



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ

24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ELASTİK ZEMİNE OTURAN UZAY ÇELİK ÇERÇEVELERİN GA İLE OPTİMUM TASARIMI

Ayşe Daloğlu¹, Musa Artar², Korhan Özgan³ ve Ali İ. Karakaş⁴

^{1,3,4} İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

² İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt Üniversitesi, Bayburt

ABSTRACT

In this study, optimum designs of space steel frames are carried out with W profiles from AISC (American Institute of Steel Construction) by using Genetic Algorithm and MATLAB-SAP2000 OAPI (Open Application Programming Interface). The stress constraints from AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design), maximum lateral displacement and inter storey drift constraints, column-column and column-beam geometric constraints are used in the study. Three-parameter foundation model is used in the study to incorporate soil-structure interaction. The examples investigated are designed for the cases of frames with and without structure-soil interactions for comparison. A program is coded in MATLAB interacting with SAP2000 OAPI for all optimization procedures. Thus, the steel space frame systems modeled in SAP2000 are continuously updated by MATLAB. Results of the analyses show that consideration of soil-structure interaction ends up with larger column cross sections and so, heavier space frames are obtained.

ÖZET

Bu çalışmada, Genetik Algoritma ve MATLAB-SAP2000 OAPI (Open Application Programming Interface) kullanılarak uzay çelik çerçevelerin AISC'den (American Institute of Steel Construction) alınan W profilleri arasından minimum ağırlıklı olacak şekilde optimum boyutlandırılması yapılmaktadır. Gerilme sınırlayıcıları Yük ve Tasarım Katsayıları yöntemiyle AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design) standardına uygun şekilde dikkate alınmaktadır. Ayrıca maksimum yer değiştirme, katlar arası rölatif yer değiştirme, kolon-kolon ve kolon-kiriş geometrik sınırlayıcıları kullanılmaktadır. Yapı zemin etkileşimi üç parametrelili zemin modeli uygulanarak dikkate alınmıştır. İncelenen örnekler, zemin etkisini dikkate alındığı ve dikkate alınmadığı durumlar için boyutlandırılmış ve elde edilen sonuçlar tablo ve şekiller ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm optimizasyon aşamaları için MATLAB'de SAP2000-OAPI ile birlikte çalışabilen bir program kodlanmıştır. Bu sayede SAP2000 programında modellenen uzay çelik çerçeveler, MATLAB programı yardımı ile sürekli güncellenmektedir. Analiz sonuçları, zemin etkisinin dikkate alınmasının kolon en kesiti boyutlarının büyümesine ve bu nedenle daha ağır uzay çerçevelerin elde edilmesine neden olduğunu göstermektedir.

GİRİŞ

Yapıların ağırlıklarının minimize edilmesi yapı mühendisliğinin önemli araştırma konuları arasındadır. Çelik yapıların optimum boyutlandırılması ayırık değişkenler içeren bir problem olup türev bilgisi gerektirmeyen çeşitli stokastik yöntemlerle çözülebilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları, Genetik Algoritma, Harmoni Arama Algoritması, Tabu Arama, Karınca Kolonisi Algoritmasıdır. Son yıllarda birçok araştırmacı stokastik yöntemleri kullanarak çelik yapıların minimum ağırlıklı boyutlandırmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada ilk stokastik yöntemlerden biri olan Genetik Algoritma (GA) kullanılmaktadır. GA ile optimizasyon üreme, çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile gerçekleştirilmiştir.

Genetik Algoritma 1990'lı yıllarda yapılan optimum boyutlandırma çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır, Golberg [1]. Rajeev ve Krishnamoorthy [2] tarafından Genetik Algoritma kafes sistemlerin optimumu boyutlandırılması için kullanılmıştır. Daloğlu ve Aydın [3] tarafından Genetik Algoritma yöntemi kullanılarak kafes sistemlerin optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Genetik Algoritma kullanılarak düzlem çerçeve sistemlerin optimum boyutlandırılması Daloğlu and Armutcu [4] tarafından araştırılmıştır. Genetik Algoritma ile kompleks sistemler, çok elemanlı kafes sistemler, üç boyutlu uzay çerçeve sistemler..v.b konu üzerinde çalışan araştırmacılar tarafından ele alınmıştır, Erbatur vd. [5], Togan and Daloğlu [6], Degertekin vd.[7], Hayalioglu ve Degertekin [8]. Genetik Algoritma yönteminin yanı sıra, Saka [9] Harmoni Arama Algoritması ile çeşitli çerçeve sistemlerin optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Bunun yanı sıra Aydogdu ve Saka [10] Karınca Kolonisi yöntemi ile uzay çerçeve sistemlerin optimum boyutlandırmalarını araştırmışlardır.

