



ÇELİK ÇERÇEVELERİN LRFD-AISC ŞARTNAMESİNE GÖRE AV ARAMA OPTİMİZASYON YÖNTEMİ KULLANILARAK OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI

E. Doğan¹ ve M. P. Saka²

¹Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

²Bahreyn Üniversitesi, Isa Town, Bahrain

ABSTRACT

This study presents a hunting search based optimum design algorithm for moment resisting steel frames. Hunting search algorithm is a numerical optimization method inspired by group hunting of animals such as wolves, lions, and dolphins. Each of these hunters performs hunting in a different way. However, they are common in that all of them look for a prey in a group. Prey is encircled and the ring of siege is tightened gradually until it is caught. Hunting search is employed for the automation of optimum design process, during which size variables are selected from an available W-steel section list in such a way that the weight of frame is minimum and the design constraints are satisfied. Provisions of LRFD-AISC (Load and Resistant Factor Design-American Institute of Steel Construction) are considered to formulate the optimum design problem. Different numerical examples are designed by the presented algorithm to demonstrate its efficiency. Results reveal that hunting search shows good performance in finding optimum solutions for moment resisting steel frames.

ÖZET

Bu çalışmada çelik çerçeveler için av arama optimizasyon yöntemini temel alan bir optimum tasarım algoritması sunulmaktadır. Aslan, kurt ve yunus gibi hayvanların gurup olarak avlanmalarından esinlenilerek geliştirilmiş olan av arama optimizasyon yöntemi de bu tekniklerin son dönemlerde ön plana çıkanlarından biridir. Bu avcıların her biri avlanmalarını farklı şekillerde gerçekleştirir. Fakat ortak yönleri grup içinde birlikte av aramalarıdır. Avın etrafı çembere alınır ve yakalanana kadar çember daraltılır. Mevcut çalışmada av arama tekniği çerçeve optimizasyon algoritmasının otomasyonu için kullanılmıştır. İki boyutlu çelik çerçevelerin optimum tasarımının gereği olarak; yapı elemanlarının W profiline uygun olması, LRFD-AISC tasarım şartnamelerindeki sınırlayıcıları sağlaması ve çerçevenin minimum ağırlığa sahip olması gerekmektedir. Bu amaçla burkulmayı da hesaba katan dayanım sınırlayıcıları göz önünde bulundurulmuş ve algoritmanın kolon ve kirişler için Amerikan Şartnamesindeki 272 kesit içerisinden seçim yapması sağlanmıştır. Her bir grup içindeki elemanlara aynı kesitin tayin edilebilmesi için eleman gruplandırılması yapılmıştır. Şartnamedeki sınırlayıcıları dikkate alarak minimum çerçeve ağırlığını hesaplayan bu algoritmanın etkinliği örnek problemlerle gösterilmiştir.

GİRİŞ

Stokastik sayısal optimizasyon arama tekniklerinde kaydedilen ilerlemelerin sonucu olarak etkili bir şekilde çalışan yeni boyutlandırma teknikleri yapı mühendislerinin kullanımına sunulmuştur. Bu tekniklerin kullanımıyla birlikte yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü matematiksel programlama yöntemleri ile elde edilenlere göre çok daha etkin hale gelmiştir. Bu stokastik optimizasyon yöntemlerinin temelindeki mantık sürü zekası, erimiş metallerin soğutulma işlemi, en iyinin hayatta kalması gibi prensiplerin sayısal algoritmalar içinde taklit edilmesidir. Bu metodlar üretilmelerinde esinlenen doğasal fenomene bağlı olarak isimlendirilirler. Karınca kolonisi optimizasyon yöntemi karıncaların yuvaları ve yiyecekleri arasındaki en kısa yolu bulma çabalarını simule ederken, benzetimli tavlama erimiş metallerin soğutulma sürecindeki enerji minimizasyonunu kullanır. Bu stokastik arama teknikleri amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların türevlerine ihtiyaç duymadığı gibi, deterministik kurallar yerine olasılığa dayalı arama yollarını kullanırlar [1,2]. Tasarım mühendisleri son yıllarda alışılmadık dışında kalan bu etkili ve bir o kadarda güçlü tekniklerden esinlenerek bir çok optimum boyutlandırma algoritması geliştirmişlerdir. [3] de bu algoritmalar hakkında detaylı bilgi yer almaktadır.

