anlamına gelmektedir. Jaya algoritması (JA), optimum tasarım probleminin çözümünde en iyi çözüme yaklaşma ve en kötü çözümden uzaklaşma prensibini esas almaktadır. JA'nın geçerliliğini göstermek için daha önce farklı optimizasyon yöntemleri ile optimize edilmiş olan 200 elemanlı düzlem kafes ve 72 elemanlı uzay kafes yapılar kullanılmıştır. JA'nın performansı, optimum ağırlık ve optimum ağırlığın elde edilmesi için gerekli yapı analiz sayısı bakımından literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar, JA'nın literatürdeki diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar elde edebildiğini göstermektedir.

Doi: 10.24012/dumf.722958

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 April 2020
Revised: 8 May 2020
Accepted: 15 May 2020

Keywords:

Optimum Design, Truss
Structures, Natural Frequency
Constraints, JAYA Algorithm.

ABSTRACT

In this study, Jaya algorithm (JA) is proposed for optimum design of planar and spatial trusses under natural frequency constraints. Jaya means "Victory" in Sanskrit. The algorithm is based on the concept that the solution obtained for a given optimization problem which should move toward the best solution and must avoid the worst solution. Sizing optimization of 200-bar planar and 72-bar spatial truss structures previously optimized by different optimization methods are used to demonstrate the validity of JA. The performance of JA is compared to other optimization methods in terms of optimized weight and number of structural analyses required to obtain optimum design. These comparisons showed that JA could obtain better results than other optimization methods in the literature.

* Sorumlu yazar / Correspondence

✉ sozgurd@gmail.com

Giriş

Klasik optimizasyon yöntemlerine alternatif olarak ortaya çıkan sezgisel optimizasyon yöntemleri her türlü optimizasyon probleminin çözümünde otuz yılı aşkın süredir kullanılmaktadır. Genetik algoritmalar (GA) [1], karınca koloni optimizasyonu (ACO) [2], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [3], öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon (TLBO) [4] başlıca sezgisel optimizasyon yöntemleri arasındadır. Sezgisel optimizasyon yöntemlerinin ortak özelliği doğal bir olay veya süreçle optimizasyon problemleri arasında analogi kurmayı esas almalarıdır.

Kafes yapılar tüm dünyada en yaygın kullanılan yapı sistemleri arasındadır. Depo ve fabrika binaları, hangarlar, alışveriş merkezleri, kapalı spor salonları, kongre merkezleri vb. birçok inşaat projesinde kafes yapı sistemleri tercih edilmektedir. Bu yaygın kullanımla birlikte nitelikli işçiliğin gerekliliği, periyodik bakım ve malzeme maliyeti dikkate alınarak kafes yapıların ekonomik olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla, kafes yapıların optimum tasarımı konusunda farklı optimizasyon yöntemlerinin kullanıldığı çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, tasarım sınırlayıcıları olarak genelde gerilme ve deplasman sınırlayıcıları alınırken, bazılarında ise doğal frekans sınırlayıcıları kullanılmıştır.

Herhangi bir dış kuvvete maruz kalmasa bile her yapının belli bir frekansta titreşim hareketi yaptığı bilinmektedir. Doğal titreşim adı verilen bu titreşim, yapının kütlesi ve rijitliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Herhangi bir yapıdaki doğal frekans sayısı yapının serbestlik derecesi sayısına eşit alınmaktadır.

Yapının zorlanmış titreşim (dışarıdan bir kuvvet uygulandığı durum) frekansları ile doğal titreşim frekanslarının çakışması halinde titreşim genliği çok büyük değerlere ulaşacaktır. Bunun sonucunda, rezonans adı verilen durum ortaya çıkarak yapıda toptan göçmeye neden olacaktır. Dolayısıyla doğal frekanslarının bilinmesi ve zorlanmış frekanslarla çakışmasının önlenmesi

yapı emniyeti açısından büyük önem arz etmektedir. Yapı sistemlerinin doğal frekansları özdeğer probleminin çözülmesi ile elde edilmektedir. Bu çözüm sonucu elde edilen en küçük özdeğer, sistemin birinci doğal frekansını ve elde edilen diğer özdeğerler sırasıyla sistemin sonraki doğal frekans değerlerini göstermektedir. Optimum tasarım probleminde ise, doğal frekans sınır değerlerini sağlayan minimum ağırlıklı yapının elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımı daha önce; modifiye edilmiş öğrenme-öğretme esaslı optimizasyon (MS-TLBO) [5], sınıf-esaslı optimizasyon (SBO) [6], çevrimsel üreme algoritması (CPA) [7], titreşen parçacık sistem algoritması (VPS) [8], gelişmiş evrim algoritması ReDE [9], modifiye edilmiş ateş böceği algoritması (AHEFA) [10], yapay kan dolaşımı algoritması (EACCS) [11] ve hipotroloid sarmal optimizasyonu (HSPO) [12] gibi sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak icra edilmiştir.

Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan nispeten yeni olan bir diğer sezgisel optimizasyon yöntemi ise JAYA algoritmasıdır (JA). JA ilk olarak Rao [13] tarafından sınırlayıcı ve sınırlayıcısız fonksiyonların optimizasyonu için önerilmiş, sonrasında elektromekanik sistemlerinin optimum boyutlandırması [14] ve güç sistemlerinin optimizasyonu [15] gibi alanlarda kullanılmıştır. JA'nın yapı mühendisliğinde de uygulamaları mevcut [16,17] olmakla birlikte, yapılan çalışmalar kafes yapıların gerilme ve deplasman sınırlayıcıları altında optimum tasarımı konusundadır.

