

Çok Katlı Kompozit Çelik Çerçevelerin Genetik Algoritma ile Dinamik Sınırlayıcı Optimizasyonu

Musa ARTAR*
Ayşe DALOĞLU**

ÖZ

Yapı sistemlerinin minimum ağırlık olacak şekilde, yani optimum boyutlandırılması, yapı mühendisliğinin temel konuları arasında yer almaktadır. Sistem elemanlarının optimizasyonu esnasında öncelik gerekli şartların sağlanmasıdır. Bu çalışmada biyolojik süreçleri taklit eden genetik algoritma kullanılarak çelik çerçeve sistemlerinin geleneksel ve dinamik sınırlayıcılar için optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Boyutlandırmada göz önünde bulundurulmuş gerekli şartlar TS648 Çelik yapıların hesap ve yapım kuralları şartnamesine uygun şekilde gerilme sınırlayıcıları olarak belirlenmiştir. Buna ilaveten yer değiştirme sınırlayıcıları kullanılmıştır. Ayrıca doğal frekanslar dinamik sınırlayıcılar olarak işleme dahil edilmiştir. Çok katlı düzlem çerçeve örnekleri optimum boyutlandırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İşlemler çerçevelerin kompozit kirişli olması durumu için tekrarlanmıştır. Tüm bu uygulamaların pratik olarak yürütülebilmesi için MATLAB[22]'de bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen program ile çerçeve sistemlere ilişkin elde edilen sonuçlar SAP2000[23] programı yardımı ile doğrulanmıştır. Kompozit kirişli çerçevelerin daha hafif olduğu ve dinamik sınırlayıcıların boyutlandırmayı etkilediği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Genetik algoritma, çelik çerçeve, dinamik sınırlayıcı, kompozit kiriş.

ABSTRACT

The Optimization of Multi-Storey Composite Steel Frames with Genetic Algorithm Including Dynamic Constraints

Optimum design of the structures, in other words designing the structures with minimum weight is one of the major research areas in structural engineering. The priority during optimization process is to ensure whether the necessary conditions are satisfied or not. In this study, the optimization of steel frame systems is carried out for traditional and dynamic constraints by using a genetic algorithm that mimics the biological processes. The stress constraints are determined according to TS648-Turkish code for design and construction of steel structures. Furthermore, displacement constraints are considered in the optimization procedure. In addition, natural frequencies are incorporated as dynamic constraints.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28.02.2014 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Bayburt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt - martar@bayburt.edu.tr

** Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - aysed@ktu.edu.tr

Optimum design of multi-story plane frames is obtained and comparisons with the results of previous studies are made. The same design processes are repeated for the case of frames with composite beams. A program is coded in MATLAB to carry out all these applications. Results obtained in the study for the frame systems are also verified by SAP2000. It is concluded that the weight of the frames with composite beams are fewer and the dynamic constraints affect the design.

Keywords: Genetic algorithm, steel frame, dynamic constraint, composite beam.

1.GİRİŞ

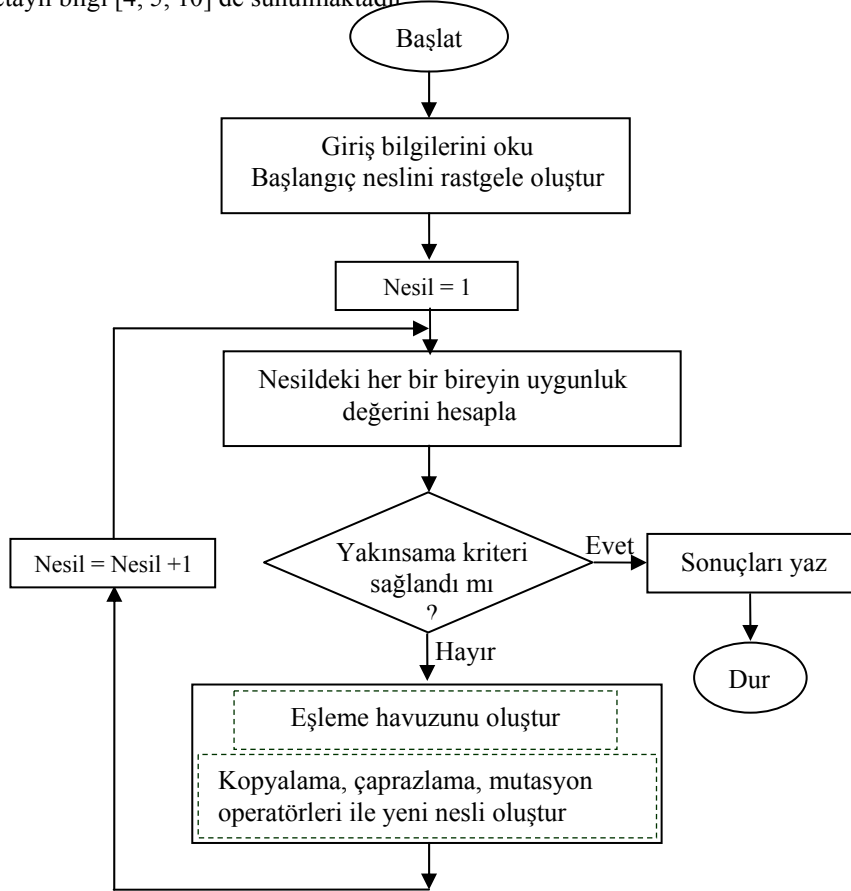
Nüfusu sürekli artan ve gelişen dünyamızda hammadde ihtiyacı her geçen gün önemle artmaktadır. Önemli yapı malzemelerinden biri olan çelik birçok mühendislik dalında kullanıldığı gibi yapı mühendisliğinde de sıkça kullanılmaktadır. Çelik malzemesinin asgari kullanımı ile yapı modelleme, üzerinde oldukça araştırmalar yapılan bir konudur.

Genetik algoritma (GA) doğal biyolojik süreçleri taklit ederek sonuca ulaşan bir optimizasyon yöntemidir ve Goldberg [1] tarafından ortaya atılmıştır. Ayırık tasarım değişkenli problemlere çok rahat uygulanması, istatistik kullanılarak tekrarlı işlemlerle sonuca ulaşılması ve türev bilgisi gerektirmemesi gibi nedenlerle diğer birçok alanda olduğu gibi yapı mühendisliğinde de oldukça fazla ilgi görmüştür. Rajeev ve Krishnamoorthy [2] GA yardımıyla yapı optimizasyonunu araştırmışlardır. Saka [3] çeşitli çelik çerçeve sistemler ele alarak stabilite sınırlayıcıları altında optimum boyutlandırmalar yapmıştır. Aydın ve Daloğlu [4], kafes sistemlerin optimum tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Daloğlu ve Armutcu [5] düzlem çelik çerçevelerin genetik algoritma kullanarak optimum tasarımını irdelemişlerdir. Salajegheh [6], çelik uzay çerçeve sistemlerde frekans sınırlayıcı optimum tasarım üzerine araştırmalar yapmıştır. Sergeev ve Mroz [7] çelik uzay çerçeve sistemlerde gerilme ve frekans sınırlayıcılar altında optimum boyutlandırma çalışmışlardır. Isenber ve diğ. [8], çok katlı çelik çerçeve sistemlerinin optimum dizaynını araştırmışlardır. Togan ve Daloğlu [9], 3D kafes sistemlerin şekil ve boyut optimizasyonu çalışmışlardır. Değertekin ve diğ. [10] uzay çelik çerçevelerin tabu arama ve GA yöntemleriyle optimum tasarımını araştırmışlardır. Aydoğdu ve Saka [11] karınca kolonisi metodunu kullanarak düzensiz çerçeve sistemlerde optimum boyutlandırma çalışmışlardır. Erdoğan [12] GA kullanarak sonlu elemanlar güncellenmesi yöntemiyle hasar tespiti araştırmıştır. Saka [13] çelik çerçeve sistemleri farklı algoritmalar ile İngiliz standardı BS5950'ye göre boyutlandırmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Togan [14] düzlem çerçevelerin optimum tasarımını araştırmıştır.

Bu çalışmada GA kullanılarak çelik çerçevelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çok katlı çelik çerçeve sistemler ele alınmıştır. Sistemde geleneksel sınırlayıcılar ile TS648'de belirtilen kriterlere göre iki kez optimum boyutlandırılmıştır. İkinci adımda kiriş elemanlar üzerlerindeki beton plaklar ile birlikte kompozit kesit olarak düşünülmüştür. Kompozit kirişli çerçeve sistem daha sonra, geleneksel sınırlayıcılarının yanı sıra dinamik sınırlayıcılar olarak ilk üç doğal frekans değerleri ile tekrar boyutlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar SAP2000 ile de kontrol edilerek doğrulanmıştır.