Aslan, kurt ve yunus gibi hayvanların gurup olarak avlanmalarından esinlenilerek geliştirilmiş olan av arama optimizasyon yöntemi de bu tekniklerin son dönemlerde ön plana çıkanlarından biridir. Gurup içinde yer alan avcılar bazı stratejileri kullanarak avlarını çevreler ve yakalarlar. Örneğin kurtlar kendilerinden çok daha büyük ve hızlı hayvanları bu tarz bir avlanma yöntemi ile yakalayabilirler. Önce bir av seçilir ve daha sonra avlanma gurubu ona doğru adım adım yaklaşarak avlanmayı gerçekleştirir. Avcılar kokularının av tarafından farkedilmesi riski nedeniyle rüzgarda durmaktan sakınırlar. Bu avcılardan her biri bir yapısal optimizasyon problemi için aday bir çözüm oluşturur. Hayvanların av bulup yakalamaları için biraraya gelmeleri işlemine benzer olarak optimum boyutlandırma işlemi optimum çözümü bulmayı hedefler. Her iterasyonda avcılar pozisyonu güncellenerek amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi hedeflenir. Bir avcı gurubu, gurup boyutunu temsil eden ve önceden belirlenmiş miktarda avcıdan oluşur. Bu amaçla öncelikle gurup içindeki her bir avcı için bütün ilk pozisyonlar rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur. Bu işlem için değeri 0 ile 1 arasında değişen sayılar içinden rastgele sayı seçme uygulamasından faydalanılır. Tekniğin orjinalinde [6] değişkenler sürekli değer alabilen türde değişkenler olarak kabul edilmişlerdir. Başka bir ifadeyle boyutlandırma içinde yer alacak olan sayısal değerler, önceden belirlenmiş olan bir sayı kümesi içinden seçilmeksizin rastgele sayı seçme uygulamasından faydalanılarak elde edilen gerçek sayı değerleri ile ifade edilir. Ancak kirişlerin hazır kesit tablolarından seçildiği optimum çelik yapı boyutlandırma problemlerinde bu kabulün yapılması mümkün değildir. Çünkü hazır kesit tablolarından seçim yapabilmek için her profilin tablo içinde yer aldığı satır numarasının tasarım değişkeni olarak atanması gerekmektedir. Bunu yapabilmek ise ancak tamsayı değerlerinin seçimiyle mümkün olabilir. Literatürde sürekli sayıları tamsayı haline getirmek için kullanılan iki adet yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ilk olarak Kennedy ve Eberhart [10] tarafından ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımda sürekli değişkenler 0 ve 1 sayı çifti kullanılarak tamsayı haline getirilir. İkinci yöntem ise Liu tarafından önerilmiş olan küsürlü sayıların en yakın tamsayıya yuvarlanması şeklindedir [11]. Bu çalışmada gerçek sayılardan tamsayı elde etmek üzere ikinci yöntem olan yuvarlama işlemi kullanılmıştır. Bu çalışmada çerçeve kolon ve kirişleri için kullanılacak W- kesitleri LRFDAISC [12] Amerikan kodundaki kesit listesi içinden seçen av arama optimizasyon yöntemi temelli bir optimum boyutlandırma algoritması geliştirilmiştir.

Çelik çerçevelerin LRFD- AISC ye göre optimum boyutlandırılması

Çelik çerçevelerin boyutlandırılmasındaki ana prensip kolon ve kirişler için standart çelik kesit tablosundan kesit atamaktır. İki boyutlu çelik çerçevelerin optimum boyutlandırılmasının gereği olarak; yapı elemanlarının W profiline uygun olması, LRFD-AISC tasarım şartnamelerindeki sınırlayıcıları sağlaması ve çerçevenin minimum ağırlığa sahip olması gerekmektedir. LRFD- AISC sınırlayıcılarının tasarım problemi formülasyonunda kullanılmasıyla birlikte aşağıdaki programlama problemi elde edilir.