Bu çalışma ile JA'nın kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarımında ilk kez kullanılması amaçlanmaktadır. JA'nın performansı daha önce farklı sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak optimum tasarımı yapılmış olan 200 elemanlı düzlem kafes ve 72 elemanlı uzay kafes yapıları üzerinde test edilmiştir. JA'nın performansı, optimum ağırlık ve optimum

ağırlığın elde edilmesi için gerekli yapı analiz sayısı bakımından literatürdeki diğer yöntemlerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar, JA'nın literatürdeki diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar elde edebildiğini göstermektedir. Çalışmada, ilk olarak optimum tasarım probleminin formülasyonu verilmiş, ardından JA açıklanmış ve JA ile kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarım algoritması sunulmuştur. Daha sonra, JA ve diğer optimizasyon yöntemlerinden bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak ise çalışmadan elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Optimum tasarımının probleminin formülasyonu

Bu çalışmada, doğal frekans sınırlayıcıları altında minimum ağırlıklı kafes yapıların elde edilmesi amaçlanmakta olup optimum tasarım problemi:

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Minimum } W(A) = \sum_{i=1}^{ng} A_i \sum_{j=1}^{mk} \rho_j L_j \quad (1)$$

$$A_i^{min} \leq A_i \leq A_i^{maks}, \quad i = 1, 2, \dots, ng$$

$$\text{Tasarım değişkenleri: } A = [A_1, A_2, \dots, A_{ng}] \quad (2)$$

$$\text{Doğal frekans sınırlayıcıları: } \omega_k \leq \omega_k^u \quad (3)$$

$$\omega_l \geq \omega_l^l$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada A tasarım değişkenlerini (eleman gruplarını) içeren bir vektör olup her eleman grubuna ait enkesit alanlarını göstermektedir. ng kafes yapıdaki tasarım değişkeni sayısını (eleman grup sayısı), ρ_j ve L_j sırasıyla j 'nci elemanın özgül ağırlığını ve uzunluğunu, mk i 'nci tasarım değişkenindeki toplam eleman sayısını, $W(A)$ kafes yapının ağırlığını, A_i^{min} ve A_i^{maks} i 'nci tasarım değişkeninin alabileceği minimum ve maksimum enkesit alanlarını, ω_k ve ω_k^u kafes yapının k 'nci doğal frekans değerini ve bunun alabileceği en büyük değeri, ω_l ve ω_l^l kafes yapının l 'nci doğal frekans değerini ve bunun alabileceği en küçük değeri göstermektedir.

Kafes yapıların optimum tasarımı yapılırken doğal frekans sınırlayıcılarını sağlayan veya sağlamayan tasarımları ayırt edebilmek için cezalandırılmış amaç fonksiyonu adı verilen bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu fonksiyon ile sınırlayıcıları sağlamayan kafes yapılar sınırlayıcı sağlamama derecelerine göre cezalandırılmaktadır. Cezalandırılmış amaç fonksiyonu ($f_p(A)$) şu şekilde ifade edilebilir:

$$f_p(A) = (1 + v)^\varepsilon \times W(A) \quad (4)$$

burada ε üstel ceza katsayısı olup bu çalışmada 2 alınmıştır. v sınır değerleri sağlamayan cezalı doğal frekans sınırlayıcılarının toplamı olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$v = \sum_{k=1}^{nk} v_\omega^k + \sum_{l=1}^{lk} v_\omega^l \quad (5)$$

burada nk ve lk sırasıyla alttan ve üstten sınırlandırılmış doğal frekans sınırlayıcı sayısını, v_ω^k ve v_ω^l ise k 'nci ve l 'nci doğal frekanslar için ceza değerleri olup şu şekilde hesaplanır:

$$v_\omega^k = 0 \quad \text{eğer } \omega_k \leq \omega_k^u$$

$$v_\omega^k = \left| \frac{\omega_k - \omega_k^u}{\omega_k^u} \right| \quad \text{eğer } \omega_k > \omega_k^u$$

$$v_\omega^l = 0 \quad \text{eğer } \omega_l \geq \omega_l^l$$

$$v_\omega^l = \left| \frac{\omega_l - \omega_l^l}{\omega_l^l} \right| \quad \text{eğer } \omega_l < \omega_l^l \quad (6)$$

JAYA algoritması (JA)

JA optimizasyon sürecinde her iterasyonda tasarım değişkenlerini (kafes yapıdaki eleman grupları) modifiye ederek optimum çözümü elde etmeyi amaçlamaktadır. $A_{i,l,it}$; it 'nci iterasyondaki l -nci tasarım için i -nci tasarım değişkenini temsil etmek üzere aşağıdaki bağıntıyla modifiye edilir:

$$A_{i,l,it}^{yeni} = A_{i,l,it} + r_{1,i,it} (A_{i,best,it} - |A_{i,l,it}|) - r_{2,i,it} (A_{i,worst,it} - |A_{i,l,it}|) \quad (7)$$

burada $A_{i,l,it}^{yeni}$ modifiye edilmiş tasarım değişkenini, $r_{1,i,it}$ ve $r_{2,i,it}$ it 'nci iterasyondaki i 'nci tasarım değişkeni için $[0,1]$ aralığında rastgele üretilen reel sayıları, $A_{i,best,it}$ ve $A_{i,worst,it}$ it 'nci iterasyondaki en iyi ve en kötü tasarımların i 'nci tasarım değişkenini göstermektedir. Denklemdeki $r_{1,i,it}(A_{i,best,it} - |A_{i,l,it}|)$ mevcut tasarımın en iyi tasarıma yaklaşma eğilimini, $-r_{2,i,it}(A_{i,worst,it} - |A_{i,l,it}|)$ mevcut tasarımın en kötü tasarımdan uzaklaşma eğilimini ifade etmektedir. $r_{1,i,it}$ ve $r_{2,i,it}$ reel sayıları tasarım uzayının daha etkili araştırılmasını sağlarken, $|A_{k,l,it}|$ mutlak değeri arama kabiliyetinin güçlendirilmesini sağlamaktadır [13].