2. GENETİK ALGORİTMA

GA biyolojik süreçleri içeren bir algoritma olup akış diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir. Buna göre GA, rastgele bir nesil ile başlamakta, sistem analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yürütülmekte ve bulunan analiz sonuçlarının sınırlayıcılara uygunluğu tespit edilmektedir. Bundan sonra kötü bireyler o nesilden çıkarılmakta, yerlerine en iyi bireylerden kopyalanmaktadır. Daha sonra bireyler rastgele eşleştirilerek çaprazlanmakta ve sonrasında mutasyon operatörü uygulanmaktadır. Bu çalışmada çift noktalı çaprazlama kullanılmış ve mutasyon işlemi önceden belirlenmiş bir olasılıkla uygulanmıştır. Bu konuda detaylı bilgi [4, 5, 10] de sunulmaktadır.



Şekil 1. GA akış diyagramı

3. OPTİMUM TASARIM PROBLEMİ

Yapı ağırlığının minimum olmasının hedeflendiği bir optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu denklem (1)'de verilmektedir [4].

$$\min W(x) = \sum_{k=1}^{ng} A_k \sum_{i=1}^{nm} \rho_i L_i \quad (1)$$

Burada $W(x)$ çerçeve ağırlığını, k sistemdeki eleman gruplarının sayısını, A_k k grubuna ait elemanların kesit alanlarını, ng sistemdeki toplam grup sayısını, nm sistemdeki toplam eleman sayısını, ρ_i , L_i i inci çubuğun yoğunluğu ve boyunu göstermektedir. Optimum tasarımda geleneksel ve dinamik sınırlayıcılara yer verilmiştir. Geleneksel sınırlayıcılar olarak tanımlanan deplasman ve gerilme sınırlayıcıları yapının önceden tanımlanan belirli bir değerden fazla deplasman oluşmayacak şekilde boyutlandırılmasını ve belirtilen yükler altında yapıda uygun bir gerilme düzeyi sağlanmasını amaçlamaktadır. Dinamik sınırlayıcılar ise titreşim hareketlerinde rezonans durumlarından kaçınmak için yapının frekansını dolayısıyla periyodunu kontrol altında tutarak uygun bir yapısal davranışı hedeflemektedir.

3.1. Geleneksel Sınırlayıcılar

Gerilme, stabilite ve deplasman gibi yapı optimizasyonunda geleneksel olarak kullanılan sınırlayıcılar TS 648 - Çelik yapıların hesap ve yapım kuralları, [16] standardına göre uygulanmıştır. Çerçeve kolonları aksel basınç ve eğilmeye çalışan çubuklardır ve narinliğe bağlı olarak stabilite ve gerilme kontrolleri yapılmaktadır. Çerçeve kirişlerinin de aynı şekilde gerilme ve stabilite yani yanal burkulma denetimleri gerçekleştirilmektedir. Deplasman sınırlayıcıları yine izin verilen maksimum değerler ile karşılaştırılarak uygulanmıştır.

Bu çalışmada, yapı optimizasyonu problemi için kullanılan geleneksel sınırlayıcılara ilişkin denklemler şöyledir;

- Deplasman sınırlayıcıları:

$$g_j = \frac{\delta_j}{\delta_{ju}} - 1 \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

Burada δ_j j noktasının deplasmanı, δ_{ju} ilgili deplasmanın alabileceği üst sınırdır, p yer değiştirmesi sınırlanmış düğüm noktası sayısını göstermektedir.

- Gerilme sınırlayıcıları [16]:

Çekme çubukları için;

$$g_i = \frac{\sigma_e}{\sigma_{em}} - 1 \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, nm \quad (3)$$

Eksenel basınç yüklü çubuklar için;

$$g_i = \frac{\sigma_{eb,i}}{\sigma_{bem,i}} - 1 \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, nm \quad (4)$$

şeklinde. Yukarıdaki ifadelerde σ_{eb} basınç çubuğundaki gerilme, σ_{bem} ise basınç çubuğunda narınlığına bağlı olarak hesaplanan basınç emniyet gerilmesidir. Çerçeve kolonları gibi aksel basınç ve eğilmeye çalışan çubuklar için ise

$$g_i = \frac{\sigma_{eb,i}}{\sigma_{bem,i}} + \frac{C_{m,i}\sigma_{b,i}}{\left(1.0 - \frac{\sigma_{eb,i}}{\sigma_{e,i}}\right)\sigma_{B,i}} - 1 \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (5)$$

$$g_m = \frac{\sigma_{eb,m}}{0.6\sigma_a} + \frac{\sigma_{b,m}}{\sigma_{B,m}} - 1 \leq 0 \quad m = 1, 2, \dots, nb \quad (6)$$

şeklini almaktadır. Eğer

$$\frac{\sigma_{eb,i}}{\sigma_{bem,i}} \leq 0.15 \text{ ise}$$

yukarıda ki bağıntılar yerine

$$g_i = \frac{\sigma_{eb,i}}{\sigma_{bem,i}} + \frac{\sigma_{b,i}}{\sigma_{B,i}} - 1 \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (7)$$

ifadesinin sağlanması yeterlidir [16]. Yukarıdaki ifadelerde σ_{eb} hesap edilen aksel basınç gerilmesi, σ_b sadece eğilmekten elde edilen gerilme, σ_{bem} aksel basınç emniyet gerilmesi, σ_B kiriş elemanların yanal burkulmaya karşı basınç emniyet gerilmesi, σ_e Euler kritik burkulma gerilmesi, C_m uç ve açıklık momentleri ile yanal desteklemeyi göz önüne alan bir katsayıdır ve yanal deplasmanın mümkün olduğu çerçevelerde 0.85 alınmaktadır, nb hem aksel basınca hem de eğilmeye çalışan çubuk sayısını göstermektedir. Çubukların burkulma boyu gerçek çubuk boyunun K etkili kolon uzunluk faktörü (burkulma boyu katsayısı) ile çarpılarak bulunur. Yanal deplasmanın mümkün olduğu çerçevelerde K değeri denklem (8)'de verilen bağıntı ile bulunmaktadır [21]. Bu bağıntı birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [10,14].

$$K = \sqrt{\frac{1.6G_A G_B + 4.0(G_A + G_B) + 7.50}{G_A + G_B + 7.50}} \quad (8)$$

Bu bağıntıda K etkili kolon uzunluk faktörüdür. G_A ve G_B kolonların üst ve alt uçları için rijitlik dağıtım faktörleridir ve aşağıdaki bağıntılar ile elde edilmektedir.

$$G_A = \left(\frac{\sum I_c / s_c}{\sum I_g / s_g} \right); \quad G_B = \left(\frac{\sum I'_c / s'_c}{\sum I'_g / s'_g} \right) \quad (9)$$

Bu bağınıtıda I_c ve I'_c ele alınan kolonun üst ve alt ucuna bağı kolonların atalet momentlerini, I_g ve I'_g ele alınan kolonun üst ve alt ucuna bağı kirişlerin atalet momentlerini, s_c ve s'_c ele alınan kolonun üst ve alt ucuna bağı kolonların boyunu, s_g ve s'_g ele alınan kolonun üst ve alt ucuna bağı kirişlerin boyunu ifade etmektedir. Bu çalışmada ele alınan tüm örneklerde ankastre mesnet kullanılmakta olup $G_i=1$ olarak alınmıştır. Optimum tasarım algoritmasına ilişkin diğ er formüller aşağıda sıralanmaktadır.

$$g_i(x) > 0 \text{ ise } c_i = g_i(x)$$

$$g_i(x) \leq 0 \text{ ise } c_i = 0$$

$$C = \sum_{i=1}^m c_i$$

Burada C toplam ihlal değerini, c_i sınırlayıcıların ihlal edilme katsayısını ve m toplam sınırlayıcı sayısını göstermektedir. Buna göre cezalandırılmış amaç fonksiyonu aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\varphi(x) = W(x)(1 + P \times C) \quad (10)$$

Bu denklemde P fonksiyona bağı olarak belirlenen sabit olup bu çalışmada 10 alınmıştır [4, 5, 10]. Buna bağı olarak uygunluk bağıntısı F_i ve uyum faktörü $F_{c,i}$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_i = (\varphi(x)_{max} + \varphi(x)_{min}) - \varphi(x) \quad (11)$$

$$F_{c,i} = \frac{F_i}{F_{ort}} \quad (12)$$

Burada F_{ort} topluluğun ortalama uygunluğudur. Popülasyondaki her bireyin sahip olduğ uyum değerine göre nesilden çıkarılıp çıkarılmayacağı belirlenir.