$$\text{Min} \quad W = \sum_{k=1}^{ng} m_k \sum_{i=1}^{nk} L_i \quad (6a)$$

$$(\delta_j - \delta_{j-1}) / h_j \leq \delta_{ju} \quad j = 1, \dots, ns \quad (6b)$$

$$\delta_i \leq \delta_{iu} \quad i = 1, \dots, nd \quad (6c)$$

$$V_u \leq \phi V_n \quad (6d)$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 \quad \text{için} \quad \left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right)_{il} + \left(\frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \right) \right)_{il} \leq 1.0 \quad (6e)$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \leq 0.2 \quad \text{için} \quad \left(\frac{P_u}{2\phi_c P_n} \right)_{il} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \right)_{il} \leq 1.0$$

$$B_{sb} \leq B_{sc} \quad s = 1, \dots, nu \quad (6f)$$

$$D_s \leq D_{s-1} \quad (6g)$$

$$m_s \leq m_{s-1} \quad (6h)$$

Buradaki (6a) denklemi çerçeve ağırlığını gösterir. ng sistemdeki toplam grup sayısını ifade ederken, m_k k numaralı gruba atanan hazır profil kesitinin birim ağırlığını, L_i k numaralı gruptaki elemanların uzunluğunu ve nk k grubundaki toplam eleman sayısını sembolize eder.

(6b) denklemi katlar arası ötelenme sınırlayıcılarını gösterir. δ_j ve δ_{j-1} ardarda gelen iki katın yatay deplasmanları, h_j kat yüksekliği, δ_{ju} izin verilen maksimum yatay deplasman değeri ve ns ise yapıdaki toplam kat sayısıdır.

(6c) yatay deplasman sınırlayıcısıdır. nd yapıdaki deplasmanı sınırlanmış noktaların toplam sayısıdır. Birden fazla katlı yapılar için kolonların yatay yüklerden kaynaklanan yatay deplasman değeri kolon yüksekliği / 300 ile sınırlandırılmıştır. Sıva v.b. malzemeler taşıması durumunda kirişlerin maksimum sehim değeri açıklık / 300 olarak belirlenmiş ve denklemde δ_{iu} sembolüyle belirtilmiştir.

(6d) kolon kirişler için kesme dayanımı kontrolü yapar. ϕ kesme kuvveti için direnç faktörü, V_u etkiyen kesme kuvveti ve V_n taşınabilecek maksimum kesme kuvveti değeridir.

(6e) denklemi il no'lu yükleme koşulunda kiriş kolonlar için lokal kapasite kontrolü yapar. nm eleman sayısı, nl yükleme koşulu sayısı, M_{ix} eğilme dayanımı, M_{ux} uygulanan moment, P_n eksenel kuvvet dayanımı, P_u uygulanan eksenel kuvvet, ϕ_c basınca maruz kalan kolonlar için direnç faktörü, ϕ_b eğilme etkisindeki kolonlar için direnç faktörü değeridir. Açıkça anlaşılabilceği üzere bir çerçeve elemanının basınç dayanımının hesabı için elemanın etkili uzunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Bu değer hesabı için Jackson ve Moreland monografı kullanılmıştır [13].

6(f-h) denklemleri ile verilen geometrik sınırlayıcılar optimum yapı boyutlandırması örnek problemlerinin pratikteki kolon-kiriş uygulamalarıyla örtüşmesi için kullanılmıştır. (6f) ifadesi her bir kattaki kolon başlık genişliğinin bağlı olduğu kiriş başlık genişliğinden büyük veya ona eşit olması şartını sağlamak için kullanılmıştır. (6g) ve (6h) denklemleri ile de her bir katta kullanılan kolonların birim ağırlıklarının bir üst katta bağlı oldukları kolonların birim ağırlıklarından büyük olması ve yine aynı şekilde her bir katta kullanılan kolonların gövde genişliklerinin bir üst katta bağlı oldukları kolonların gövde genişliklerinden büyük olması sağlanmaktadır.