Bu çalışmada yukarıda belirtilen literatür çalışmalarına ilave olarak yapı-zemin etkileşimini boyutlandırmada dikkate almak suretiyle yapısal optimizasyonun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Böylece optimum boyutlandırma gerçekleştirilirken yapının davranışına zeminin etkisini görme imkanı sağlanmaktadır. Yapı zemin etkileşimi, bu çalışmada üç parametrelili zemin modeline göre dikkate alınmakta ve SAP2000'e bu özellik kazandırılmaktadır. MATLAB'de kodlanan bir program ile geliştirilmiş Vlasov modelinde, kullanılan üç zemin parametresinin değerleri hesaplanmakta ve SAP2000-OAPI uygulaması ile iki yönlü veri akışı sağlanarak yapının analizi gerçekleştirilmektedir.

GENETİK ALGORİTMA İLE SINIRLAYICILI OPTİMİZASYON

Minimum ağırlık için ayırık tasarım değişkenli uzay çelik çerçeve sistemlerin optimum tasarım problemi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

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

Burada A_k k grubuna ait elemanların kesit alanlarını, ρ_i ve L_i i inci çubuğun yoğunluğunu ve boyunu, ng sistemdeki toplam grup sayısını, nk sistemdeki toplam eleman sayısını göstermektedir. $W(A_k)$ amaç fonksiyonu, gerilme ve yer değiştirme sınırlayıcıları, geometrik sınırlayıcılar vb... altında minimize edilmektedir.

Gerilme sınırlayıcıları, AISC-LRFD'e göre uygulanmaktadır;

$$\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \quad \text{için} \quad g_{il}(x) = \left(\frac{P_u}{\phi P_n} \right)_{il} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right)_{il} - 1.0 \leq 0 \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, nm \\ l = 1, \dots, nl \end{matrix} \quad (2)$$

$$\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2 \quad \text{için} \quad g_{il}(x) = \left(\frac{P_u}{2\phi P_n} \right)_{il} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right)_{il} - 1.0 \leq 0 \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, nm \\ l = 1, \dots, nl \end{matrix} \quad (3)$$

Bu bağıntılarda, nm toplam eleman sayısı, nl yükleme durumlarının toplam sayısı, P_u çekmede veya basınçta aksenal kuvvet, P_n çekmede veya basınçta taşınabilecek maksimum kuvvet, M_{ux} kuvvetli eksenindeki eğilme momenti, M_{nx} kuvvetli eksenindeki taşıyabileceği maksimum eğilme momenti, M_{uy} zayıf eksenindeki eğilme momentidir (iki boyutlu çerçevelerde $M_{uy}=0$ dır), M_{ny} zayıf eksenindeki taşıyabileceği maksimum eğilme momenti, ϕ ise dayanım azaltma katsayısıdır; basınç için 0.85, çekme için 0.90 ve eğilme için 0.90 dır.

Yer değiştirme sınırlayıcıları aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$g_{jl}(x) = \frac{\delta_{jl}}{\delta_{ju}} - 1 \leq 0 \quad j=1, \dots, m \quad l=1, \dots, nl \quad (4)$$

Burada δ_{jl} l yükleme durumu için j noktasının deplasmanını, δ_{ju} ilgili deplasmanın alabileceği üst sınırı, m yer değiştirmesi sınırlanmış düğüm noktası sayısını, nl toplam yükleme durumlarının sayısını göstermektedir.

Katlar arası rölatif yer değiştirme sınırlayıcıları;

$$g_{jil}(x) = \frac{\Delta_{jil}}{\Delta_{ju}} - 1 \leq 0 \quad j=1, \dots, ns \quad i=1, \dots, nsc \quad l=1, \dots, nl \quad (5)$$

Burada Δ_{jil} l yükleme durumu altındaki j . kattaki i . kolonda katlar arası yerdeğiştirmesi, Δ_{ju} sınır değer (kat yüksekliği/300), ns katların sayısı, nsc bir kattaki kolonların sayısını göstermektedir.