3.2. Dinamik Sınırlayıcılar

Bu çalışmada dinamik sınırlayıcıların optimizasyonu ne derece etkilediği araştırılmak istenmiştir. Bu amaçla optimizasyon sürecinde geleneksel sınırlayıcıların yanı sıra dinamik sınırlayıcılar da işleme dahil edilmiştir. Yapının doğal frekansı sınırlandırılarak dolayısıyla yapının periyodu sınırlandırılmaya çalışılmıştır. Bunun için optimizasyon süresince çerçeve sistemlerin doğal frekans değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, MATLAB'da hazırlanan program yardımıyla çerçeve sistemdeki her çubuk elemanın sonlu elemanlar yöntemi ile lokal rijitlik ve kütle matrisleri hesaplandıktan sonra tüm çerçeve sisteme ait global rijitlik ve kütle matrisleri belirlenmektedir. K_g ve M_g yapının global rijitlik ve kütle matrislerini göstermek üzere (13) denklemi MATLAB program dilinde $\text{eig}(K_g, M_g)$ komutuyla çözümlenerek yapının özdeğerleri elde edilerek (14) ifadeleri yardımıyla yapıya ait doğal frekans değerlerine ulaşılmaktadır [17].

$$[K_g - \lambda_i M_g] \varphi_i = 0 \quad (13)$$

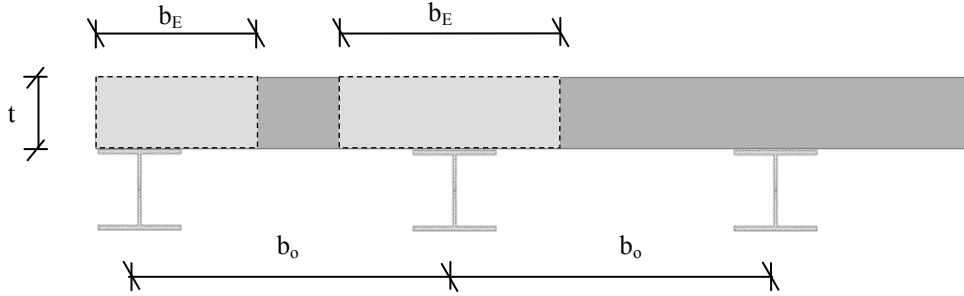
$$\lambda_i = \omega_i^2 ; T_i = 2\pi/\omega_i ; f_i = 1/T_i \quad (14)$$

Burada λ_i ve φ_i sırasıyla yapının özdeğerleri(eigenvalue) ve özvektörleri, ω_i Yapının i . açısal titreşim frekansı (rad/s); T_i yapının i . titreşim periyodu (s); f_i yapının i . titreşim frekansını (Hertz) göstermektedir. Bu çalışmada, literatürde bulunan birçok çalışmada olduğu gibi [6,7] ilk üç moda ait doğal frekans değerleri dinamik sınırlayıcılar olarak alınmıştır.

$$f_1 > f_{1, \text{sınır değer}} ; f_2 > f_{2, \text{sınır değer}} ; f_3 > f_{3, \text{sınır değer}} \quad (15)$$

4. KOMPOZİT KİRİŞ

Kiriş profilin üzerindeki beton plak hesaba dahil edilerek kirişin basınç başlığında bulunan betonun basınç dayanımından yararlanılması ve dolayısıyla daha hafif çerçeve elde edilmesi düşünülmüştür. Kompozit kiriş kesit hesaplanmasında öncelikle etkili genişliğin belirlenmesi gerekir. Şekil 2'de gösterilen etkili genişlik b_E , (16) veya (17) denklemlerindeki ifadelerden elde edilir [18].



Şekil 2. Kompozit kiriş etkili genişliği

İç kiriş için;

$$\begin{aligned} b_E &\leq \frac{L}{4} \\ b_E &\leq b_0 \\ b_E &\leq b_f + 16t_s \end{aligned} \quad (16)$$

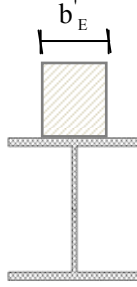
Dış kiriş için;

$$\begin{aligned} b_E &\leq \frac{L}{12} + b_f \\ b_E &\leq \frac{1}{2}(b_0 + b_f) \\ b_E &\leq b_f + 6t_s \end{aligned} \quad (17)$$

Burada L kiriş açıklığı; b_f kiriş profilinin başlık genişliği; b_0 çelik kiriş aralığı, t_s beton plak kalınlığı olup b_E etkili genişliği belirlenmektedir. Daha sonra bu etkili beton alanı (18) denklemindeki gibi beton plağın elastisite modülü E_c 'nin çelik profilin elastisite modülü E_s 'ye oranı ile çarpılarak eşdeğer çelik alanına dönüştürülmüş tabla genişliği b'_E belirlenmektedir [18,19].

$$b'_E = b_E \frac{E_c}{E_s} \quad (18)$$

Dönüşümden sonra etkili genişlik Şekil 3'de gösterilmiştir.



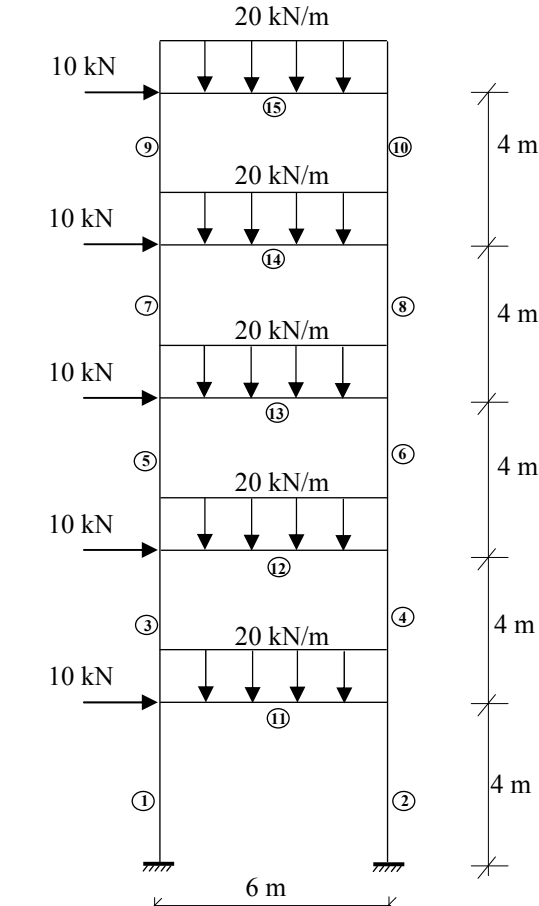
Şekil 3. Kompozit kiriş kesitindeki eşdeğer çelik alanına dönüştürülmüş tabla genişliği

5. SAYISAL ÖRNEKLER

Bu çalışmada üç farklı çerçeve örneği ele alınmıştır. İkinci örnekteki sistem, Saka [3], Daloglu ve Armutçu[5] ve Bekiroğlu [15] tarafından ve üçüncü örnekteki sistem ise Saka [3] ve Armutçu[20] tarafından geleneksel sınırlayıcılar ile boyutlandırılmıştır. Bu çalışmada, her üç çerçeve sistemde geleneksel sınırlayıcılar ile ve TS648'de belirtilen kriterlere göre iki kez optimum boyutlandırılmıştır. İkinci boyutlandırmada kiriş elemanlar üzerindeki 10 cm kalınlığında ve elastisite modülü $E_{\text{betonplak}}=3000 \text{ kN/cm}^2$ olan beton plaklar ile birlikte kompozit kesit olarak düşünülmüştür. Kompozit kirişli çerçeve sistem daha sonra, geleneksel sınırlayıcılarının yanı sıra yapının ilk üç doğal frekans değerleri dinamik sınırlayıcılar olarak dikkate alınıp tekrar boyutlandırılarak üçüncü kez optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tüm analizlerde popülasyon büyüklüğü 20 (birey), çaprazlama olasılığı 0.95 ve mutasyon olasılığı 0.01 olarak alınmıştır. Analizler, topluluktaki bireylerin %75'i aynı oluncaya kadar devam ettirilmektedir. Ele alınan literatür örneklerinde sonuçlar kesit alanları ile verildiği için bu çalışmada da elde edilen sonuçlar

tablolarda kesit alanı ve altında profil kesit ile sunulmaktadır. Ayrıca her üç örneğe ait çözümlerde MATLAB ile elde edilen çubuk boyutlarına göre yapılan SAP2000 analizleri ile MATLAB ile bulunan iç kuvvetler (kesme, normal ve moment), yer değiştirme ve doğal frekans değerleri doğrulanmıştır.