Tamsayı değişkenleri için Av arama Optimizasyon Yöntemi

Tamsayı değişkenli optimum boyutlandırma problemi aşağıdaki gibi tasvir edilebilir.

$$\begin{aligned} \text{Min. } f(x_i) \quad & i = 1, \dots, n : \\ g_j(x_i) \leq 0 \quad & j = 1, \dots, m \\ x_i \in X \quad , \quad & X = \{x_1, x_2, \dots, x_q\} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada x_i , q sayısı kadar değer içeren X setinden seçilecek olan i numaralı tamsayı değişkenini gösterirken, n tasarım değişkenlerinin sayısını ifade eder. $f(x_i)$ amaç fonksiyonu, $g_j(x_i)$ ise j nolu tasarım sınırlayıcısıdır ve m ise boyutlandırma problemi içindeki bu tasarım sınırlayıcılarının toplam sayısıdır.

Av arama optimizasyon yöntemi avcı gurubunu temsil eden ve amaç fonksiyonu arama uzayı içinde rastgele seçilmiş olan avcılardan ibarettir. Orjinal av arama optimizasyon yöntemi sürekli değişkenler için üretilmiştir. Tekniği tamsayı değerleri ile kullanabilmek için bazı değişiklikleri uygulamak gerekmektedir.

Öncelikle tamsayı değerlerini içeren X kümesindeki x_i değerleri artan sayılar şeklinde sıralanır. Daha sonra bu sayıların satır numaraları tasarım değişkeni olarak atanır. Örneğin 272 adet değer içeren tasarım setindeki 1 ile 272 arasındaki satır numaraları ana tasarım değişkenleridir. Tasarım döngüsünün herhangi bir adımında, algoritma tarafından satır numarasının üretilmesiyle birlikte bu satır numarasına karşılık gelen gerçek tasarım değişkeni değeri set içerisinde kolaylıkla alınabilir. Prosedür altı temel adımdan oluşur.

1. Adım Bu adımda yöntemin parametreleri belirlenir. Toplam altı adet parametre vardır. Bunlar; av gurubu boyutu (HGS), lidere doğru maksimum hareket (MML), avcı gurubu değerlendirme oranı (HGCR), rastgele hareket yarıçapı değerleri (Ra_{max} , Ra_{min}), yakınsama oranı parametreleri α ve β ve her bir epoktaki toplam iterasyon sayısı IE dir. Sırasıyla 90, 0.002, 0.32, 0.01, 0, 0.9, 0.02 ve 25 olarak seçilmişlerdir.

2. Adım Guruptaki avcılar (HGS) sayısına bağlı olacak şekilde her bir grup için çelik kesit satır numarası (I_i) atamak suretiyle rastgele üretilirler.

$$I_i = \text{INT} \left[I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min}) \right] \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

3. Adım Bu adımda avcılarının yeni pozisyonları (*MML*) dikkate alınarak üretilir.

$$I_i' = I_i + r(MML) (I_i^L - I_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

4. Adım Bu adımda avcılarının birbirleriyle ilişkileri modellenir. Lidere doğru hareketin ardından avcılar daha etkin avlanmak için pozisyonlarını değiştirirler.

$$I_i^{j'} \leftarrow \begin{cases} I_i^{j'} \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^{HGS}\} & \text{with probability } HGCR \\ \text{INT} (I_i^{j'} = I_i^j \pm Ra) & \text{with probability } (1 - HGCR) \end{cases} \quad (5)$$

$$Ra(it) = Ra_{\min} (I_{\max} - I_{\min}) \exp \left(\frac{\text{Ln} \left(\frac{Ra_{\max}}{Ra_{\min}} \right) it}{itm} \right) \quad (6)$$

5. Adım İterasyon prosesinin her adımında avcılarının lokal optimuma yakalanma ihtimalleri vardır. Bunu engellemek ve global optimuma ulaşma şansını artırmak amacıyla avcılar pozisyonlarını güncellerler.

$$I_i' = I_i^L \pm r (I_{\max} - I_{\min}) \alpha (-\beta (EN)) \quad (7)$$

6. Adım Bu adım iterasyon döngüsünün tamamlanma adımıdır. Süreç maksimum iterasyon sayısı kadar devam ettirildikten sonra sonlandırılır.