JA'da ilk olarak popülasyon sayısı kadar rasgele olarak başlangıç tasarımları üretilir. Sonrasında popülasyondaki her bir tasarım (7) bağıntısıyla modifiye edilerek yeni bir tasarım elde edilir. Yeni tasarım önceki tasarımdan daha iyi ise önceki tasarımın yerine geçer, aksi halde önceki tasarım değişmez. Popülasyondaki tüm tasarımlar için bu işlemler tekrarlanarak bir iterasyon tamamlanır. Her iterasyonda aynı işlemler tekrarlanır. Maksimum iterasyon sayısının aşılması durumunda optimizasyon işlemi bitirilir.

JA ile kafes yapıların doğal frekans sınırlayıcıları altında optimum tasarım algoritması aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- i. Popülasyon sayısını (np) ve maksimum iterasyon sayısını (it_{maks}) belirle. Burada popülasyondaki her bir tasarım bir kafes yapıyı temsil etmektedir. Her kafes yapı tasarımı için yapı analizi yaparak, (1)-(6) bağıntıları ile cezalandırılmış amaç fonksiyonunu elde et. İterasyon sayacını başlat, $it=0$.
- ii. İterasyon sayacını arttır, $it=it+1$.
- iii. En iyi ($f_p^{\min}(A)$) ve en kötü ($f_p^{\max}(A)$) cezalandırılmış amaç fonksiyonuna sahip kafes yapı tasarımlarını belirle. Kafes yapı tasarım sayacını sıfırla $id=0$.
- iv. Kafes yapı tasarım sayacını arttır $id=id+1$.

- v. (7) bağıntısı ile kafes yapıdaki tüm tasarım değişkenlerini modifiye ederek yeni kafes yapı tasarımını elde et.
- vi. Yeni kafes yapı tasarımı için yapı analizi yap, (1)-(6) bağıntıları vasıtasıyla cezalandırılmış amaç fonksiyonunu elde et ($f_p^{yeni}(A)$).
- vii. Yeni elde edilen kafes yapıya ait cezalandırılmış amaç fonksiyonunu ile önceki kafes yapıya ait cezalandırılmış amaç fonksiyonunu kıyasla. Eğer $f_p^{yeni}(A) \leq f_p^{id}(A)$ ise, yeni üretilen tasarımı önceki tasarımın yerine ata, aksi halde önceki tasarımı değiştirme.
- viii. Eğer $id=ps$ ise, ix 'nci adıma git, değilse iv 'ncü adıma git.
- ix. Eğer $it=it_{maks}$ ise x 'ncü adıma git, değilse ii 'nci adıma git.
- x. Doğal frekans sınırlayıcılarını sağlayan minimum ağırlıklı kafes yapı tasarımını optimum tasarım olarak ata, optimizasyon işlemi bitir.

Tasarım örnekleri

Daha önce MS-TLBO [5], SBO [6], CPA [7], VPS [8], ReDE [9], AHEFA [10], EACCS [11] ve HSPO [12] yöntemleri kullanılarak optimum tasarımı yapılmış olan 200 elemanlı düzlem kafes ve 72 elemanlı uzay kafes yapılar bu çalışmada JA yöntemi ile optimize edilmiş ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Çalışmada sunulan algoritma MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. Yapılan kodlamanın icrası ile elde edilen sonuçların doğruluğu, SAP 2000 v20 [18] yapı analiz programıyla teyit edilmiştir.

JA, farklı popülasyon sayısı (np) değerleri için ayrı ayrı icra edilmiş ve en hafif kafes yapı ağırlığı $np=20$ için elde edildiğinden popülasyon büyüklüğü 20 olarak seçilmiştir. JA'nın farklı başlangıç tasarımları için birbirine yakın sonuçlar elde edemeyeceği test edilmek istenmiştir. Bu amaçla, yöntem 20 farklı başlangıç popülasyonu için 20 farklı kez icra

edilmiştir. Bu farklı icralar sonunda bulunan yapı tasarımları arasında optimum (minimum ağırlıklı) olan kafes yapının ağırlığı, bu kafes yapıya ait tasarım değişkenleri, optimum ağırlığın bulunması için gerekli yapı analiz sayısı ve doğal frekans sınırlayıcıları için ihlal yüzdeleri tablolarda verilmiştir. Ayrıca, 20 farklı

tasarım için elde edilen ortalama ağırlık ve standart sapma gibi istatistiksel verilerde tablolarda sunulmuştur. 200 elemanlı düzlem kafes ve 72 elemanlı uzay kafes yapılarına ait malzeme özellikleri, enkesit alanlarının alabileceği sınır değerleri ve doğal frekans sınırlayıcıları için tanımlanan sınır değerler Tablo 1’de verilmiştir.

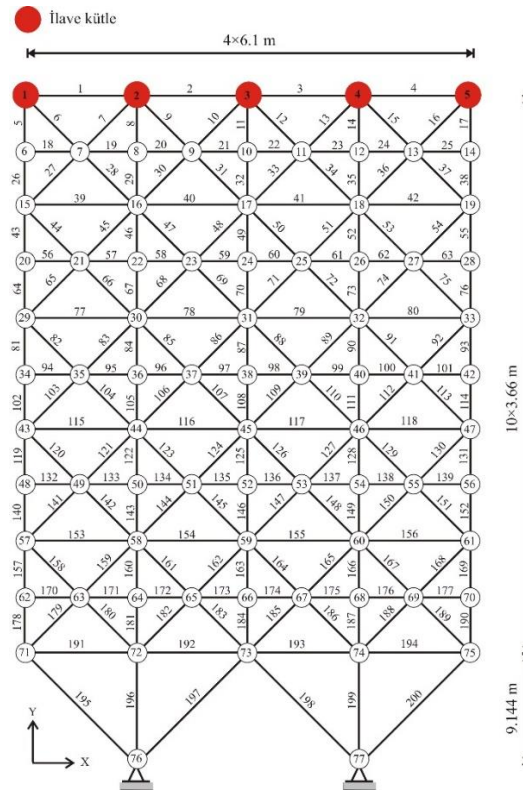
Tablo 1. Tasarım örneklerine ait malzeme özellikleri, enkesit alan sınırları ve doğal frekans sınırlayıcıları.