5.1. Tek Açıklıklı Beş Katlı Çerçeve



Şekil 4. Beş katlı tek açıklıklı çelik çerçeve sistem

İlk olarak tek açıklıklı beş katlı bir çerçeve sistem seçilmiştir. Burada akma ve emniyet gerilmeleri sırasıyla $\sigma_a=24 \text{ kN/cm}^2$ ve $\sigma_{em}=14 \text{ kN/cm}^2$ olan ST37 ile çalışılmıştır. Elastisite modülü $E=20000 \text{ kN/cm}^2$, çerçevede en üst katta izin verilen maksimum yatay yer değiştirme değeri H yapı yüksekliğini göstermek üzere $H/500$ (4 cm) dir. Yapıya ait geometrik özellikler ve yükleme durumu Şekil 4’de gösterilmektedir. Optimum boyutlandırma için 16 adet HEA (HE120A, HE140A, HE160A, HE180A, HE200A, HE220A, HE240A, HE260A, HE280A, HE300A, HE320A, HE340A, HE360A, HE400A,

HE450A, HE500A) ve 16 adet IPE (IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240, IPE270, IPE300, IPE330, IPE360, IPE400, IPE450, IPE500, IPE550, IPE600) olmak üzere toplam 32 adet profil kullanılmıştır.

Sistem öncelikle TS648'deki kriterlere uygun olarak geleneksel sınırlayıcılar olarak adlandırılan gerilme, stabilite ve izin verilebilen maksimum deplasman sınırlayıcıları için optimum boyutlandırılmış, ve elde edilen sonuçlar Tablo 1, ikinci satırda gösterilmektedir. İkinci adımda kompozit kiriş kesitli olarak geleneksel sınırlayıcılara göre optimum boyutlandırma gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 1'in 3. satırında verilmiştir. Son olarak kompozit kiriş kesitli sistem olarak geleneksel ve ilk üç moda ait doğal frekans değerleri sınırlandırılarak dinamik sınırlayıcılara göre optimum boyutlandırılmış ve elde edilen değerler Tablo 1'in son satırında gösterilmektedir. Ayrıca GA ile her üç çözüme ilişkin toplam ağırlığın iterasyon adımlarına göre değişimleri Şekil 5'de verilmektedir.

Tablo 1. GA ile optimizasyon sonuçları

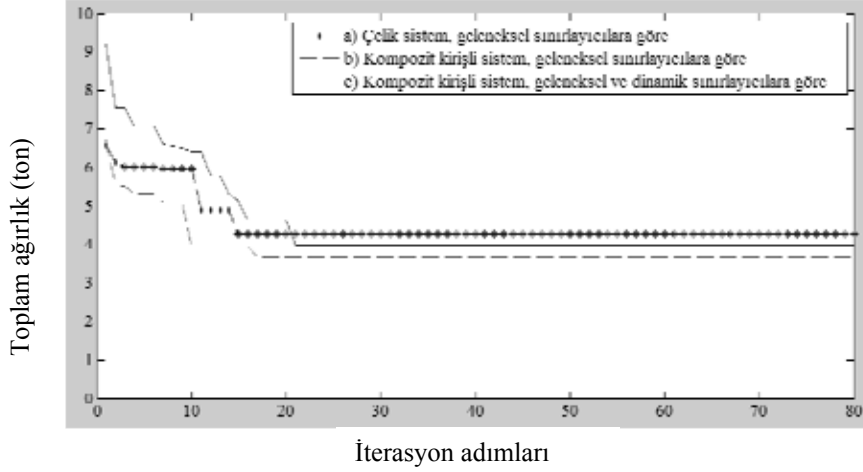
Çelik Türü St37	Kolon No 1-6 A ₁ (cm ²)	Kolon No 7-10 A ₂ (cm ²)	Kiriş No 11-15 A ₃ (cm ²)	Toplam Ağırlık (Ton)	Maks Yerd. (cm)	İlk üç doğal frekans (Hz)
a) Çelik çerçeve, geleneksel sınırlayıcılar	72.7 (IPE360)	45.9 (IPE270)	98.8 (IPE450)	4.27	3.31	-
b) Kompozit kirişli sistem, geleneksel sınırlayıcılar	72.7 (IPE360)	45.9 (IPE270)	72.7 (IPE360)	3.66	3.07	2.43 6.48 11.40
c) Kompozit kirişli sistem, geleneksel ve dinamik sınırlayıcılar	84.50 (IPE400)	53.8 (IPE300)	72.7 (IPE360)	3.98	2.51	2.65 7.26 13.00

*Not: Kompozit kirişli çerçeve analizlerinde beton kütle dinamik analize dahil edilmiştir.

Tablo 1'deki sonuçlar karşılaştırıldığında kirişlerin kompozit kesitli olarak hesaba dahil edilmesi ile kiriş elemanın boyutunun IPE450'den IPE360'a düştüğü ve bunun sistemin toplam ağırlıkta yaklaşık %7.3 azalmayı sağladığı görülmektedir. İlk boyutlandırmada en büyük yanal deplasman değeri 3.31 cm iken kompozit kesit dikkate alınarak yapılan ikinci boyutlandırmada kiriş kesitin azalmasının yanı sıra maksimum yanal deplasman değerinin de 3.07 cm'ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca her iki boyutlandırmada birleşik gerilme sınırlayıcılarının aktif rol oynadığı görülmektedir.

Üçüncü olarak yapılan boyutlandırmada dinamik sınırlayıcılar olarak doğal frekans değerleri aşağıda verildiği gibi sınırlandırılmıştır.

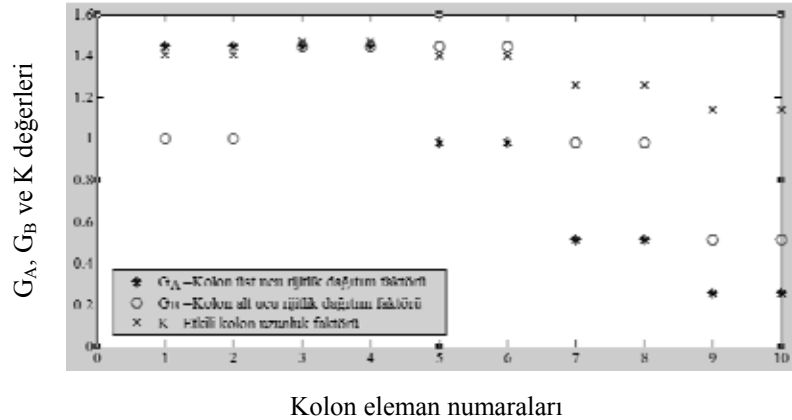
- 1.doğal frekans değeri> 2.5 (Hz)
- 2.doğal frekans değeri> 6.5 (Hz)
- 3.doğal frekans değeri> 11.45(Hz)



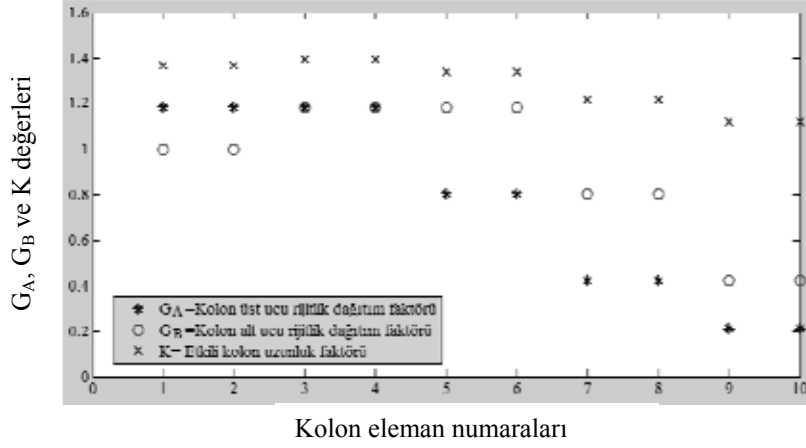
Şekil 5. Toplam ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi

Buna göre elde edilen optimum boyutlandırma sonuçları diğer durumlar için elde edilenlerle karşılaştırıldığında ilk üç doğal frekans değerleri için sınırlayıcıların ilavesi ile sistem elemanlarının boyutlandırılmasında geleneksel sınırlayıcılarının yanı sıra dinamik sınırlayıcıların da sağlanması için kolon elemanlarının boyutlarında önemli ölçüde artışlar meydana gelmek suretiyle toplam ağırlığın 3.66 ton'dan 3.98 ton'a yükseldiği ve en büyük yanal deplasman değerinin de kolon boyutlarının büyümesine bağlı olarak 2.51 cm'ye düştüğü görülmektedir.