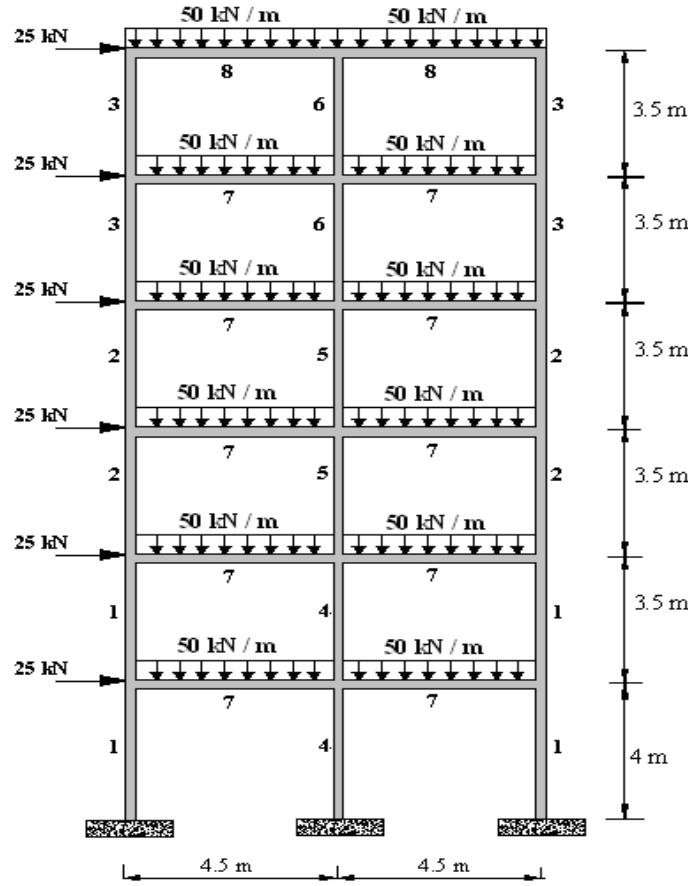
Sınırlayıcıların kontrolü

Optimizasyon işlemi içinde değişkenler için belirlenen hazır profiller kullanılarak yapı analiz edilir ve sınırlayıcıları sağlayıp sağlamadığı incelenir. Bu durumun kontrolünü literatürde en etkin sonuçları verdiği belirlenmiş olan geri dönüş (fly-back) mekanizması üstlenir [8]. Bu mekanizmaya göre ilk olarak bütün avcılar analiz edilir ve sınırlayıcıları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Eğer bunlardan bir veya birkaçı sınırların dışında sonuç veriyorsa bunlar atılır ve yerlerine yenileri üretilir ve yeniden inceleme yapılır. Eğer sınırlardan sapma çok büyük değilse bu durumda bu avcılar iterasyon süresince sınırları sağlayabilen yeni avcılar üretebileceği düşünülerek çözüm içinde tutulur. Bunu yapabilmek için avcılarının üretilmesi aşamasında hata payı büyük tutulur, avcılarının üretilmesi işlemi tamamlanıp iterasyonlara geçildikten sonra adım adım küçültülerek son değeri olan 0.001 e ulaştırılır ve bu değer ile iterasyona devam edilir.

Altı katlı- iki açıklıklı Çelik Çerçeve

Şekil 1 de gösterilen altı katlı iki açıklıklı çelik çerçeve ilk boyutlandırma örneği olarak dikkate alınmıştır. Çerçeve sekiz farklı grup altında toplanmış olan otuz adet elemandan oluşmaktadır.

Maksimum katlar arası öteleme 1.17cm ve en üst kattaki maksimum deplasman 7.17cm olarak sınırlandırılmıştır. Örnek çerçeve av arama ve parçacık küme algoritmalarıyla çözülmüştür.



