



YAPISAL OPTİMİZASYON PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMLERİNİ BULMAK İÇİN KULLANILAN META-BULGUSAL ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Serdar Çarbaş*
Orta Doğu Teknik
Üniversitesi, Ankara

Erkan Doğan†
Atatürk Üniversitesi,
Erzurum

Ferhat Erdal‡
Akdeniz Üniversitesi,
Antalya

Mehmet Polat Saka*
Bahreyn Üniversitesi,
İsa Town

ÖZET

Bu çalışmada, mühendislik literatüründen alınmış olan yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünü bulmak için kullanılan üç farklı meta-bulgusal yöntemin performans değerlendirmesi yapılmıştır. Seçilen bu üç yöntem Partikül Küme, Harmoni Arama ve Genetik Algoritmalar yöntemleridir. Yapısal optimizasyon alanında kullanılan meta-bulgusal araştırma yöntemleri araştırma alanında daha iyi sonuç bulmak için bulgulara güvenirlir. Bu metotlar, optimum çözümü araştırırken belirleyici niceliklerden ziyade rastgele ve olasılıklı parametreler kullanırlar. Rastgele değişkenlerin kaynağı, problemin tipine ve doğasına bağlı olarak farklı olabilir. Bu yenilikçi tekniklerin gerisindeki bulgusal yöntemler doğadan ve fizikten ödünç alınmıştır. İki adet farklı geometri ve yapı konfigürasyonuna sahip olan 46-elemanlı düzlemsel çelik kafes sistemi, bahsi geçen meta-bulgusal yöntemlerin bu tip yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde ne kadar etkili olduklarını göstermek için tasarım örnekleri olarak seçilmiştir.

GİRİŞ

Yapısal optimizasyon, yapı elemanlarının optimum topolojisini, optimum geometrisini veya optimum kesit boyutlarını belirlemede yapı tasarımcıları için büyük olanaklar sağlar. Meta-bulgusal optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesiyle birlikte yapısal optimizasyon alanı yeni bir yön kazanmıştır. Hesaplamalı yapı mekaniği gibi mühendisliğin birçok alanında gözlenildiği üzere bu metotların başlıca başarısı, sürdürülen araştırmaları bu tekniklerin daha iyi anlaşılması ve geliştirilmesine doğru motive etmesidir. Devam eden bu çabalar, doğadaki farklı fenomenlerin taklit edilmeleri için öncülük eden fikirlerle birleştirildikleri zaman değişik sınıflardaki yapısal optimizasyon problemlerinin çözümlerinde birbirleriyle yarışan çok çeşitli geleceği parlak araştırma tekniklerinin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu tekniklerinin her birinin temelinde yatan ana düşünce, biyolojik, kimyasal, veya sosyal bir sistemin (evrimleşme, bağışıklık sistemi, sürü zekası veya tavlama süreci vb.) otomatik olarak kendi optimizasyon görevini yerine getirme doğasının taklit edilmesi paradigmasına bağlı kalmaktır [15, 13, 12, 10, 7, 5]. Bu tekniklerin başka bir ortak yönleri de derece derece değişen sınırlayıcı bilgilerine dayanan araştırma tipini tamamen reddetmeleri ve dahası rastgele olmayan kurallar yerine olasılıklı geçiş kuralları kullanmalarındır. Bu tekniklerin ayrık optimizasyon problemlerinin çözümlerini bulmada çok uygun ve etkili oldukları kanıtlanmıştır. Pratikte kullanılan tasarım yönetmeliklerine göre formüle edildikleri zaman muhakkak ayrık optimizasyon problemine dönüşen tasarım problemleri çelik yapıların optimum tasarım uygulamaları için belirli önem taşırlar. Saka [2] ve Hasançebi ve diğerleri [3, 1] bu tip algoritmaların detaylı incelemelerini ve optimum yapısal tasarımlara uygulamalarını yapmışlardır.

* Araştırma Görevlisi, Mühendislik Bilimleri Böl., E-posta: carbas@metu.edu.tr

† Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: erkan.dogan@atauni.edu.tr

‡ Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: eferhat@akdeniz.edu.tr

♦ Prof. Dr., İnşaat Müh. Böl., E-posta: mpsaka@eng.uob.bh

Bu çalışmada birçok tasarım değişkeninden veya geniş bir ayırık setten oluşan yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan meta-bulgusal yöntemlerden Partikül Küme, Harmoni Arama ve Genetik Algoritmalar ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. İki adet çelik düzlem kafes sistemi bahsi geçen yöntemlerin sayısal performanslarını incelemek ve mukayese etmek için tasarım örneği olarak kullanılmıştır. Bu yapıların ikisi de 46-elemanlı fakat farklı geometri ve yapı konfigürasyonuna sahip çelik kafes kirişlerdir. Her iki örneğin çözümünü elde etmek için de kafes kirişler ASD-AISC [16] yönetmeliğinde belirtilen gerilme, stabilite ve deplasman sınırlayıcıları göz önüne alınarak minimum yapı ağırlıkları elde edilecek şekilde ölçülandırılmışlardır. Bu tasarım örneklerinin önerilen algoritmalar ile çözümünden elde edilen sonuçlar tartışılmış ve bu tekniklerin etkinliği vurgulanmıştır.

OPTIMUM TASARIM PROBLEMİNİN FORMÜLİZASYONU

N_m elemandan oluşan ve N_d tasarım değişkenine sahip olan mafsallı bir çelik yapı için ASD-AISC [16] aşağıda anlatıldığı gibi ayırık programlama problemi tanımlı yapmıştır.