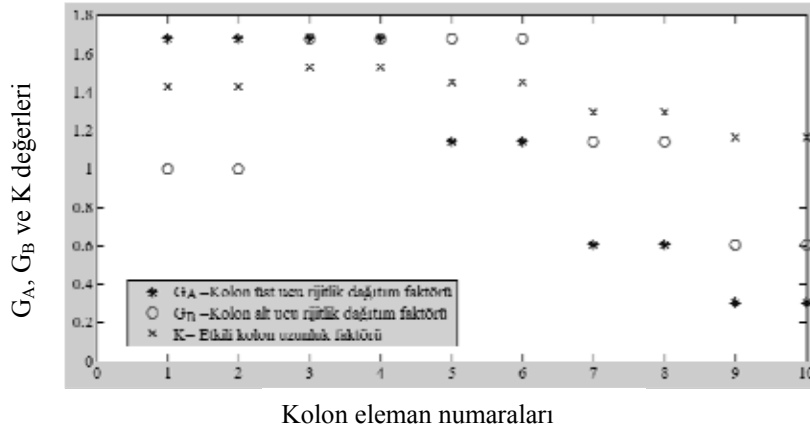
Ayrıca, bu çalışmada algoritmaya dahil edilerek kullanılan (8) denklemindeki K etkili kolon uzunluk faktörü formülü [21] ile her üç boyutlandırmada kolon elemanlarının G_A , G_B 'ye bağlı olarak elde edilen K değerleri Şekil 6a, 6b ve 6c de sunulmaktadır.



Şekil 6a. Çelik çerçevenin geleneksel sınırlayıcılara göre optimum boyutlandırmasında kolonların G_A , G_B ve K değerleri



Şekil 6b. Kompozit kirişli sistemin geleneksel sınırlayıcılara göre optimum boyutlandırmasında kolonlardaki G_A , G_B ve K değerleri



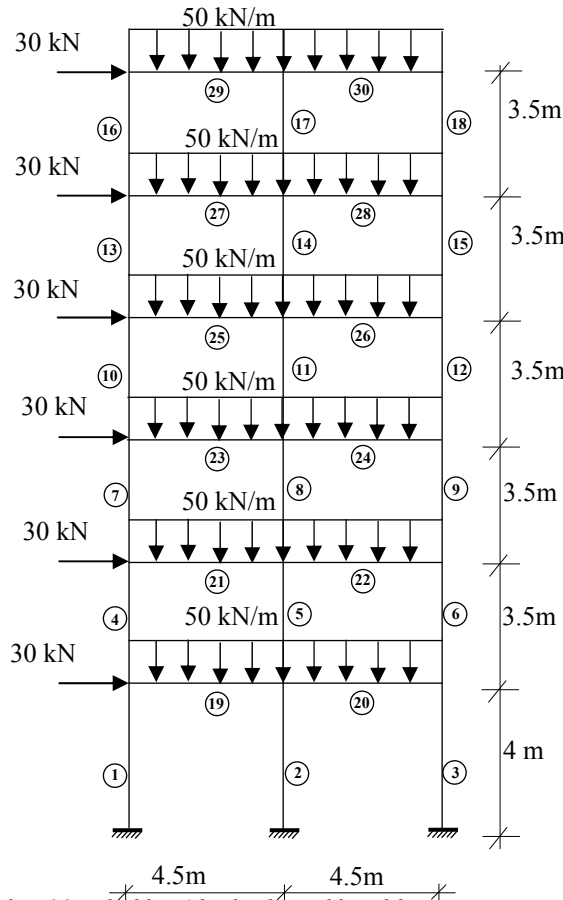
Şekil 6c. Kompozit kirişli sistemin geleneksel ve dinamik sınırlayıcılara göre optimum boyutlandırmasında kolonlardaki G_A , G_B ve K değerleri

Şekil 6a, 6b ve 6c'de sunulan ve (8) denklemi ile elde edilen K değerleri TS 648 de yer alan ötelenmesi önlenmemiş basınç çubuklarında burkulma boyunun kullanılan K değerinin belirlendiği çizelge ile kontrol edilerek (8) denkleminin düzlem çelik çerçevelerde geçerliliğini göstermektedir.

5.2. Altı Katlı, İki Açıklıklı Çerçeve

İki açıklıklı altı katlı ve 30 elemanlı çerçeve sistem daha önce Saka [3], Daloglu ve Armutçu[5] ve Bekiroğlu [15] tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada alınan tasarım parametreleri Saka [3] ve Daloglu ve Armutçu [5]'nin çalışmalarında kullandıkları gibi

St37 çeliği ve elastisite modülü $E=21000 \text{ kN/cm}^2$ dir. Çerçeve en üst katta izin verilen maksimum yatay yer değiştirme $7.16 (H/300) \text{ cm}$ dir. Etkili kolon uzunluk faktörü, K , değeri Saka [3] ve Daloglu ve Armutçu [5]'nin çalışmalarında sabit olarak 1.2 alınmıştır. Bu çalışmada ise K değerleri her kolon eleman için (8) denklemi ile hesaplanarak boyutlandırmalar yapılmıştır. Yapıya ait geometrik özellikler ve yükleme durumu Şekil 7'de gösterilmektedir. Optimum boyutlandırma sürecinde enkesitler ilk örnekte kullanılan 32 adet profil arasından seçilmiştir. Örnek, MATLAB'da hazırlanan program yardımı ile her üç durum için; a) çelik sistem-geleneksel sınırlayıcılar, b) kompozit kirişli sistem-geleneksel sınırlayıcılar, c) kompozit kirişli sistem-geleneksel ve dinamik sınırlayıcılar, çözümlenerek, elde edilen çubuk boyutları ve analiz sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.



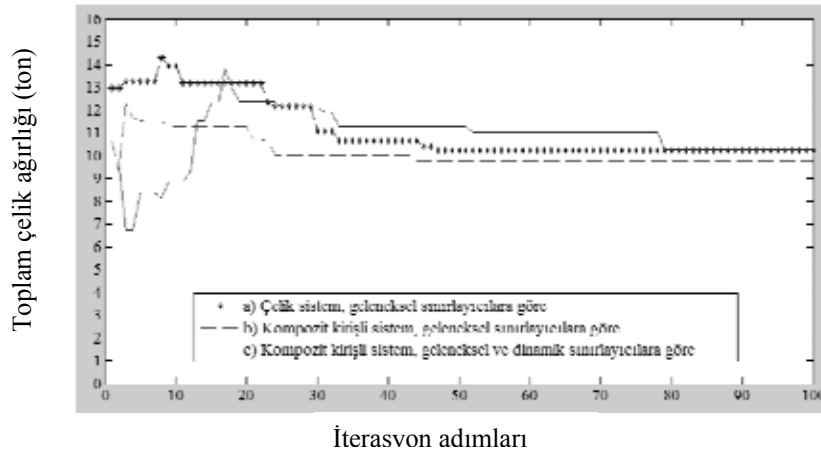
Şekil 7. 30 çubuklu, 6 katlı, iki açıklıklı çelik çerçeve sistem

Genetik algoritma ile her üç farklı çözüme ilişkin toplam çelik ağırlığının iterasyon adımlarına göre değişimleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Ayrıca her üç farklı boyutlandırmada bulunan kolon çubukların (8) denklemi ile hesaplanan K etkili kolon uzunluk faktörü değerleri Şekil 9'da gösterilmektedir.