Şekil 1. Altı katlı, iki açıklıklı çelik çerçeve

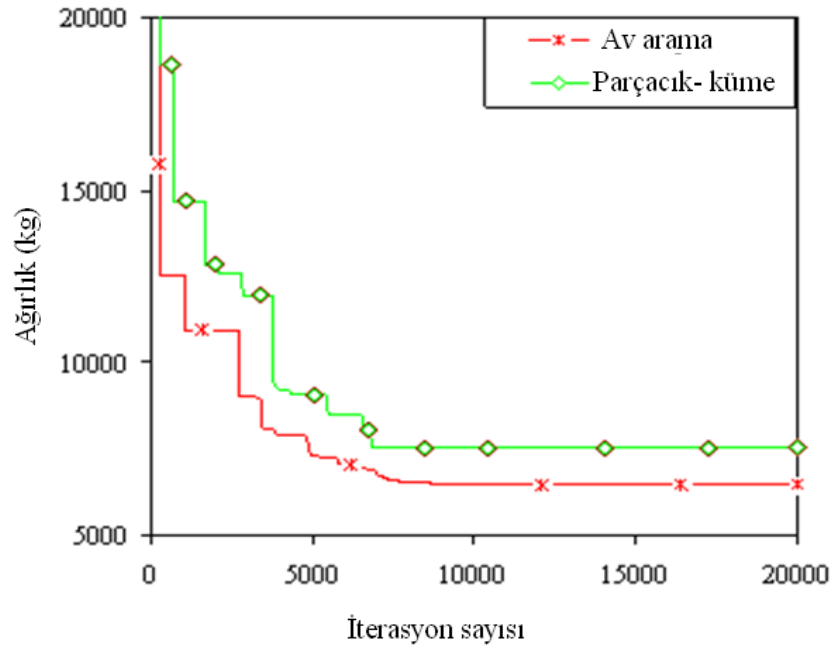
Tablo 2 de iki tekniğe ait çözümler verilmiştir. Av arama ile elde edilen sonucun parçacık-küme yöntemine göre daha hafif tasarım olduğu buradan anlaşılmaktadır. Ağırlığı 6451kg olan bu çerçeve parçacık küme algoritması elde edilene göre daha hafiftir.

Tablo 2. Altı katlı, iki açıklıklı çerçeve için optimum tasarım

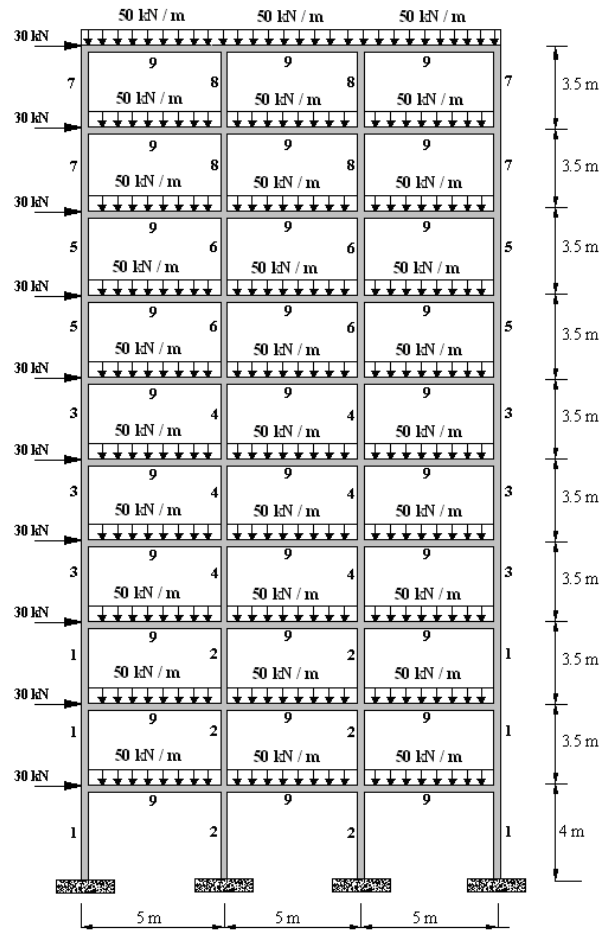
Gurup No	Eleman türü	Av arama	Parçacık-küme
1	Kolon	W24x55	W21x50
2	Kolon	W18x35	W12x35
3	Kolon	W8x24	W8x28
4	Kolon	W16x45	W18x60
5	Kolon	W16x36	W18x60
6	Kolon	W14x30	W14x48
7	Kiriş	W18x35	W18x40
8	Kiriş	W18x35	W18x46
Ağırlık (kg)		6451	7532
Maksimum analiz sayısı		9280	6890