Verilen bir kesit listesinde çelik kesitlerin sıra numarasına göre tamsayı değerlerinden oluşan bir $\mathbf{I}$ (Eşitlik 1) vektörü kafes sistemin N_m elemanı için en-kesit alanlarını içeren $\mathbf{A}$ vektörünü (Eşitlik 2) üretmek için bulunur. Bu $\mathbf{A}$ vektörü amaç fonksiyonunu (Eşitlik 3) minimize eder

$$\mathbf{I}^T = [I_1, I_2, \dots, I_{N_d}] \quad (1)$$

$$\mathbf{A}^T = [A_1, A_2, \dots, A_{N_m}] \quad (2)$$

$$W = \sum_{m=1}^{N_m} \rho_m L_m A_m \quad (3)$$

ve aşağıdaki sınırlayıcıları sağlamalıdır,

$$g_m = \frac{\sigma_m}{(\sigma_m)_{all}} - 1 \leq 0, \quad m = 1, \dots, N_m \quad (4)$$

$$s_m = \frac{\lambda_m}{(\lambda_m)_{all}} - 1 \leq 0, \quad m = 1, \dots, N_m \quad (5)$$

$$\delta_{j,k} = \frac{d_{j,k}}{(d_{j,k})_{all}} - 1 \leq 0, \quad j = 1, \dots, N_j \quad (6)$$

Burada W kafes yapının ağırlığıdır. L_m, ρ_m sırasıyla m elemanın uzunluğu ve birim ağırlığıdır.

N_j bağlantı noktalarının toplam sayısıdır; g_m, s_m ve $\delta_{j,k}$ fonksiyonları sırasıyla gerilme, narinlik oranı ve deplasman sınırlayıcılarının sınırlarıdır; σ_m ve $(\sigma_m)_{all}$ m 'inci kafes elemanının sırasıyla hesaplanmış ve izin verilmiş olan eksenel gerilmeleridir; λ_m ve $(\lambda_m)_{all}$ m 'inci elemanın sırasıyla narinlik oranı ve bunun üst limitidir; son olarak $d_{j,k}$ ve $(d_{j,k})_{all}$ sırasıyla j bağlantı noktasının k yönündeki hesaplanmış olan deplasmanı ve en izin verilen üst değeridir.

ASD-AISC [16] tasarım yönetmeliğinde, çekme elemanları için maksimum narinlik oranı 300 olarak sınırlandırılmıştır ve basınç elemanları için bu oran 200 olarak önerilmiştir. Bu yüzden tasarım sınırlayıcıları ile bağlantılı olarak narinlik şu şekilde formüle edilebilir;

$$\begin{aligned} \lambda_m &= \frac{K_m L_m}{r_m} \leq 300 \text{ (çekme elemanları için)} \\ \lambda_m &= \frac{K_m L_m}{r_m} \leq 200 \text{ (basınç elemanları için)} \end{aligned} \quad (7)$$

Burada, K_m m 'inci elemanın etkili uzunluk faktörüdür (tüm kafes elemanlarında $K_m = 1$ olarak alınır), ve r_m bu elemanın atalet yarıçapıdır.

Çekme elemanları için izin verilen gerilme direnci Eşitlik 8'de ki gibi hesaplanır;

$$\begin{aligned}(\sigma_t)_{all} &= 0.60 F_y \\ (\sigma_t)_{all} &= 0.50 F_u\end{aligned}\quad (8)$$

Burada, F_y ve F_u akma ve en üst gerilme direncidir ve iki formülünden daha düşük değere sahip olan çekme elemanı için eksenel gerilmenin üst seviyesi olarak düşünülür.

Basınç elemanları için izin verilen gerilme sınırları elemanların elastik ve elastik olmayan burkulma olarak bilinen iki ayrı göçme durumuna bağlı olarak hesaplanır, Eşitlik (9-11).

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (9)$$

$$(\sigma_c)_{all} = \frac{\left[1 - \frac{(K_m L_m / r_m)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(K_m L_m / r_m)}{8C_c} - \frac{(K_m L_m / r_m)^3}{8C_c^3}}, \quad \lambda_m < C_c \text{ (elastik olmayan burkulma)} \quad (10)$$

$$(\sigma_c)_{all} = \frac{12\pi^2 E}{23(K_m L_m / r_m)^2}, \quad \lambda_m \geq C_c \text{ (elastik burkulma)} \quad (11)$$

Eşitlik (9-11)'de, E elastisite modülü ve C_c kritik narinlik oranı parametrelerini temsil ederler.

$\lambda_m < C_c$ olan bir eleman için, elastik olmayan bir şekilde burkulduğu kabul edilir ve izin verilen basınç gerilmesi Eşitlik 10'a göre hesaplanır. Aksi takdirde ($\lambda_m \geq C_c$), elemanda elastik burkulma oluşur ve izin verilen basınç gerilmesi Eşitlik 11'e göre hesaplanır.

OPTİMİZASYONDA KULLANILAN META-BULGUSAL ARAMA TEKNİKLERİ

Partikül Küme

Partikül Küme Optimizasyon (PKO) yöntemi hayvanlarda rastlanan böcek kümelenmesi, kuş sürüleri ve balıkların toplu hareketleri gibi sosyal davranışlarını temel alır [14]. Bu davranış bütün sürü hareketini gösteren bilgi ve aynı zamanda her bir bireyin hafızasına dayalı olan sosyal gruplandırmaya dayanır. Prosedür bir amaç fonksiyonu örnek uzayı içerisinde rastgele olarak oluşturulan sürüyü meydana getiren belli miktarda partikülü ihtiva eder. Sürü içerisindeki her partikül optimum tasarım problemi için birer aday çözümdür. Partiküller örnek uzaya doğru uçuşa eğilimindedirler ve bir zaman aralığı için her bir adımdaki pozisyonları, mevcut pozisyonları ve hız vektörleri ve kullanılarak güncellenir. Algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir [8, 4].