Tasarım örneği	Elastisite modülü E (N/m ²)	Malzeme özgül ağırlığı ρ (kg/m ³)	Enkesit alan sınırları (m ²)	Doğal frekans sınırlayıcıları (Hz)
200 elemanlı düzlem kafes	2.1×10^{11}	7860	$0.1 \times 10^{-4} \leq A$	$\omega_1 \geq 5, \omega_2 \geq 10, \omega_3 \geq 15$
72 elemanlı uzay kafes	6.89×10^{10}	2770	$645 \times 10^{-4} \leq A \leq 20 \times 10^{-4}$	$\omega_1=4, \omega_2=4, \omega_3 \geq 6$

200 elemanlı düzlem kafes yapı

200 elemanlı düzlem kafes yapı Şekil 1’deki gösterilmiştir. Kafes yapıda 29 tasarım değişkeni mevcuttur. Tasarım değişkenleri ve bunların ihtiva ettiği elemanlar Tablo 2’de verilmiştir. Yapının en üst katındaki düğüm noktalarında 100 kg ilave kütle mevcuttur.

Tablo 3’de JA ve literatürdeki diğer yöntemlerden elde edilen optimum tasarım sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablo 4’de ise; Tablo 3’deki optimum tasarımlara ait ilk üç doğal frekans değerleri ve aynı tasarımların SAP 2000 v20’de [18] analizi sonucu bulunan değerler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 1. 200 elemanlı düzlem kafes yapı

Tablo 2. 200 elemanlı düzlem kafes yapıya ait tasarım değişkenleri

Tasarım değişkeni	Eleman numarası	Tasarım değişkeni	Eleman numarası
1	1,2,3,4	16	82,83,85,86,88,89,91,92,103,104,106,107,109,110,112,113
2	5,8,11,14,17	17	115,116,117,118
3	19,20,21,22,23,24	18	119,122,125,128,131
4	18,25,56,63,94,101,132,139,170,177	19	133,134,135,136,137,138
5	26,29,32,35,38	20	140,143,146,149,152
6	6,7,9,10,12,13,15,16,27,28,30,31,33,34,36,37	21	120,121,123,124,126,127,129,130,141,142,144,145,147,148, 150,151
7	39,40,41,42	22	153,154,155,156
8	43,46,49,52,55	23	157,160,163,166,169
9	57,58,59,60,61,62	24	171,172,173,174,175,176
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		

Tablo 3. 200 elemanlı düzlem kafes yapıda optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm ²)	MS-TLBO [5]	SBO [6]	AHEFA [10]	EACCS [11]	HSP0 [12]	JA
1	0.29167	0.3040	0.29930	0.31750	0.30143	0.29714
2	0.48527	0.4478	0.45080	0.44520	0.45938	0.489687
3	0.10005	0.1000	0.10010	0.10040	0.07811	0.100000
4	0.1000	0.1000	0.1000	0.10040	0.0983	0.100729
5	0.49666	0.5075	0.51230	0.49640	0.50624	0.557893
6	0.8318	0.8219	0.8205	0.8226	0.8199	0.793506
7	0.10000	0.1003	0.10110	0.10950	0.10000	0.100000
8	1.40851	1.4240	1.41560	1.38780	1.39676	1.435431
9	0.10000	0.1001	0.10000	0.10060	0.10000	0.101238
10	1.58732	1.5929	1.57420	1.54650	1.57350	1.649521
11	1.1249	1.1597	1.1597	1.1514	1.1490	1.148061
12	0.10078	0.1275	0.13380	0.15920	0.11859	0.108915
13	2.98830	2.9765	2.96720	2.99790	3.10264	2.972128
14	0.10234	0.1001	0.10000	0.10070	0.10000	0.100000
15	3.33456	3.2456	3.27220	3.27260	3.24327	3.421181
16	1.5990	1.5818	1.5762	1.5753	1.5968	1.569461
17	0.18763	0.2566	0.25620	0.27680	0.24217	0.143344
18	5.14985	5.1118	5.09560	5.04340	5.39675	5.286264
19	0.10059	0.1001	0.10010	0.10760	0.10000	0.100000
20	5.37321	5.4337	5.45460	5.44900	5.25824	5.577982

21	2.0885	2.1016	2.0933	2.1447	2.1434	2.091733
22	0.63412	0.6794	0.67370	0.67450	0.8293	0.657104
23	7.66597	7.6581	7.64980	7.69670	7.30130	7.778857
24	0.10000	0.1006	0.11780	0.13530	0.11284	0.100000
25	7.99043	7.9468	8.06820	7.71060	7.91076	7.984943
26	2.8246	2.7835	2.8025	2.7915	2.86741	2.836508
27	10.42712	10.5277	10.50400	10.37550	10.8526	10.52663
28	21.42957	21.3027	21.29350	21.33640	20.89930	21.66231
29	10.63218	10.6207	10.74100	10.73450	10.75149	10.29429
Optimum ağırlık (kg)	2160.351	2156.5070	2160.7445	2156.3651	2157.7116	2172.22571
Ortalama ağırlık (kg)	2214.627	2156.7870	2161.0393	2157.6554	2169.0492	2193.155
Standart sapma (kg)	87.1835	0.2110	0.1783	1.7683	10.8148	10.70989
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	0.7553	1.0070	0.9947	0.9867	0.236	0.0000
Yapı analiz sayısı	10000	23000	11300	23000	11640	13240