Tablo 2’de Saka [3] tarafından optimumluk kriteri yöntemi ile yapılmış boyutlandırma sonuçları ve Daloglu ve Armutçu [5] tarafından GA ile elde edilmiş iki farklı boyutlandırma (GA-I ve GA-II) sonuçları sunulmaktadır. Bu çalışmada, çelik sistemin geleneksel sınırlayıcılara göre yapılan boyutlandırma sonuçları Saka [3]’ya ait sonuçlar ile oldukça benzer, Daloglu ve Armutçu [5]’ya ait sonuçlara oldukça yakın olmakla beraber toplam çelik ağırlığı bakımından yaklaşık %12 daha hafif olduğu görülmektedir. Kirişlerin kompozit kesitli olarak hesaba dahil edilerek geleneksel sınırlayıcılara göre yapılan boyutlandırmada ise kolon boyutlarının küçüldüğü ve toplam çelik ağırlığının yaklaşık %4.7 azalarak 9.75 ton’a düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni, Şekil 9’da gösterildiği gibi kirişlerin üzerlerindeki beton plaklar ile hesaba dahil edilmesi ile K etkili kolon uzunluk faktörü değerlerinde önemli ölçüde azalmalar meydana gelmesidir. Bununla birlikte Şekil 9’da görüldüğü gibi bu çalışmada (8) denkleminde belirlenen K değerlerinin büyük çoğunluğu Saka [3] ve Daloglu ve Armutçu [5]’nin çalışmalarında aldıkları 1.2 sabit değerinden büyüktür. Bu durum Bekiroğlu [15]’nin çalışmasında da tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada yapılan her iki boyutlandırmada da birleşik gerilme sınırlayıcıları aktif rol oynamaktadır. Çerçeve, dinamik sınırlayıcılar olarak doğal frekans değerleri aşağıda verildiği gibi sınırlandırılarak bir kez daha optimum boyutlandırılmıştır.

- 1.doğal frekans değeri > 3.95 (Hz)
- 2.doğal frekans değeri > 10.65 (Hz)
- 3.doğal frekans değeri > 18.55 (Hz)

Tablo 2’de sunulan kompozit kesitli sistemin, geleneksel ve dinamik sınırlayıcılar ile yapılan boyutlandırma sonuçlarına göre geleneksel sınırlayıcılarının yanı sıra dinamik sınırlayıcıların da sağlanması için sistem elemanlarının boyutlarında artışlar meydana gelmek suretiyle toplam ağırlığın %5 artarak 10.27 ton olduğu görülmektedir. Buna göre frekans değerlerinde ki küçük artışların yapının toplam ağırlığında büyük artışa neden olduğu görülmektedir.

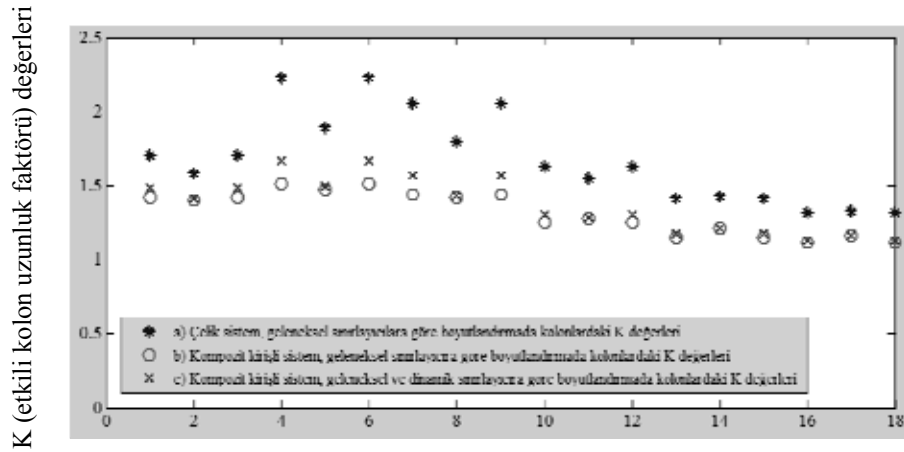


Şekil 8. Ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi

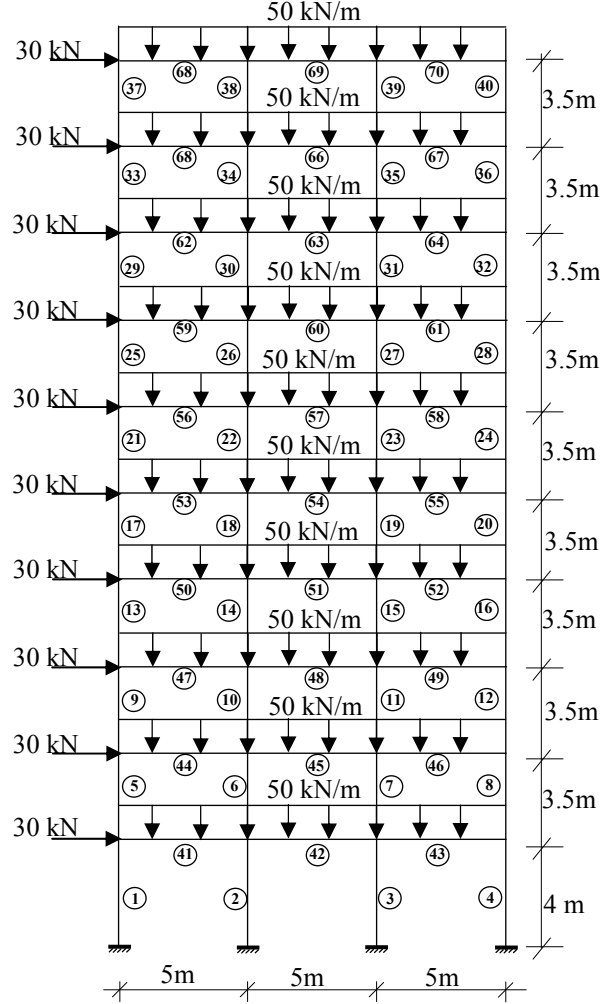
Tablo 2. GA ile optimizasyon sonuçları

Çelik Türü St37	Kolon No 1,3,4, 6,7,9 A ₁ (cm ²)	Kolon No 2,5,8 A ₂ (cm ²)	Kolon No 10,12,13 15,16,18 A ₃ (cm ²)	Kolon No 11,14,17 A ₄ (cm ²)	Kiriş No 19-30 A ₅ (cm ²)	Toplam Ağırlık (Ton)	İlk üç doğal frek. değ. (Hz)	
Dalglu ve Armutçu[5], GA-I	131.00	254.00	91.00	131.00	116.00	11.94	-	
Dalglu ve Armutçu[5], GA-II	156.0	254.0	84.5	134.00	98.8	11.56	-	
Saka [3] Optimumluk kriteri y.	119.67	203.3	74.15	92.51	104.42	10.23	-	
Bu Çalışma	a)Çelik çerçeve, Geleneksel sınırlayıcılar	134.00 (IPE550)	198.00 (HE500A)	72.70 (IPE360)	98.80 (IPE450)	98.80 (IPE450)	10.23	-
	b)Kompozit kesitli sistem, Geleneksel sınırlayıcılar	116.00 (IPE500)	198.00 (HE500A)	62.60 (IPE330)	98.80 (IPE450)	98.80 (IPE450)	9.75	3.89 10.58 18.45
	c) Kompozit kesitli sistem, Geleneksel ve Dinamik sınırlayıcılar	134.00 (IPE550)	156.00 (IPE600)	97.30 (HE280A)	98.8 (IPE450)	98.80 (IPE450)	10.27	3.99 11.01 18.91

*Not: Kompozit kirişli analizlerde beton kütle dinamik analize dahil edilmiştir.