Birinci adım; Partiküllerin oluşturulması: Bir partikül kümesi küme boyutunu (μ) temsil eden ve önceden belirlenmiş miktarda partikülden oluşur. Her partikül ($\mathbf{P}$) iki adet bileşene sahiptir; bir yer (tasarım) $\mathbf{I}$ vektörü ve bir hız vektörü $\mathbf{v}$ (Eşitlik 12). Yer vektörü $\mathbf{I}$ tasarım değişkenlerinin değerlerini (yerlerini) ihtiva ederken hız vektörü $\mathbf{v}$ de arama süresince bu yer vektörünün güncellenmesi için kullanılır. Sürü içindeki her bir partikül bütün ilk pozisyonlar $I_i^{(0)}$ ve hızlar $v_i^{(0)}$ Eşitlik 13 ve 14'e bağlı kalacak şekilde rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur.

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I}, \mathbf{v}), \quad \mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_{N_d}] \quad , \quad \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{N_d}] \quad (12)$$

$$I_i^{(0)} = I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min}), \quad i = 1, \dots, N_d \quad (13)$$

$$v_i^{(0)} = \frac{I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min})}{\Delta t}, \quad i = 1, \dots, N_d \quad (14)$$

Burada r , 0 ile 1 arasında rastgele seçilmiş bir numara; Δt zaman aralığı; ve $I_{\min}$, $I_{\max}$ ise sırasıyla kesit listesindeki ilk ve son çelik profilin sıra numaralarını göstermektedir.

İkinci adım; Partiküllerin değerlendirilmesi: Bütün partiküller 2 numaralı denkleme bağlı kalınmak suretiyle analiz edilir ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

Üçüncü adım; Partiküllerin en iyi değerinin ve küme içindeki en iyi partikül değerinin güncellenmesi: Bir partikülün o ana kadarki en iyi pozisyonu (minimum amaç fonksiyonu değerine sahip olan en iyi tasarım) partikülün en iyi değeri olarak kabul edilir ve her bir partikülün en iyi değeri $\mathbf{B}$ vektörüne kaydedilir. Bunun yanı sıra prosesin başlangıcından itibaren herhangi bir partikül tarafından elde edilmiş olan en iyi pozisyon ise en iyi global pozisyon olarak $\mathbf{G}$ vektörüne kaydedilir. Her bir k iterasyon adımı için partikül ve global en iyi pozisyon değerleri güncellenir.

$$\mathbf{B}^{(k)} = [B_1^{(k)}, \dots, B_i^{(k)}, \dots, B_{N_d}^{(k)}] \quad \mathbf{G}^{(k)} = [G_1^{(k)}, \dots, G_i^{(k)}, \dots, G_{N_d}^{(k)}] \quad (15)$$

Dördüncü adım; Partiküllerin hız vektörlerinin güncellenmesi: Her bir partikülün hız vektörü partiküllerin mevcut pozisyonu, en iyi pozisyonu ve global en iyi pozisyon dikkate alınarak aşağıdaki gibi güncellenir.

$$v_i^{(k+1)} = wv_i^{(k)} + c_1r_1\left(\frac{G_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t}\right) + c_2r_2\left(\frac{B_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t}\right) \quad (16)$$

Burada, r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında seçilen rastgele sayılar; w algoritmanın keşif özelliklerini kontrol eden partikül atalet parametresi; ve c_1 ve c_2 ise partikülün sırasıyla kendisine ve sürüye ne kadar bağlı kalacağını gösteren güven parametreleridir.

Beşinci adım; Partikül pozisyon vektörünün güncellenmesi: Daha sonra güncellenen hız vektörü kullanılarak her bir partiküle ait pozisyon vektörü güncellenir.

$$I_i^{(k+1)} = I_i^{(k)} + v_i^{(k+1)}\Delta t \quad (17)$$

Altıncı adım; Sonlandırma: İkidenden beşe kadar olan adımlar önceden belirlenmiş olan N_{ite} kadar iterasyon için tekrarlanır.

Harmoni Arama

Harmoni Arama (HA) metodu ilk olarak Lee ve Geem [9] tarafından oluşturuldu. Yöntem; orkestranın bir müzik parçasını çalmaya başlamadan önce, müzik aletlerinin akortlarının yapılarak orkestrada ortak bir harmoni elde edilmesi kavramı üzerine oturtulmuştur. Orkestranın insanlara keyifle dinlettirdiği bir eserin çalınmasındaki müzik aletlerinin uyumu, optimizasyon işleminin global optimumu bulmasına benzetilmiştir. Yapısal optimizasyon metodlarının çoğu önemli derece bilgi isteyen matematiksel algoritmalara gereksinim duyarlar ve başlangıç değerlerin seçimi algoritmanın global optimum değere yakınsamasını sağlamak için önemlidir. HA algoritması ise fazla matematiksel algoritmaya ihtiyaç duymaz ve başlangıç değerlerine gerek yoktur. HA metodunda derece artırılarak arama yerine rastgele arama yapılır ve türevsel bilgiye gerek yoktur.