Tablo 4. 200 elemanlı düzlem kafes yapıda optimum tasarımlara ait doğal frekans değerleri

Frekans no (Hz)	MS-TLBO [5]	SBO [6]	AHEFA [10]	EACCS [11]	HSPO [12]	JA
1	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.000011
1*	4.9896	4.9878	4.9904	4.9871	4.9882	5.000011
2	12.1366	12.21412	12.1821	12.3137	12.1499	12.26016
2*	12.1117	12.1850	12.1516	12.2835	12.1213	12.26016
3	15.0529	15.01918	15.0160	15.0226	15.0004	15.01977
3*	14.8867	14.8499	14.8508	14.8520	15.0004	15.01977

*SAP 2000 v20'den [18] elde edilen doğal frekans değerleri

JA ile 2172.2257 kg ağırlığındaki optimum tasarım 13240 yapı analizi sonunda elde edilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde ilk başta JA ile bulunan optimum tasarımın, tüm yöntemlerden daha ağır olduğu gözükmemektedir. Ancak, JA dışındaki tüm yöntemlerin Tablo 1'de verilen ω_1 ve ω_3 doğal frekans sınırlayıcılarını %0.236 ile %1.007 arasında değişen oranlarda ihlal ettiği, JA'nın ise doğal frekans sınırlayıcılarını tam olarak sağladığı tespit edilmiştir. Başka bir deyişle, Tablo 3'de sunulan tasarımlar arasında yapılabılır (feasible) olan tek tasarım JA ile elde edilmiştir. Diğer yöntemlerden elde edilen tasarımlar doğal frekans sınırlayıcılarını

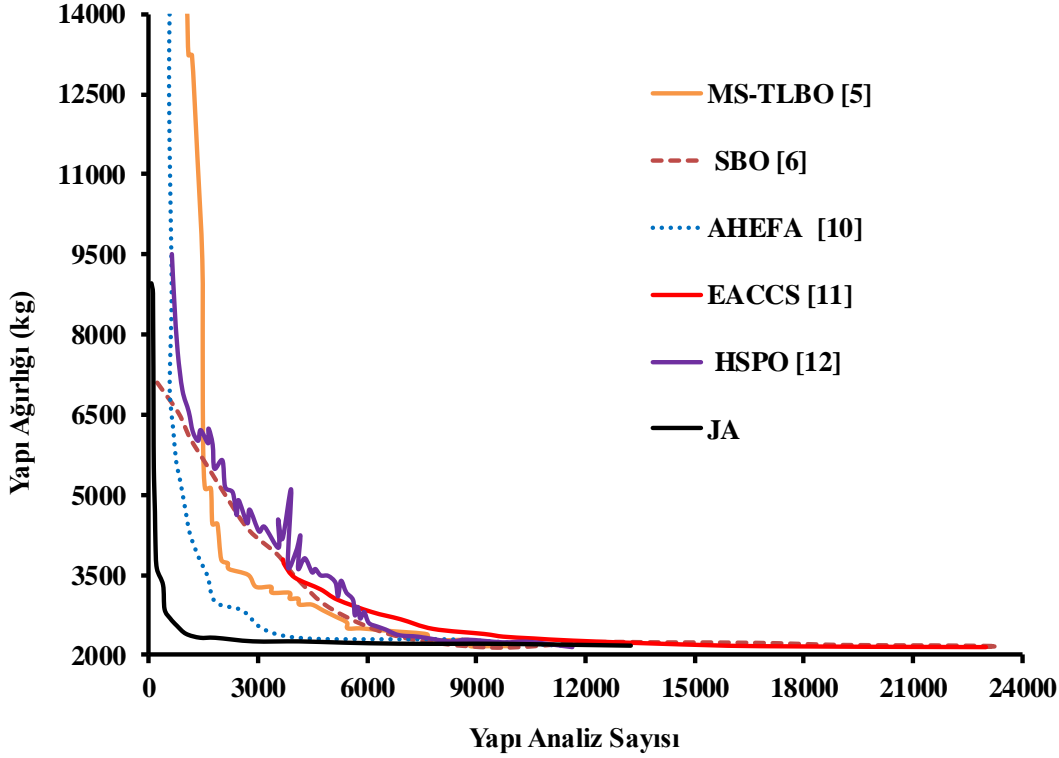
ihlal ettiğinden optimum tasarım olarak kabul edilmeleri mümkün değildir. Tablo 4'de doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında JA ve SAP 2000 v20'den [18] elde edilen doğal frekans değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. Bu durum, JA için geliştirilen MATLAB kodunun doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 3'de, JA'nın 20 farklı icrası sonunda bulunan 20 farklı nihai tasarım için hesaplanan standart sapma değeri 10.70989 kg olarak verilmiştir. Bu değer, 2193.155 kg olan ortalama değerinde sadece %0.49'u mertebesinde. Bu sonuç, JA'nın farklı başlangıç popülasyonları üretmesine karşın

birbirine oldukça yakın tasarımları bulabildiğini kanıtlamaktadır.