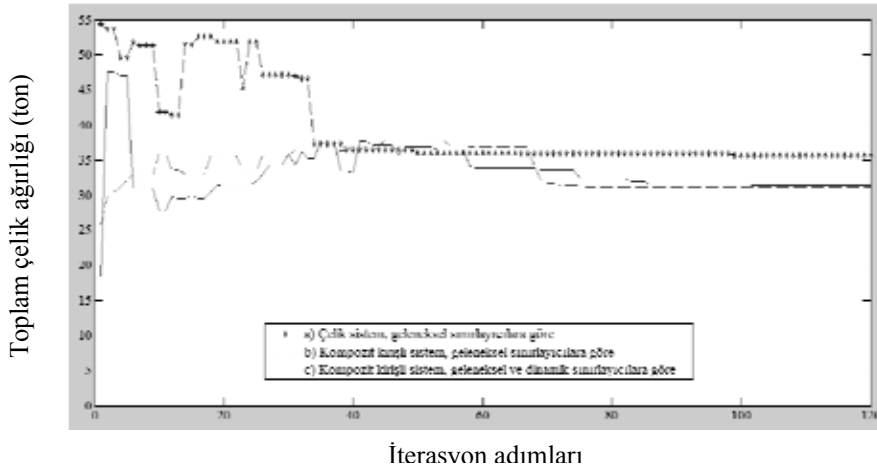
5.3. On Katlı, Üç Açıklıklı Çelik Çerçeve Sistem



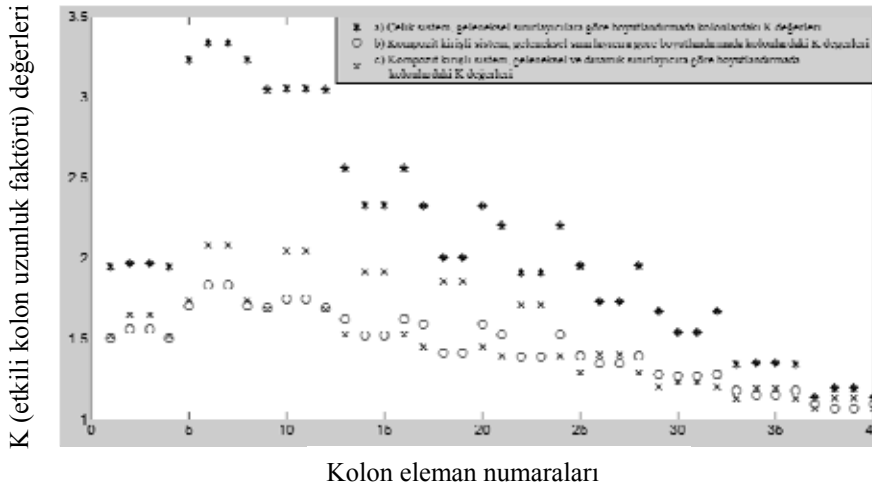
Şekil 10. On katlı, üç açıklıklı çelik çerçeve sistem

Üç açıklıklı on katlı, 70 elemanlı, çelik çerçeve sistem Saka [3] ve Armutçu[20] tarafından çalışılmıştır. Bu örnek için alınan tasarım parametreleri referans çalışmalar tarafından kullanılanlar ile aynı olup, elastisite modülü $E=21000 \text{ kN/cm}^2$, St37 çeliği ve çerçevede en üst katta izin verilen maksimum yatay yer değiştirme değeri 11.83 cm dir. Bu çalışmada ayrıca etkili kolon uzunluk faktörü, K, değerleri Saka [3] ve Armutçu [20]'nun çalışmalarında aldıkları sabit değer olan 1.2 yerine (8) denklemi ile hesaplanarak boyutlandırmalar yapılmıştır. Yapıya ait geometrik özellikler ve yükleme durumu Şekil 10'da sunulmuştur. Sistemin optimum boyutlandırılmasında 17 adet HEA (HE180A, HE200A, HE220A, HE240A, HE260A, HE280A, HE300A, HE320A, HE340A, HE360A,

HE400A, HE450A, HE500A, HE600A, HE650A, HE700A, HE800A) ve 15 adet IPE (IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240, IPE270, IPE300, IPE330, IPE360, IPE400, IPE450, IPE500, IPE550, IPE600) olmak üzere toplam 32 adet profil kullanılmıştır. MATLAB’da hazırlanan program yardımı ile her üç durum için; a) çelik sistem-geleneksel sınırlayıcılar, b) kompozit kirişli sistem-geleneksel sınırlayıcılar, c) kompozit kirişli sistem-geleneksel ve dinamik sınırlayıcılar, elde edilen çubuk boyutları ve analiz sonuçları Tablo 3’de gösterilmiştir. Çelik sistem-geleneksel sınırlayıcılar ile optimum boyutlandırma sonuçları Tablo 3’de Saka [3] ve Armutçu[20] tarafından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca GA ile her üç farklı çözüme ilişkin toplam ağırlığın iterasyon adımlarına göre değişimleri Şekil 11’de gösterilmiştir. Her üç farklı boyutlandırmada bulunan kolonların (8) denklemi ile hesaplanan K etkili uzunluk faktörü değerleri de Şekil 12’de sunulmaktadır.



Şekil 11. Ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi



Şekil 12. Yapılan her üç farklı boyutlandırmada Kolon elemanlarındaki K değerleri

Tablo 3. GA ile optimizasyon sonuçları

Çelik Türü	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kolon	Kiriş	Toplam Ağırlık (Ton)	İlk üç doğal frekans değ. (Hz)
	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No		
S157	1,4,5, 8,9,12 A ₁ (cm ²)	2,3,6,7 10,11 A ₂ (cm ²)	13,16,17, 20,21,24 A ₃ (cm ²)	14,15, 18,19, 22,23 A ₄ (cm ²)	25,28, 29,32 A ₅ (cm ²)	26,27, 30,31 A ₆ (cm ²)	33,36, 37,40 A ₇ (cm ²)	34,35, 38,39 A ₈ (cm ²)	40-70 A ₉ (cm ²)	-	-	-	
	216.00	334.00	181.00	216.00	91.00	198.00	78.10	198.00	134.00	134.00	38.198	-	
	198.00	334.00	181.00	216.00	116.00	156.00	84.50	156.00	134.00	134.00	37.261	-	
Saka [3] Optim. kriteri yönt.	177.85	292.44	127.81	178.25	88.20	113.14	61.45	63.04	115.78	30.380	-		
Bu çalışma	226.00 (HE600A)	286.00 (HE800A)	178.00 (HE450A)	198.00 (HE500A)	98.80 (IPE450)	116.00 (IPE500)	64.30 (HE220A)	72.7 (IPE360)	143.00 (HE360A)	35.745	-		
	198.00 (HE500A)	260.00 (HE700A)	134.00 (IPE550)	198.00 (HE500A)	98.80 (IPE450)	134.00 (IPE550)	62.6 (IPE330)	72.7 (IPE360)	116.00 (IPE500)	31.087	2.69 6.95 11.69		
	156.00 (IPE600)	286.00 (HE800A)	116.00 (IPE500)	260.00 (HE700A)	84.50 (IPE400)	116.00 (IPE500)	53.8 (IPE300)	98.80 (IPE450)	116.00 (IPE500)	31.37	2.76 7.22 12.86		

*Not: Kompozit kirişli analizlerde beton kütle dinamik analize dahil edilmiştir.

Tablo 3’de, referans çalışma olan Armutçu [20]’ya ait GA ile iki farklı optimum boyutlandırma değerleri ve ayrıca Saka [3]’nin optimumluk kriteri yöntemi ile belirlediği optimum kesit alanları bulunmaktadır. Bu çalışmada çelik kesitli sistemin geleneksel sınırlayıcılara göre yapılan boyutlandırma sonuçları Saka [3] ve Armutçu [20]’ya ait sonuçlar ile oldukça benzer olmakla birlikte, toplam çelik ağırlığı bakımından Armutçu[20]’nun bulduğu sonuçlardan yaklaşık %4 daha hafif, Saka[3]’nin bulduğu sonuçtan ise yaklaşık %15 daha ağır olduğu görülmektedir. Ancak Saka[3] tarafından optimumluk kriteri yöntemi ile elde edilen kesit alanları gerçek profiller değildir, ve bu nedenle sonuçların daha hafif olması olağandır.

İkinci olarak, kirişlerin kompozit kesitli olarak hesaba dahil edilerek geleneksel sınırlayıcılara göre gerçekleştirilen boyutlandırmada ise bazı çubuk boyutlarının küçüldüğü ve toplam çelik ağırlığının yaklaşık %11 azalarak 31.087 ton’a düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni, Şekil 12’de gösterildiği gibi kirişlerin üzerlerindeki beton plakların hesaba dahil edilmesi ile K (etkili kolon uzunluk faktörü) değerlerinde önemli ölçüde azalmalar meydana gelmesidir. Buna rağmen bu çalışmada (8) denklemi ile belirlenen K değerlerinin büyük çoğunluğunun Saka [3] ve Armutçu [20]’nin çalışmalarında 1.2 olarak aldıkları sabit değerden büyüktür. Üçüncü boyutlandırma olarak kompozit kirişli sistemin ilk üç moduna ait doğal frekans değerleri aşağıda verildiği gibi sınırlandırılmıştır.