Birinci adım; Harmoni hafıza matrisinin oluşturulması: İlk olarak başlangıç harmoni hafıza matrisi ($\mathbf{H}$) oluşturulur. Denklem 10'da da gösterildiği gibi matrisin büyüklüğü harmoni hafızanın büyüklüğü kadardır. Harmoni hafıza matrisi, genetik algoritmalar ve evrimsel stratejiler yöntemindeki popülasyon ile kavramsal olarak eşdeğerdir. Harmoni hafıza matrisinin büyüklüğü (μ) çözüm vektörlerinin sayısı kadardır. Her bir çözüm (harmonik vektörü, $\mathbf{I}^t$) tasarım değişkenlerinden (N_d) oluşmaktadır ve her harmoni vektörü matrisin ayrı satırında gösterilir. Sonuç olarak, harmoni hafıza matrisi $\mathbf{H} = \mu \times N_d$ şeklinde ifade edilir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & \dots & I_{N_d}^1 \\ I_1^2 & I_2^2 & \dots & I_{N_d}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1^\mu & I_2^\mu & \dots & I_{N_d}^\mu \end{bmatrix} \begin{matrix} \phi(\mathbf{I}^1) \\ \phi(\mathbf{I}^2) \\ \dots \\ \phi(\mathbf{I}^\mu) \end{matrix} \quad (18)$$

İkinci adım; Harmoni hafıza matrisinin değerlendirilmesi: Harmoni hafıza matrisi çözümleri analiz edildikten sonra onların amaç fonksiyon değerleri Eşitlik 3'e göre hesaplanır. Değerlendirilen çözümler matris içindeki amaç fonksiyon değerlerinin artan dizisine göre sıralanır. Bu sıralama $\phi(\mathbf{I}^1) \leq \phi(\mathbf{I}^2) \leq \dots \leq \phi(\mathbf{I}^\mu)$ şeklindedir.

Üçüncü adım; Yeni harmoninin geliştirilmesi: Yeni harmoni matrisi $\mathbf{I}' = [I'_1, I'_2, \dots, I'_{N_d}]$ harmoni hafıza ya da tamamlanmış ayrık set tarafından her bir tasarım değişkeni seçilerek geliştirilir. Harmoni hafıza tarafından bir tasarım değişkeninin seçilme olasılığı algoritmanın önemli bir parametresi olan harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranı ($hmcr$) ile kontrol edilir. Bu olasılığı uygulama amacıyla her bir değişken (I_i) için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı (r_i) oluşturulur. Eğer seçilen rastgele sayı (r_i) harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranından ($hmcr$) küçük veya eşit ise değişken H harmoni matrisinin i'inci sütunu tarafından atanan herhangi bir değer tarafından Eşitlik 19'da gösterildiği gibi seçilir. Eğer r_i sayısı $hmcr$ parametresinden büyükse rastgele değer tamamlanmış ayrık set tarafından atanır.

$$I'_i = \begin{cases} I_i \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^\mu\} & \text{if } r_i \leq hmcr \\ I_i \in \{1, \dots, N_s\} & \text{if } r_i > hmcr \end{cases} \quad (19)$$

Eğer bir tasarım değişkeni harmoni hafıza tarafından kendi değerine ulaştırılırsa, bu değer in derece uyumluluğu (pitch-adjusted) olup olmadığı kontrol edilmelidir. Basit bir şekilde derece uyumluluğu değişkenin şimdiki değeri tarafından eklenerek veya çıkarılarak elde edilen değişkenlerin komşu değerlerden birisinin örneklemevidir. Benzer şekilde $hmcr$ parametresi de derece uyumluluğu (par), Eşitlik 20, olarak bilinen olasılık kavramı ile birlikte çalıştırılır. Eğer par tarafından etkinleştirilmemişse tasarım değişkeni farklılaşmaz.

$$I_i'' = \begin{cases} I'_i \pm 1 & \text{if } r_i \leq par \\ I'_i & \text{if } r_i > par \end{cases} \quad (20)$$

Dördüncü adım; Harmoni Hafıza matrisinin Güncelleştirilmesi: Yeni harmoni vektörünün oluşturulmasından sonra onun amaç fonksiyon değeri hesaplanır. Eğer bu değer harmoni hafıza matrisinin içindeki en kötü değerden daha düşükse, Bulunan yeni değer hafıza matrisinin içine yerleştirilir ve matrisin içindeki en kötü değer matris içinden çıkartılır. Yenilenmiş harmoni hafıza matrisi amaç fonksiyonlarının değerine göre yükselerek sıralanır.

Beşinci adım; Sonlandırma: 3. ve 4. Adımlar algoritma döngünün maksimum sayısına (N_{cyc}) ulaşınca kadar tekrar edilir.

Genetik Algoritmalar

Evrimsel algoritmaların en iyi bilinen uzantısı yapı optimizasyonunun da içinde bulunduğu geniş spektrumlu mühendislik alanlarında birçok uygulaması bulunan Genetik Algoritmalar (GA). Hali hazırda tekniğin sürekli ve ayrık değişkenli problemlerin çözümüne yönelik geliştirilen birçok versiyonunu literatürde bulmak mümkündür. Mevcut çalışmada ise geniş kabul edilebilirliği ve yaygınlığı nedeniyle standart bileşenlere sahip olan temel genetik algoritma test edilmiştir. Algoritmanın ana yapısı aşağıda maddeler halinde verilmiştir [17].

Birinci adım; Başlangıç popülasyonu: Temel genetik algoritmada tasarım değişkeni, gerçek tasarım değeri ile belirtilmez bunun yerine 0 ve 1 sayılarının oluşturduğu sonlu uzunluktaki sayı

dizileriyle kodlanır. Kodlanmış bir tasarım değişkeni 001001 dizisinde olduğu gibi sıfır ve birlerden oluşur ve Genetik algoritma terminolojisinde alt dizi olarak ifade edilir. Eğer toplamda N_d tasarım değişkeni mevcut ise söz konusu tasarım problemine olası bir tasarımı ifade edecek olan ana dizi (kromozom veya birey) oluşturmak amacıyla N_d adet alt dizi bir araya getirilir. Başlangıç popülasyonu sıfır ve bir sayılarının rastgele atanması doğrultusunda ortaya çıkarılan ve önceden belirlenmiş bir sayıdaki (popülasyon boyutu) bireylerden oluşur.