Tablo 3’de verilen diğer yöntemler doğal frekans sınırlayıcılarını ihlal ettiğinden optimum tasarımı bulmak için gereken yapı analiz sayısı bakımından JA ile karşılaştırmaları objektif bir değerlendirme

olmayacaktır. Bununla birlikte, JA’nın SBO [6] ve EACSS [11] yöntemlerinden daha az analiz sayısı gerektirdiği de görülmektedir. 200 elemanlı düzlem kafeste JA ve diğer yöntemlerin optimizasyon sürecinde elde ettikleri yapı ağırlıklarının yapı analiz sayıları ile değişimi Şekil 2’deki gibidir.



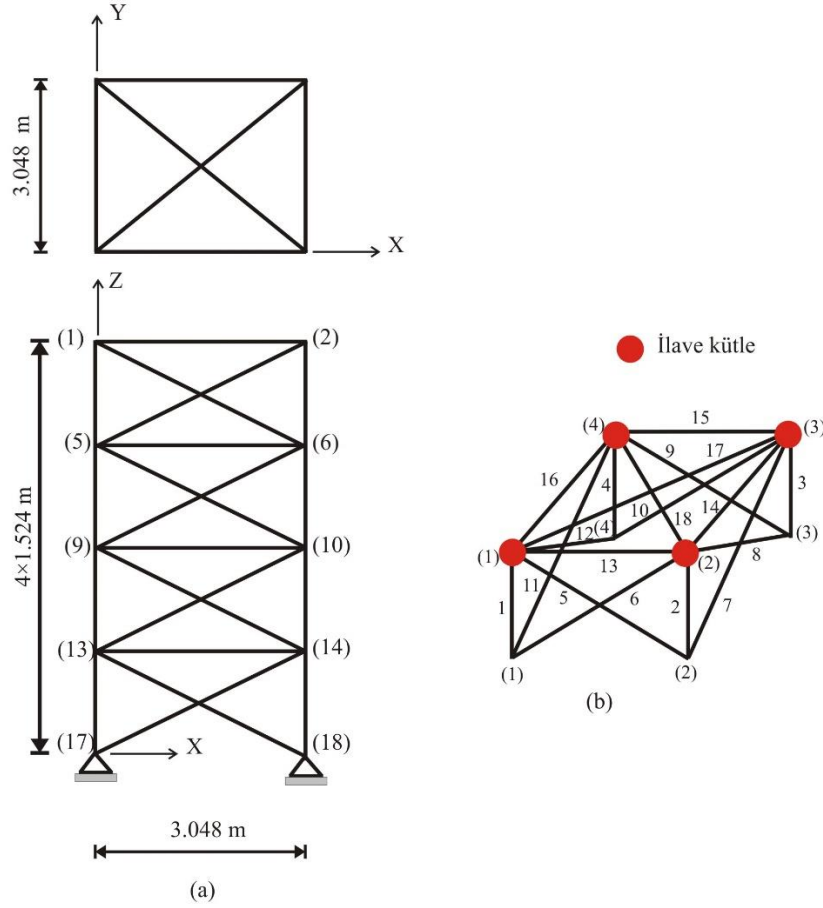
Şekil 2. 200 elemanlı düzlem kafeste yapı ağırlığı ile yapı analiz sayısının değişimi

Şekil 2’deki eğriler incelendiğinde, JA’nın diğer tüm yöntemlerden daha önce optimum tasarıma yakın sonuçları bulabildiği görülmektedir. JA, 2253.338 kg ağırlığında optimum ağırlığa oldukça yakın bir tasarımı sadece 2258 yapı analizi sonunda elde etmiştir. Bu durum; JA’nın optimum tasarıma yakın tasarımları oldukça hızlı bir şekilde bulabildiğini göstermektedir.

72 elemanlı uzay kafes yapı

İkinci tasarım örneği olan 72 elemanlı uzay kafes yapı Şekil 3’te gösterilmiştir. Yapıda 16 tasarım değişkeni kullanılmış ve eleman gruplandırılması Tablo 5’te verilmiştir. Yapının en üst katındaki düğüm noktalarına 2270 kg ilave kütle bulunmaktadır.

Tablo 5’de JA ve literatürdeki diğer yöntemlerden elde edilen optimum tasarımlara ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo 6’da ise ilk üç doğal frekans değerleri SAP 2000 v20 [18] ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.72 elemanlı uzay kafes yapı (a) boyutlar (b) en üst kat eleman ve düğüm numaralandırılması

Tablo 5. 72 elemanlı uzay kafes yapıda optimum tasarım sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarım değişkenleri A_i (cm ²)	MS-TLBO [5]	SBO [6]	VPS [7]	CPA [8]	ReDE [9]	AHEFA [10]	EACCS [11]	HSPO [12]	JA
A ₁ -A ₄	3.33350	3.49170	3.50170	3.32900	3.53270	3.56120	3.71220	3.43147	3.410165
A ₅ -A ₁₂	7.90540	7.94140	7.93400	7.84100	7.83030	7.87360	7.74340	7.84360	7.640199
A ₁₃ -A ₁₆	0.64690	0.64500	0.64500	0.64500	0.64530	0.64500	0.64680	0.64500	0.64500
A ₁₇ -A ₁₈	0.64510	0.64500	0.64500	0.64500	0.64590	0.64510	0.69700	0.64500	0.64500
A ₁₉ -A ₂₂	7.99800	8.11540	8.02150	8.41600	8.00290	7.97100	8.28840	8.03902	7.88633
A ₂₃ -A ₃₀	7.76820	8.05330	7.98260	8.16000	7.91350	7.89280	8.21410	7.93058	8.05561
A ₃₁ -A ₃₄	0.64500	0.64500	0.64500	0.64500	0.64510	0.64500	0.66580	0.64502	0.64500
A ₃₅ -A ₃₆	0.64500	0.64500	0.64500	0.64500	0.64510	0.64510	0.67430	0.64500	0.64500
A ₃₇ -A ₄₀	12.8748	12.8569	12.8175	13.0780	12.7626	12.5404	12.1500	12.70402	12.96987
A ₄₁ -A ₄₈	8.08550	8.04250	8.11290	8.04300	7.96570	7.96390	7.87000	7.96843	7.991384
A ₄₉ -A ₅₂	0.64500	0.64510	0.64500	0.64500	0.64520	0.64590	0.70580	0.64505	0.64500
A ₅₃ -A ₅₄	0.64500	0.64500	0.64500	0.64500	0.64500	0.64620	0.65260	0.64500	0.64500
A ₅₅ -A ₅₈	17.0410	17.2136	17.3362	16.9430	16.9041	17.1323	17.0882	17.01693	16.83402
A ₅₉ -A ₆₆	8.00030	8.08040	8.10100	8.14300	8.04340	8.02160	7.94720	8.01267	8.185437
A ₆₇ -A ₇₀	0.64500	0.64500	0.64500	0.64700	0.64510	0.64500	0.64500	0.64500	0.64500
A ₇₁ -A ₇₂	0.64950	0.64500	0.64500	0.65300	0.64730	0.64510	0.74620	0.64500	0.64500