On katlı- üç açıklıklı Çelik Çerçeve

Şekil 3. de görülen üç açıklıklı, on katlı çerçeve ikinci sayısal örnek olarak düşünülmüştür. Çerçevenin boyutları ve yüklemeler şekilde görülebilir. Çerçevenin kirişleri üzerine 50kN/m



Şekil 2. Altı katlı, iki açıklıklı çerçeve için minimum ağırlık zaman grafiği



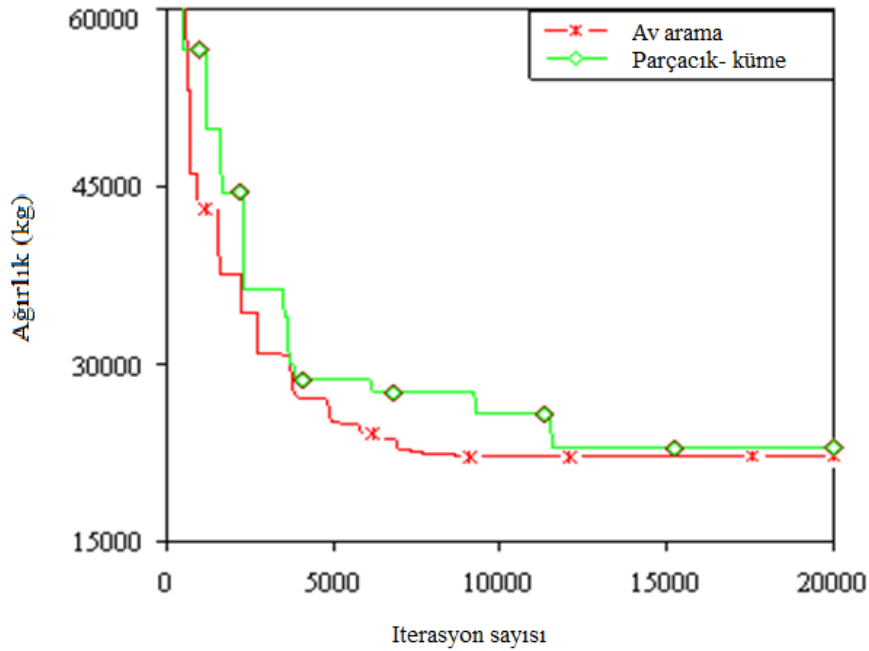
Şekil 3. On katlı, üç açıklıklı çelik çerçeve

değerinde yayılı yük ve ayrıca yatay olarak da rüzgar yükü etkimektedir. Malzeme elastisite modülü 200kN/mm² olarak kabul edilmiştir. Çerçeve 9 gruba ayrılmış 70 eleman içermektedir. Katlar arası ötelenme sınırı 1.17cm ve en üst katın maksimum yatay deplasman değeri 11.8cm olarak belirlenmiştir. Yapı elemanlarının dayanım kapasiteleri LRFD-AISC ye göre hesaplanmıştır.

Her iki metotla elde edilen optimum kesitler Tablo 3’de ve minimum ağırlık- zaman grafiği şekil 4 de verilmiştir. Av arama tekniği ile elde edilen optimum tasarım 22127kg ile hafif olanıdır. Bu ağırlık parçacık küme algoritmasıyla üretilen çerçeve ağırlığından sırasıyla 3.4% daha düşüktür. Sonuçlar göstermiştir ki katlar arası öteleme ve maksimum deplasman sınırlayıcıları sınırların çok altında seyrederken dayanım sınırlayıcıları üst sınırlarına ulaşmıştır. Bu da tasarımda dayanım sınırlayıcılarının aktif olduğunu gösterir.