İkinci adım; Kodlama: Bütün alt dizileri verilen bir profil listesindeki standart çelik kesitlerin sıra numarasını temsil eden tamsayı değerleriyle eşlemek amacıyla her birey için kod çözümü gerçekleştirilir. Eşitlik 21'de gösterilen çoklu-parametre eşleme planı bu amaçla sıklıkla kullanılır.

$$I_i = I_{\min} + \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{2^i - 1} \right) \cdot \Omega \quad (21)$$

Burada, I alt dizinin boyu (alt dizideki sıfır ve birlerin toplam sayısı), $I_{\min}$ ve $I_{\max}$ sırasıyla profil listesindeki ilk ve son çelik kesitlere denk gelen sıra numaraları ve Ω ise alt dizinin ikilik sistemden onluk sisteme geçişe göre hesaplanan kodlama değeridir ($\Omega (100101) = 2^5 + 2^2 + 2^0 = 37$).

Üçüncü adım; Değer verme ve uygunluk: Birey deşifre edilir edilmez, dış yükler etkisi altında yapının davranışını gözlemlemek amacıyla yapı analizi gerçekleştirilir ve Eşitlik 22 ile belirlenen amaç fonksiyonunu değerinin bu bireye ataması yapılır. Bütün bireylere bu mantık çerçevesinde değer verildikten sonra, her bir bireyin bütün popülasyon içindeki payını ifade eden uyumluluk skoru bulunur. Bu çalışmada uyumluluk skoru f_k nın hesabı için maksimum amaç fonksiyonu ϕ ($\phi_{\max}$) nın k bireyine ait amaç fonksiyonu değeri olan ϕ_k ya oranını ifade eden denklem kullanılmıştır.

$$f_k = \frac{\phi_{\max}}{\phi_k} \quad (22)$$

Eşitlik 24 yardımıyla hesaplanan bu uyumluluk değerlerinin yüksek uygunluğa sahip olan bireylerin baskınlığını elimine etmek amacıyla ölçeklendirilmesi gereklidir. Eşitlik 23'de bu amaç için kullanılan ölçeklendirme fonksiyonu görülmektedir.

$$f'_k = f_k \left[\frac{(s_c - 1)}{(f_{\max} - f_{\text{ave}})} f_{\text{ave}} \right] + \frac{(f_{\max} - s_c f_{\text{ave}})}{(f_{\max} - f_{\text{ave}})} f_{\text{ave}} \quad (23)$$

Eşitlik 23'deki $f_{\max}$, $f_{\min}$ ve f_{ave} sırasıyla popülasyondaki maksimum, minimum ve ortalama uygunluk değerlerini gösterirler. s_c gerçek değerli ölçeklendirme faktörü (2 olarak kabul edilir); ve f'_k ise k bireyinin ölçeklendirilmiş uygunluk değerini ifade eder. Uygunluk ölçeklendirmesi sayesinde ölçeklendirilmiş maksimum uygunluğun bunun ortalama değerine oranı s_c civarında bir değere ayarlanır.

Dördüncü adım; Seçim ve yeniden üretim: Seçim işlemi, yüksek uygunluk skoruna sahip olan bireylerin seçilip tekrar üretildiği ve en küçük uygunluğa sahip olanların ise çiftleşme havuzu olarak adlandırılan orta sınıf popülasyon oluşturmak üzere elimine edildiği bir prosedürde gerçekleştirilir. Teorik olarak, çiftleşme havuzundaki bireylerin temsil edildiği kopya sayısı Eşitlik 24'de verilen uygunluk orantılı seçim ifadesiyle belirlenir.

$$\eta_k = \frac{f'_k}{f'_{\text{ave}}} \quad (24)$$

Burada f'_{ave} popülasyonun ölçeklendirilmiş ortalama uygunluğunu gösterirken, η_k bir bireye ayrılan yeniden üretim sayısını ifade eder. Eşitlik 24 olası yuvarlama hataları nedeniyle doğrudan kullanılmaz bunun yerine algoritmik düzenlemesi rulet çarkı yaklaşımı ile gerçekleştirilir. Bu yaklaşıma göre ilk olarak bireyler ölçeklendirilmiş uygunlukları ile bağlantılı olarak simüle edilmiş çark üzerindeki yuvalara yerleşir. Daha sonra rulet, çiftleşme havuzunda yer alacak bireylerin seçimi ve yeniden üretimi amacıyla μ kere döndürülür.

Beşinci adım; Genetik değişim: Seçilmiş ve yeniden üretilmiş olan bireyler $\mu/2$ çiftle rastgele birleştirilir ve genetik değişim genetik değişim olasılığı p_c olarak adlandırılan olasılık değerine göre ayrı ayrı uygulanır. Genetik değişim bir çiftle uygulandığında genetik bilgiyi yeni bireylerin üretilmesi amacıyla ebeveynler arasında değiş tokuş eder. Bu işlemi uygulamak amacıyla birçok farklı strateji tasarlanmıştır. Söz konusu çalışmada, çiftleştirilecek bireylerin rastgele seçilmiş iki genetik değişim sahasında tutulduğu iki noktalı genetik değişim yaklaşımı kullanılmıştır.

Altıncı adım; Mutasyon: Önceden tayin edilmiş ve genellikle 0.01 den düşük olarak kullanılan gen-mutasyon olasılığı p_m e bağlı kalınarak, 0 veya 1 genini rastgele değiştirmek suretiyle yeni bireylerin genlerine mutasyon uygulanır.

Yedinci adım; Sonlandırma: Yeni popülasyon ebeveynin yerini alır ve maksimum iterasyon numarasına (N_{gen}) ulaşılan kadar adımlar tekrar edilir.