Optimum ağırlık (kg)	324.3754	327.5528	327.649	328.490	324.2467	324.2376	325.1956	324.2337	324.9658 [327.649] ¹ [328.490] ²
Ortalama ağırlık (kg)	325.74940	327.67970	327.67000	330.91	324.3219	324.41090	NA*	325.41860	325.1190
Standart sapma (kg)	0.91860	0.06750	0.01800	1.8400	0.05160	0.24200	NA*	0.89850	0.1056
Sınırlayıcı ihlal yüzdesi (%)	0.16500	0.58000	0.58750	0.66250	0.16830	0.17000	0.15830	0.16330	0.00000
Yapı analiz sayısı	4000	15000	6860	12800	11116	8860	12000	8820	13280

¹JA ile VPS'ye [7] ait ağırlık (327.649 kg) 3399 yapı analizde bulunmuştur.

²JA ile CPA'ya [8] ait ağırlık (328.490 kg) 2961 yapı analizde bulunmuştur.

*NA: Mevcut değil.

Tablo 6. 72 elemanlı uzay kafes yapıda optimum tasarımlara ait doğal frekans değerleri

Frekans No (Hz)	MS-TLBO [5]	SBO [6]	VPS [7]	CPA [8]	ReDE [9]	AHEFA [10]	EACCS [11]	HSPO [12]	JA
1	4.0011	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
1*	4.0015	4.0232	4.0235	4.0265	4.0004	4.0004	4.0005	4.0002	4.0000
2	4.0011	4.0000	4.0002	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	NA	4.0000
2*	4.0015	4.0232	4.0235	4.0265	4.0004	4.0004	4.0005	4.0002	4.0000
3	6.0003	6.0000	6.0000	6.0000	6.0001	6.0000	6.0007	6.0000	6.0001
3*	5.9901	6.0238	6.0251	6.0299	5.9899	5.9898	5.9905	5.9902	6.0001

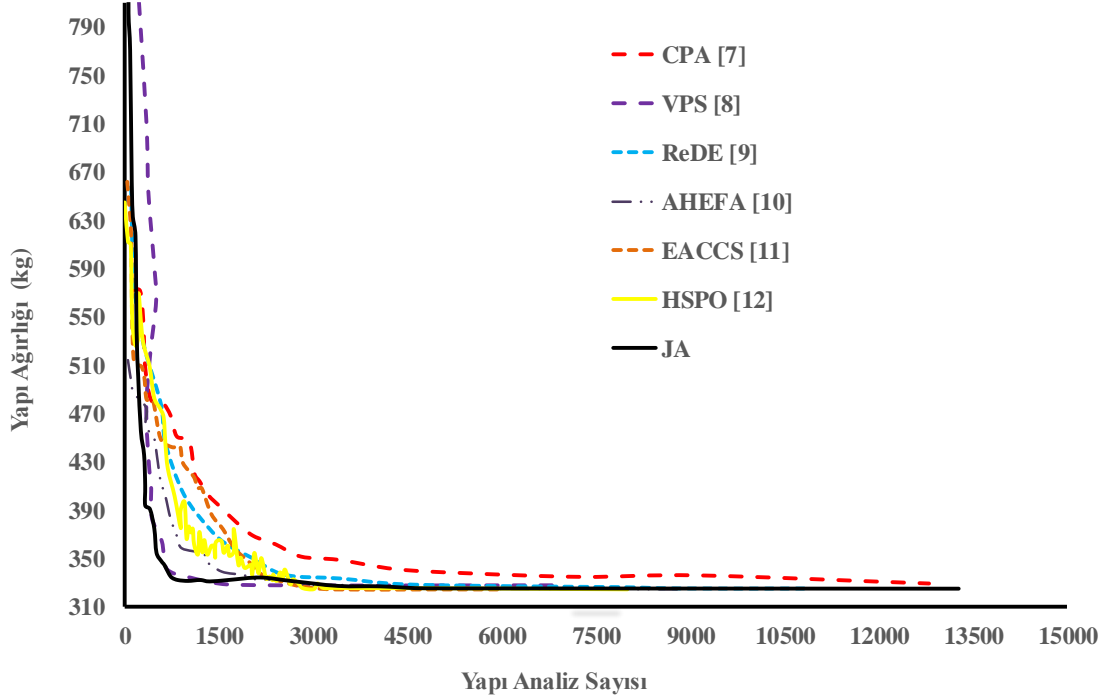
*SAP 2000 v20'den [18] elde edilen doğal frekans değerleri

Tablo 5'de görüldüğü üzere, diğer yöntemler doğal frekans sınırlayıcılarını %0.1633-%0.6625 arasında değişen oranlarda ihlal etmelerine karşın JA ile bulunan optimum tasarım, sınırlayıcıları tam olarak sağlamaktadır. Dolayısıyla, JA ile diğer tüm yöntemlerden daha iyi bir tasarım elde edilmiştir.