Tablo 3. On katlı, üç açıklıklı çerçeve için optimum tasarım

Gurup numarası	Eleman türü	Av arama Algoritması	Parçacık küme algoritması
1	Kolon	W24x104	W24x103
2	Kolon	W24x68	W24x76
3	Kolon	W21x62	W21x62
4	Kolon	W18x50	W18x55
5	Kolon	W16x40	W12x40
6	Kolon	W14x34	W16x36
7	Kolon	W16x40	W12x40
8	Kolon	W14x34	W16x36
9	Kiriş	W21x44	W18x46
Ağırlık (kg)		22127	22879
Maksimum analiz sayısı		12370	13600



Şekil 4. On katlı, üç açıklıklı çelik çerçeve için minimum ağırlık zaman grafiği

SONUÇLAR

Bu çalışmada çelik çerçevelerin av arama optimizasyonu yöntemi tabanlı optimum boyutlandırılmasını yapan bir algoritma geliştirilmiştir. Av arama optimizasyonu yöntemi basit bir mantığa dayanmakla beraber optimizasyon problemlerinin çözümlerini bulmada oldukça etkin bir yöntemdir. Bu özelliğin doğruluğu bu çalışmada da kanıtlanmıştır. Geliştirilen optimum boyutlandırma yöntemi ile çelik çerçeveler için 272 adet W profilinden LRFD-AISC şartnamesindeki sınırlayıcıları sağlayan ve aynı zamanda çerçeveyi minimum ağırlıklı yapan kesitleri kolaylıkla seçebilmiştir. Altı ve on katlı çelik çerçeve örneklerinde av arama algoritmasının parçacık sürü metoduna göre daha hafif tasarımlar elde ettiği izlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kochenberger GA and Glover F “Handbook of Meta-Heuristics”, Kluwer Academic Publishers, 2003
- [2] Dreoj, Petrowski A, Siarry P and Taillard E, “Meta-Heuristics for Hard Optimization”, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [3] Saka MP, “Optimum Design of Steel Frames Using Stochastic Search Techniques Based on Natural Phenomena: A Review “Civil Engineering Computations: Tools and Techniques”, Ed. B. H. V. Topping, Saxe-Coburgh Publications, Chapter 6, pp: 105-147, 2007.
- [4] Bonabeau E, Dorigo M and Theraulaz G, “Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems”, Oxford University Press, U.K., 1999
- [5] Kennedy J, Eberhart R and Shi Y, “Swarm Intelligence”, Morgan Kaufmann Publishers, 2001
- [6] Oftadeh, R., Mahjoob, M.J. and Shariatpanahi, M. “A novel meta-heuristic optimization algorithm inspired by group hunting of animals: Hunting search.” Computers Mathematics with Applications, Vol. 60, pp. 2087-2098. 2010
- [7] Tasgetiren MF, Liang YC, Sevklı M, Gencyilmaz G. “Particle Swarm Optimization Algorithm for Makespan and Maximum lateness minimization in Permutation Flowshop Sequencing problem”, In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, Turkey: Sakarya; 2004. p. 431–41.
- [8] He S, Prempain E and Wu QH “An Improved Particle Swarm Optimizer for Mechanical Design Optimization Problems”, Engineering Optimization, 36, 5, 585-605, 2004.
- [9] Arumugam MS, Rao MVC, Chandramohan A, “A new and Improved Version of Particle Swarm Optimization Algorithm with Global–Local Best Parameters”, Knowl Inf. Syst. DOI 10.1007/s10115-007-0109-z.
- [10] Kennedy J, Eberhart RC, “A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm”, In Proceedings of the World Multi-Conference on Systemic, Cybernetics and Informatics. Pp: 4104-49, NJ: Piscataway; 1997.
- [11] Liu H, Shichang S, Ajith A, ”Particle Swarm Approach to Scheduling Work-Flow Applications in Distributed Data-Intensive Computing Environments”, Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'06) 0-7695-2528-8/06.
- [12] LRFD-AISC, Manual of Steel Construction, “Load and Resistance Factor Design”, Metric Conversion of the Second Edition, AISC, Vol. I&II, 1999

- [13] McGuire W, “Steel Structures”, Prentice-Hall, 1968.
- [14] Pezeshk S, Camp CV, and Chen D, “Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization.” J. Struct. Eng., 2000. 126(3), 382–388.
- [15] Saka MP, Erdal F “Harmony search based algorithm for the optimum design of grillage systems to LRFD-AISC”, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 38, pp. 25-41, March, 2009.