TASARIM ÖRNEKLERİ

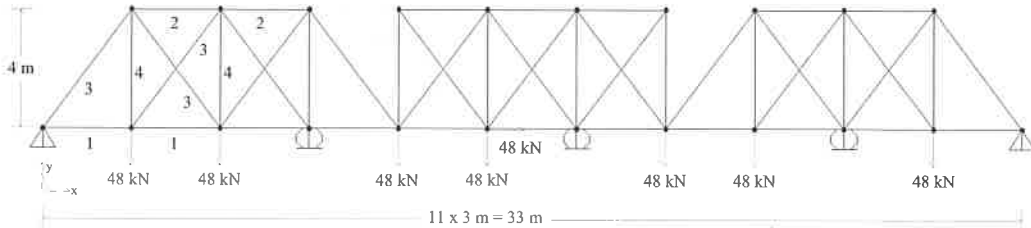
İki adet farklı geometride ve yapısal konfigürasyonda tasarlanmış olan 46-elemanlı düzlem çelik kafes sistem yukarıda çözüm algoritmaları anlatılan üç ayrı meta-bulgusal teknik ile çözülmüş ve tekniklerin performans karşılaştırılması yapılmıştır. Tasarım problemlerinin çözümü için kullanılan her bir meta-bulgusal yöntemin optimum tasarım problemlerinde kullanılan parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Her iki tasarım örneği için bu parametreler aynı alınmış ve değiştirilmemiştir. İki örnekte de yapı elemanlarının seçimi ASD-AISC [16] tasarım yönetmeliğinde bahsi geçen 296 adet geniş başlıklı W-kesit arasından yapılmıştır.

Tablo 1: Optimizasyon Tekniklerinin Parametreleri

Yöntem	Parametre Değerleri
PKO	$\mu = 50$, $\Delta t = 1.0$, $c_1 = 1.5$, $c_2 = 1.5$, $w = 0.5$, $N_{ite} = 1000$
HA	$\mu = 50$, $hmcr = 0.90$, $par = 0.30$, $N_{cyc} = 50000$
GA	$\mu = 50$, $p_c = 0.90$, $p_m = 0.005$, $s_c = 2.0$, $N_{gen} = 1000$

Örnek 1: 46-Elemanlı Çelik Kafes Sistem

İlk tasarım örneği olarak, geometrisi Şekil 1'de gösterilen ve toplam uzunluğu 33m olan 4 açıklığa sahip 46-elemanlı düzlem çelik kafes sistem analiz edilmiştir [11]. Bu sistemin tasarım değişkenleri olarak kabul edilen eleman en kesit alanları yapı ağırlığını minimize edecek şekilde optimizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Yapıda bulunan 46 adet eleman, alt kiriş elemanları birinci grup, üst kiriş elemanları ikinci grup, çapraz elemanlar üçüncü grup ve kolon elemanları dördüncü grup olacak şekilde gruplandırılmıştır. Yapı Şekil 1'de gösterildiği gibi alt kiriş üzerinde bulunan bağlantı noktalarından bazılarında negatif y-yönünde uygulanan 48 kN değerinde 7 adet tekil yüklemeye maruz bırakılmıştır. Ayrıca alt kirişin tam ortasında bulunan bağlantı noktasına negatif y-yönünde yapılan yüklemeye ilaveten pozitif x-yönünde 48 kN değerinde tekil bir yükleme daha yapılmıştır. Bütün birleşim noktaları için herhangi bir yöndeki deplasman değeri maksimum 0.254 cm olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

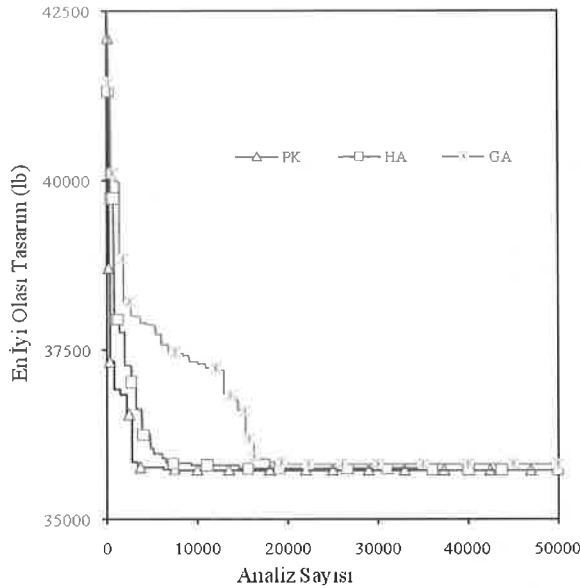


Şekil 1: 46-Elemanlı Çelik Kafes Sistem

Birinci tasarım örneği için üç ayrı optimizasyon algoritması ile elde edilen minimum ağırlıklar ve her gruptaki elemanlara atanan kesitler Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu tabloda açıkça görülmektedir ki en hafif kafes sistemin ağırlığı 16204.01 kg'dır ve hem PK hem de HA teknikleri aynı optimum sonucu bulmuştur. Bu üç teknik arasında en ağır sistem ise 16245.45 kg ile GA metodu ile elde edilmiştir. Bu sonuçlar için elde edilen tasarım geçmiş grafiği Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2: 46-elemanlı çelik kafes sistem için elde edilen optimum kesitler

Size variables	PK		HA		GA	
	Ready Section	Area, in ² (cm ²)	Ready Section	Area, in ² (cm ²)	Ready Section	Area, in ² (cm ²)
1	W16x67	19.1 (127.09)	W16x67	19.1 (127.09)	W12x65	19.1 (123.23)
2	W12x45	13.2 (85.16)	W12x45	13.2 (85.16)	W12x45	13.2 (85.16)
3	W10x54	14.7 (101.94)	W10x54	14.7 (101.94)	W12x50	14.7 (94.84)
4	W21x62	19.1 (118.06)	W21x62	19.1 (118.06)	W12x65	19.1 (123.23)
Weight	16204.01 kg		16204.01 kg		16245.45 kg	