Ayrıca Tablo 6'da sunulduğu üzere, JA ile elde edilen doğal frekans değerlerinin SAP 2000 v20 [18] ile bulunan doğal frekans değerleriyle eşit olması MATLAB programlama dilinde yapılan kodlamanın doğruluğunu ispatlamaktadır.

Tablo 5'deki JA için verilen 0.1056 kg 'lık standart sapma değerinin ortalama ağırlığın %0.033 mertebesinde olması JA'nın farklı başlangıç popülasyonları için birbirine oldukça yakın sonuçları elde edebildiğini kanıtlamaktadır.

72 elemanlı uzay kafeste yapı ağırlığı ile yapı analiz sayısının optimizasyon işlemi süresince değişimi Şekil 4'deki gibidir. JA, sadece 2661 yapı analizi sonunda 331.2597 kg gibi optimum tasarıma oldukça yakın bir tasarım bulmuştur. Bu sonuç, JA'nın çok hızlı bir şekilde optimum tasarıma yakın tasarımlar bulabildiğini göstermektedir.



Şekil 4. 72 elemanlı uzay kafeste yapı ağırlığı ile yapı analiz sayısının değişimi

Sonuçlar

Literatürdeki sonuçlarla yapılan kıyaslamalar JA'nın diğer tüm yöntemlerden daha iyi (yapılabilir) kafes yapılar elde ettiğini göstermektedir. Literatürdeki diğer yöntemlerden elde edilen optimum tasarımlar doğal frekans sınırlayıcılarını %0.1633-%1.007 arasında değişen oranlarda ihlal ederken, JA ile bulunan optimum tasarımlar sınırlayıcıları tam olarak sağlamaktadır. Ayrıca JA optimum tasarıma yakın tasarımlara çok hızlı bir şekilde ulaşabilmektedir. Yöntemin farklı icraları sonucunda bulunan tasarımlar için hesaplanan standart sapma değerlerinin ortalama ağırlığa göre oldukça küçük olması JA'nın farklı başlangıç popülasyonları üretmesine rağmen, optimizasyon işleminin sonunda birbirine çok yakın tasarımlar elde edebilme kabiliyetinin olduğunu ispatlamaktadır.

Teşekkür

Bu araştırma Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje Numarası: Mühendislik.18.002, 2018.

Kaynaklar

- [1] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor The University of Michigan Press, 1975.
- [2] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Coloni, "The ant system: optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. B*, 29–41, (1996).
- [3] R.C. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory: *Proceedings of The Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 1942-1948, (1995).
- [4] R.V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical

- design optimization problems”, *Computer-Aided Design*, vol. 43, no 3, pp. 303–315, 2011.
- [5] G.G. Tejani, V.J. Savsani, V.K. Patel, “Modified sub-population teaching-learning-based optimization for design of truss structures with natural frequency constraints” *Mech. Based Des. Struc.*, vol. 44, no 4, pp. 495-513, 2016.
- [6] M. Farshchin, C.V. Camp, M. Maniat, “Optimal design of truss structures for size and shape with frequency constraints using a collaborative optimization strategy”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 66, pp. 203–18, 2016.
- [7] A. Kaveh, A. Zolghadr, “Cyclical parthenogenesis algorithm for layout optimization of truss structures with frequency constraints”, *Eng. Optimiz.*, vol. 49, no 8, pp. 1317-1334, 2017.
- [8] A. Kaveh, M.I. Ghazaan, “Vibrating Particles System Algorithm for Truss Optimization with Multiple Natural Frequency Constraints”, *Acta Mech.*, vol. 228, no 1, pp. 307–322, 2017.
- [9] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Truong-Khac, L. Le-Anh, T. Vo-Duy, “An improved differential evolution based on roulette wheel selection for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp.167–185, 2018.
- [10] Q.X. Lieu, D.T.T. Do, J. Lee, “An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints”, *Comput. Struct.*, vol 195, pp. 99-112, 2018.
- [11] A. Kaveh, M. Kooshkbaghi, “Enhanced artificial coronary circulation system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints”, *Period Polytech-Civ.*, vol. 63, no 2, pp. 362-376, 2019.
- [12] A. Kaveh, S. Mahjoubi, “Hypotrochoid spiral optimization approach for sizing and layout optimization of truss structures with multiple frequency constraints”, *Eng. Comput.*, vol. 35, pp. 1443-1462, 2019.
- [13] R.V. Rao, “Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems”, *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 7, pp. 19-34, 2016.
- [14] R.V. Rao, K.C. More, J. Taler, P. Oclon, “Dimensional optimization of a micro-channel heat sink using Jaya algorithm”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 103, pp. 572-582, 2016.
- [15] S.P. Singh, T. Prakash, V.P. Singh, M.G. Babu, “Analytic hierarchy process based automatic generation control of multi-area interconnected power system using Jaya algorithm”, *Eng. Appl. Artif. Intel.*, vol. 60, pp. 35-44, 2017.
- [16] S.O. Degertekin, L. Lamberti, I.B. Ugur, “Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm”, *Appl. Soft. Comput.*, vol. 70, pp. 903-928, 2018.
- [17] S.O. Degertekin, L. Lamberti, I.B. Ugur, “Discrete sizing/layout/topology optimization of truss structures with an advanced Jaya algorithm”, *Appl. Soft. Comput.*, vol. 79, pp. 363-390, 2019.
- [18] SAP 2000 v20. Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers & Structures, Inc. Walnut Creek (CA), USA. 2018.