- 1.doğal frekans değeri > 2.75 (Hz)
- 2.doğal frekans değeri > 7.00 (Hz)
- 3.doğal frekans değeri > 11.75 (Hz)

Tablo 3’de gösterilen kompozit kesitli sistemin, geleneksel ve dinamik sınırlayıcılar ile elde edilen boyutlandırma sonuçlarına göre geleneksel sınırlayıcılarının yanı sıra dinamik sınırlayıcıların da sağlanması için bazı kolon elemanlarının boyutlarında değişiklikler meydana gelerek toplam çelik ağırlığının yaklaşık %1 artarak 31.37 ton olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu tabloda doğal frekans değerlerinin 2.76 Hz, 7.22Hz ve 12.86Hz olduğu da görülmektedir. Bu sonuçlara göre geleneksel sınırlayıcıların yanı sıra dinamik sınırlayıcıların da boyutlandırmada oldukça aktif rol oynadığı görülmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, genetik algoritma çelik çerçeve sistemlerinin geleneksel ve dinamik sınırlayıcılarla optimizasyonu için kullanılmıştır. Çalışmada deplasman sınırlayıcılarının yanı sıra gerilme sınırlayıcıları TS648’deki kriterlere uygun şekilde dikkate alınmıştır. Ayrıca titreşim hareketlerinde rezonans durumlarından kaçınmak için yapının frekansını dolayısıyla periyodunu kontrol altında tutarak uygun bir yapısal davranış elde etmek için yapının ilk üç doğal frekansı dinamik sınırlayıcılar olarak işleme dahil edilmiştir. Çelik çerçeve sistemlerde betonarme döşemelerin kiriş davranışlarına etkisini irdeleyebilmek amacıyla çerçeveler kompozit kirişli olarak modellenmiş ve işlemler tekrarlanmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla literatürden seçilen değişik çerçeve örnekleri için çözümler elde edilmiş, grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar kirişlerin kompozit kiriş olarak modellenmesi halinde boyutların küçüldüğünü ve toplam ağırlığın azaldığını göstermektedir. Ayrıca bu durumda kolonların etkin burkulma boyları

küçülmekte, en kesit boyutları azalabilmekte ve toplam ağırlık düşmektedir. Geleneksel sınırlayıcıların yanı sıra dinamik sınırlayıcıların da dahil edildiği durumda yapının frekansının dolayısıyla periyodunun sınırlandırılması nedeniyle kolon elemanların boyutlarında artışlar meydana gelebildiği, frekanslardaki küçük bir değişimin toplam ağırlıkta büyük artışlara neden olabildiği gözlenmektedir.

Semboller

b_E	:Etkili genişlik
b'_E	:Eşdeğer çelik alanına dönüştürülmüş tabla genişliği
b_f	:Kiriş profilinin başlık genişliği
b_0	:Çelik kiriş aralığı
c_i	:İhlal edilme katsayısı
C_m	:Uç ve açıklık momentleri ile yanal desteklemeyi göz önüne alan bir katsayı
E	:Elastisite modülü
E_c	:Beton plağın elastisite modülü
E_s	:Çelik profilin elastisite modülü
f_i	:Yapının i . titreşim frekansını (Hertz)
G_A	:Kolonların üst uçları için rijitlik dağıtım faktörleri
G_B	:Kolonların alt uçları için rijitlik dağıtım faktörleri
I_c	:Kolonun üst ucuna bağlı kolonların atalet momentleri
I'_c	:Kolonun alt ucuna bağlı kolonların atalet momentleri
I_g	:Kolonun üst ucuna bağlı kirişlerin atalet momentleri
I'_g	:Kolonun alt ucuna bağlı kirişlerin atalet momentleri
K	:Etkili kolon uzunluk faktörü
K_g	:Global rijitlik matrisi
M_g	:Global kütle matrisi
P	:Ceza sabiti
T_i	:Yapının i . titreşim periyodu (s)
t_s	:Beton plak kalınlığı
s_c	:Kolonun üst ucuna bağlı kolonların boyu
s'_c	:Kolonun alt ucuna bağlı kolonların boyu
s_g	:Kolonun üst ucuna bağlı kirişlerin boyu

s'_g	:Kolonun alt ucuna bağlı kirişlerin boyu
W	:Çerçeve ağırlığı
σ_a	:Akma gerilmesi
σ_{eb}	:Hesap edilen aksenal basınç gerilmesi,
σ_b	:Sadece eğilmeden elde edilen gerilme
σ_{bem}	:Eksenal basınç emniyet gerilmesi,
σ_B	:Kiriş elemanların yanal burkulmaya karşı basınç emniyet gerilmesi
σ_e	:Euler kritik burkulma gerilmesi,
ρ_i	:Çubuğun yoğunluğu

Kaynaklar

- [1] Goldberg, D.E., Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1989.
- [2] Rajeev, S., Krishnamoorthy, C. S., Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms, Journal of Structural Engineering, ASCE, 118, 1233-1250, 1992.
- [3] Saka, M.P., Optimum Design of Steel Frames with Stability Constraints, Computers and Structures, 41, 1365-1377, 1991.
- [4] Daloğlu, A., Aydın, Z., Kafes Sistemlerin Uygulamaya Yönelik Optimum Tasarımı, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5, 951-957, 1999.
- [5] Daloglu, A., Armutcu M., Genetik Algoritma ile Düzlem Çelik Çerçevelerin Optimum Tasarımı, İMO Teknik Dergi, 116, 1601-1615, 1998.
- [6] Salajegheh, E., Optimum Design of Steel Space Frames with Frequency Constraints Using Three Point Rayleigh Quotient Approximation, Journal of Constructional Steel Research 54, 305–313, 2000.
- [7] Sergeev, O., Mroz, Z., Sensitivity Analysis and Optimal Design of 3D Frame Structures For Stress And Frequency Constraints, Computers and Structures 75, 167-185, 2000.
- [8] Isenberg, J., Pereyra, V., Lawver, D., Optimal Design of Steel Frame Structures, Elsevier, Applied Numerical Mathematics, 40, 59–71, 2002.
- [9] Toğan, V., Daloğlu A., Genetik Algoritma ile Üç Boyutlu Kafes Sistemlerin Şekil Ve Boyut Optimizasyonu, İMO Teknik Dergi, 251, 3809 -3825, 2006.
- [10] Değertekin, S.Ö., Ülker, M., Hayalioğlu, M.S., Uzay Çelik Çerçevelerin Tabu Arama ve Genetik Algoritma Yöntemleriyle Optimum Tasarımı, İMO Teknik Dergi, 259, 3917-3934, 2006.

- [11] Aydogdu, İ., Saka, M.P., Ant Colony Optimization of Irregular Steel Frames Including Elemental Warping Effect, *Advances in Engineering Software*, 44, 150–169, 2012.
- [12] Erdogan, Y. S., Genetik Algoritmalar Kullanılarak Sonlu Elemanlar Güncellenmesi Yöntemiyle Hasar Tespiti ve Parametre Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 2007
- [13] Saka, M. P., Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm, *ScienceDirect, Journal of Constructional Steel Research*, 65, 36–43, 2009
- [14] Togan, V., Design of Planar Steel Frames Using Teaching–Learning Based Optimization, *Engineering Structures*, 34, 225–232, 2012.
- [15] Bekiroğlu, S., Genetik Algoritma İle Çelik Çerçevesinin Optimum Boyutlandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2003
- [16] TS 648, Çelik Yapıların Hesap Ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980
- [17] Topçu, A., Bilgisayar Destekli Nümerik Analiz Ders Notları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2013.
- [18] Salmon, C.G., Johnson, J.E., *Steel Structures-Design and Behavior Book*. 2nd Edition, Harper&Row, 1980.
- [19] Günbay, S., Çelik-Beton Kompozit Enkesitli, Kirişlerin Gerilme ve Şekil Değiştirmelerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2005.
- [20] Armutçu, M., Çelik Çerçevesinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 1997.
- [21] Dumonteil, P., Simple Equations for Effective Length Factors, *Engineering Journal, AISC*, 29:3,111-115, 1992.
- [22] MATLAB, The language of technical computing, The Mathworks Inc., Natick, MA, 2009.
- [23] SAP2000, Integrated finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA, 2008.