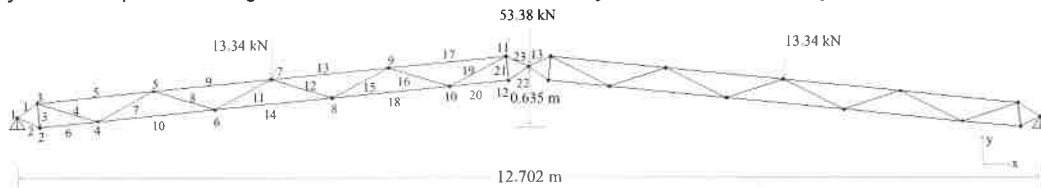


Şekil 2: 46-elemanlı çelik kafes sistem için tasarım geçmişi grafiği

Şekil 2'de görüldüğü üzere üç optimizasyon tekniği arasında optimum sonuca en hızlı yaklaşan teknik PK metodudur. GA tekniğinin optimum sonuca düşük standart da bir yaklaşım gösterdiği yine bu grafikte görülmektedir. HA tekniği ise beklenildiği gibi sabit ve düzenli bir yaklaşım göstermiştir.

Örnek 2: 46-Elemanlı Düzlemsel Çelik Kafes Sistem

Bu çalışmada kullanılan ikinci tasarım örneği literatürden alınmış olan ve geometrisi Şekil 3'de gösterilen 46-elemanlı düzlemsel çelik kafes sistemidir [6]. Bu yapı tipik bir vinç veya robotik manipülatör örneğidir. Bağlantı noktalarının koordinatları Tablo 3'de verilmiştir ve yapı orta noktasına göre simetrik olduğu için simetri noktasının bir tarafındaki bağlantı noktalarının koordinatlarını hesaplamak yeterli olacaktır. Şekil 3'de gösterildiği gibi kafes sistem, 3 farklı bağlantı noktasına uygulanan tekil yüklemeye maruz bırakılmıştır ve simetri göz önüne alınarak yapının iki tarafındaki karşılıklı yapı elemanları aynı grup olacak şekilde 23 eleman grubuna ayrılmıştır. İlk tasarım örneğinde olduğu gibi bu örnekte de yapıda ki bütün birleşim noktaları için herhangi bir yöndeki deplasman değeri maksimum 0.254 cm olacak şekilde sınırlandırılmıştır.



Şekil 3: 46-Elemanlı Düzlemsel Çelik Kafes Sistem

Tablo 3: 46-elemanlı düzlemsel çelik çerçeve sisteminin bağlantı noktalarının koordinatları

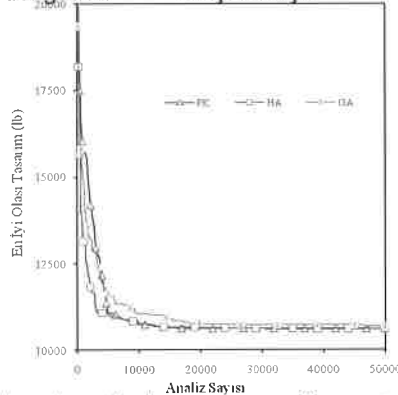
Bağlantı Noktası	X	Y	Bağlantı Noktası	X	Y
1	0.00	0.00	8	3.92	0.24
2	0.28	0.13	9	4.62	0.61
3	0.25	0.18	10	5.38	0.38
4	1.01	0.05	11	6.07	0.76
5	1.70	0.32	12	6.10	0.46
6	2.46	0.09	13	6.35	0.635
7	3.16	0.47			

Yapının optimizasyon teknikleri ile analizinden elde edilen optimum sonuçlar ve eleman gruplarına atanan kesitler Tablo 4'de verilmiştir. Bu tabloda gösterildiği gibi bu örnekte kullanılan çelik kafes sistemi için en hafif yapı ağırlığını 4807.86 kg olarak PK tekniği elde etmiştir. İkinci en iyi sonucu HA metodu 4808.79 kg yapı ağırlığı ile bulmuştur. Bu iki teknik ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılacak olursa aralarındaki farkın çok az olduğu aşikardır. Bu üç teknik arasında en kötü sonucu ise 4842.46 kg yapı ağırlığı elde eden GA metodu vermiştir.

Tablo 4: 46-elemanlı düzlemsel çelik kafes sistem için elde edilen optimum kesitler

Size variables	PK		HA		GA	
	Ready Section	Area, in ² (cm ²)	Ready Section	Area, in ² (cm ²)	Ready Section	Area, in ² (cm ²)
1	W33x130	38.3 (127.09)	W33x130	38.3 (127.09)	W30x124	36.5 (127.09)
2	W14x145	42.7 (85.16)	W36x150	44.2 (85.16)	W24x112	47.7 (85.16)
3	W14x68	20.0 (101.94)	W21x68	20.0 (101.94)	W18x55	16.2 (101.94)
4	W27x114	33.5 (118.06)	W10x112	32.9 (118.06)	W30x108	31.7 (118.06)
5	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)
6	W30x124	36.5 (85.16)	W30x124	36.5 (85.16)	W27x117	34.4 (85.16)
7	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)
8	W24x104	30.6 (118.06)	W27x102	30.0 (118.06)	W18x106	31.2 (118.06)
9	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)
10	W30x132	38.9 (85.16)	W30x132	38.9 (85.16)	W12x136	39.9 (85.16)
11	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)
12	W14x90	26.5 (118.06)	W12x87	25.6 (118.06)	W12x106	31.1 (118.06)
13	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)
14	W36x135	39.7 (85.16)	W12x136	39.9 (85.16)	W30x124	36.5 (85.16)
15	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)
16	W21x101	29.8 (118.06)	W27x102	30.0 (118.06)	W27x102	30.0 (118.06)
17	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)	W6x9	2.68 (127.09)
18	W21x122	35.9 (85.16)	W30x124	36.5 (85.16)	W24x131	38.5 (85.16)
19	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)	W6x9	2.68 (101.94)
20	W30x116	34.2 (118.06)	W30x116	34.2 (118.06)	W33x118	34.7 (118.06)
21	W8x67	19.7 (127.09)	W18x65	19.1 (127.09)	W18x60	17.6 (127.09)
22	W36x135	39.7 (85.16)	W14x145	42.7 (85.16)	W14x132	38.8 (85.16)
23	W36x135	39.7 (101.94)	W12x136	39.9 (101.94)	W36x135	39.7 (101.94)
Weight	4807.86 kg		4808.79 kg		4842.46 kg	

Bu sonuçlar için elde edilen tasarım geçmişi grafiği Şekil 4'de verilmiştir. Bu şekilde ilk örnekte olduğu gibi PK tekniğinin ne kadar hızlı bir şekilde optimum sonuca yakınsadığı görülebilir. Ayrıca HA yöntemi de ilk örnekte olduğu gibi optimum sonuca güvenilir bir yakınsama göstermiştir. Hem PK hem de HA teknikleri 10.000 döngü içerisinde sonuç tasarımına oldukça yaklaştırmışlardır. GA metodu ilk örneğe nazaran bu örnekte daha etkili bir yakınsama performansı sergilemiş fakat sonuç tasarımına ancak 20.000 döngüden sonra ulaşabilmektedir.



Şekil 4: 46-elemanlı düzlemsel çelik kafes sistem için tasarım geçmişi grafiği

SONUÇLAR

Bu çalışmanın en umut veren sonucu, Partikül Küme, Harmoni Arama ve Genetik Algoritmalar olarak adlandırılan meta-bulgusal optimizasyon yöntemlerinin yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünü bulmada oldukça etkili olduklarını ortaya koymuştur. Bu yöntemler sadece yapısal optimizasyon alanında değil daha birçok üretim ve tasarım alanında da efektif olarak kullanılabilecek şekilde genişletilebilirler. Bu çalışmada literatürden alınan iki adet geometrileri ve yapısal konfigürasyonları birbirinden farklı olan 46-elemanlı düzlemsel çelik kafes sistem tasarım örneği olarak alınıp bahsi geçen meta-bulgusal optimizasyon algoritmaları ile analiz edilmiş ve bu algoritmaların performansları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çözümleri yapılan tasarım örnekleri bu çalışmada kullanılan optimizasyon tekniklerinin etkinliğini bir kez daha ortaya koymuştur.

REFERANSLAR

- [1] Hasançebi, O., Çarbaş, S., Doğan, E., Erdal, F., ve Saka, M.P., *Comparison of nondeterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames*, Computers and Structures, c.88, s.17-18, syf.1033-1048, 2010.
- [2] Saka, M.P., *Optimum Design of Steel Skeleton Structures*, Bölüm.8, Music inspired Harmony Search Algorithm, Theory and Applications, Seri: Studies in Computational Intelligence, c.191, Ed; Geem, Z.W., ISBN: 978-3-642-00184-0, Springer, 2009.
- [3] Hasançebi, O., Çarbaş, S., Doğan, E., Erdal, F., ve Saka, M.P., *Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures*, Computers and Structures, c.87, s.5-6, syf.284-302, 2009.
- [4] Perez, R.E. ve Behdinan, K., *Particle Swarm Approach for Structural Design Optimization*, Computers and Structures, c.85, s.19-20, syf.1579-1588, 2007.
- [5] Drezo, J., Petrowski, A., Siarry, P. ve Taillard, E., *Metaheuristics for Hard Optimization*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [6] Suleman, A. ve Sedaghati, R., *Benchmark case studies in optimization of geometrically nonlinear structures*, Structural and Multidisciplinary Optimization, c.30, syf.273-296, 2005.
- [7] De Castro, L.N., ve Von Zuben, F.J., *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, Idea Group Publishing, USA, 2005.
- [8] Venter, G. ve Sobieszcanski-Sobieski, J., *Multidisciplinary Optimization of a Transport Aircraft Wing Using Particle Swarm Optimization*, Structural and Multidisciplinary Optimization, c.26, syf.121-131, 2004.
- [9] Lee, K.S. ve Geem, Z.W., *A New Structural Optimization Method Based on the Harmony Search Algorithm*, Computers and Structures, c.82, syf.781-798, 2004.
- [10] Kochenberger, G.A. ve Glover, F., *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [11] Joghataie, A. ve Ghasemi, M., *Fuzzy Multistage Optimization of Large-Scale Trusses*, Journal of Structural Engineering, c.127, s.11, syf.1338-1347, 2001.
- [12] Kennedy, J., Eberhart, R., ve Shi, Y., *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [13] Adami, C., *An introduction to Artificial Life*, Springer-Verlag/Telos, 1998.
- [14] Kennedy, J. ve Eberhart, R., *"Particle Swarm Optimization"*, IEEE International Conference on Neural Networks, IEEE Press, c.4, syf.1942-1948, 1995.
- [15] Paton, R., *Computing with Biological Metaphors*, Chapman & Hall, USA, 1994.
- [16] ASD-AISC, "Manual of Steel Construction-Allowable Stress Design", 9' Baskı, Chicago, Illinois, USA, 1989.
- [17] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.