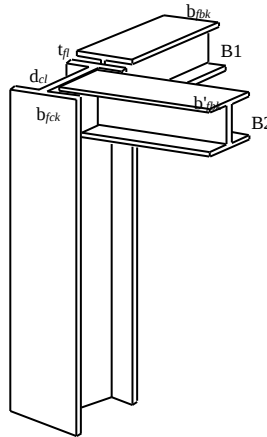
Kolon- kolon geometrik sınırlayıcılar;

$$g_n(x) = \frac{D_{un}}{D_{ln}} - 1 \leq 0 \quad n=2, \dots, ns \quad (6)$$

$$g_w(x) = \frac{W_{un}}{W_{ln}} - 1 \leq 0 \quad n=2, \dots, ns$$

Burada W_{un} ve W_{ln} seçilen üst ve alt kattaki kolonların birim ağırlıklarını, D_{un} ve D_{ln} ise üst ve alt kattaki seçilen kolonların kesit yüksekliğini göstermektedir.

Kolon-kiriş geometrik sınırlayıcılar Şekil 1'de gösterilen detaya göre aşağıda sıralanmaktadır;



Şekil 1. Kolon-Kiriş birleşim detayı

$$\begin{aligned}
g_{bf,i}(x) &= \frac{b'_{fbk,i}}{d_{cl,i} - 2t_{fl,i}} - 1 \leq 0 & i = 1, \dots, n_{bw} \\
g_{bb,i}(x) &= \frac{b_{fbk,i}}{b_{fck,i}} - 1 \leq 0 & i = 1, \dots, n_{bf}
\end{aligned} \tag{7}$$

Burada n_{bw} kolon kesitinin gövdesine bağlanan kirişlerin sayısını, $b'_{fbk,i}$ kiriş kesitinin başlık genişliğini, $d_{cl,i}$ kolon kesitinin yüksekliğini, $t_{fl,i}$ kolon kesitinin başlık kalınlığını, n_{bf} kolon kesitinin başlığına bağlanan kirişlerin sayısını, $b_{fbk,i}$ ve $b_{fck,i}$ kolon ve kiriş kesitlerinin başlık genişliklerini göstermektedir.

ÜÇ PARAMETRELİ ELASTİK ZEMİN MODELİ

Elastik zemine oturan bir yapıya ait yük-yer değiştirme ilişkisi

$$q_z = kw - 2t\nabla^2 w \tag{8}$$

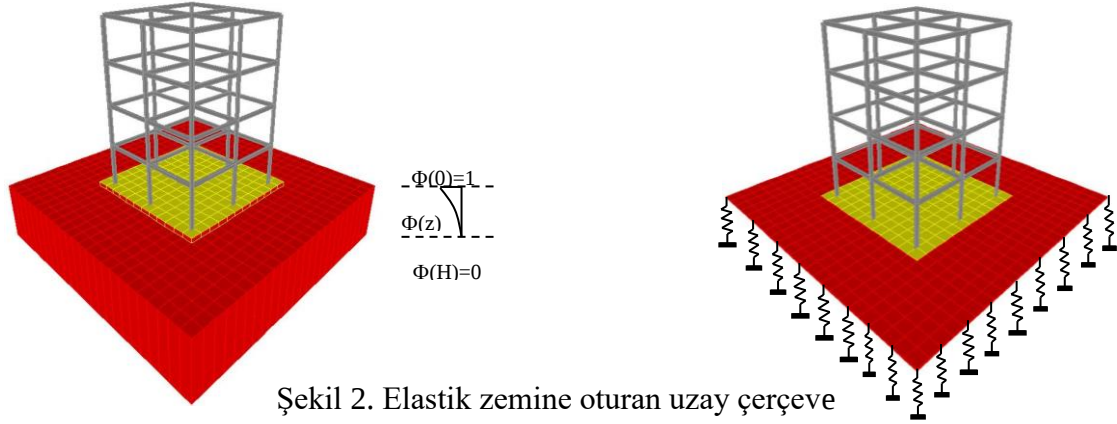
şeklinde ifade edilebilir, Vallabhan ve Daloğlu [11]. Burada w yüzey deplasmanları, k zemin modülü, $2t$ zemin kayma parametresidir ve E_s , zemin elastisite modülü, ν_s Poisson oranı, G_s kayma modülü ve $\Phi(z)$ zeminin düşey deplasman profilini gösteren şekil fonksiyonu cinsinden aşağıdaki ifadelerle hesaplanmaktadır,

$$\begin{aligned}
k &= \int_0^{H_s} \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \left(\frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \right)^2 dz, \\
2t &= \int_0^{H_s} G_s \Phi(z)^2 dz, \\
\Phi(z) &= \frac{\sinh \gamma (1 - z / H_s)}{\sinh \gamma}
\end{aligned} \tag{9}$$

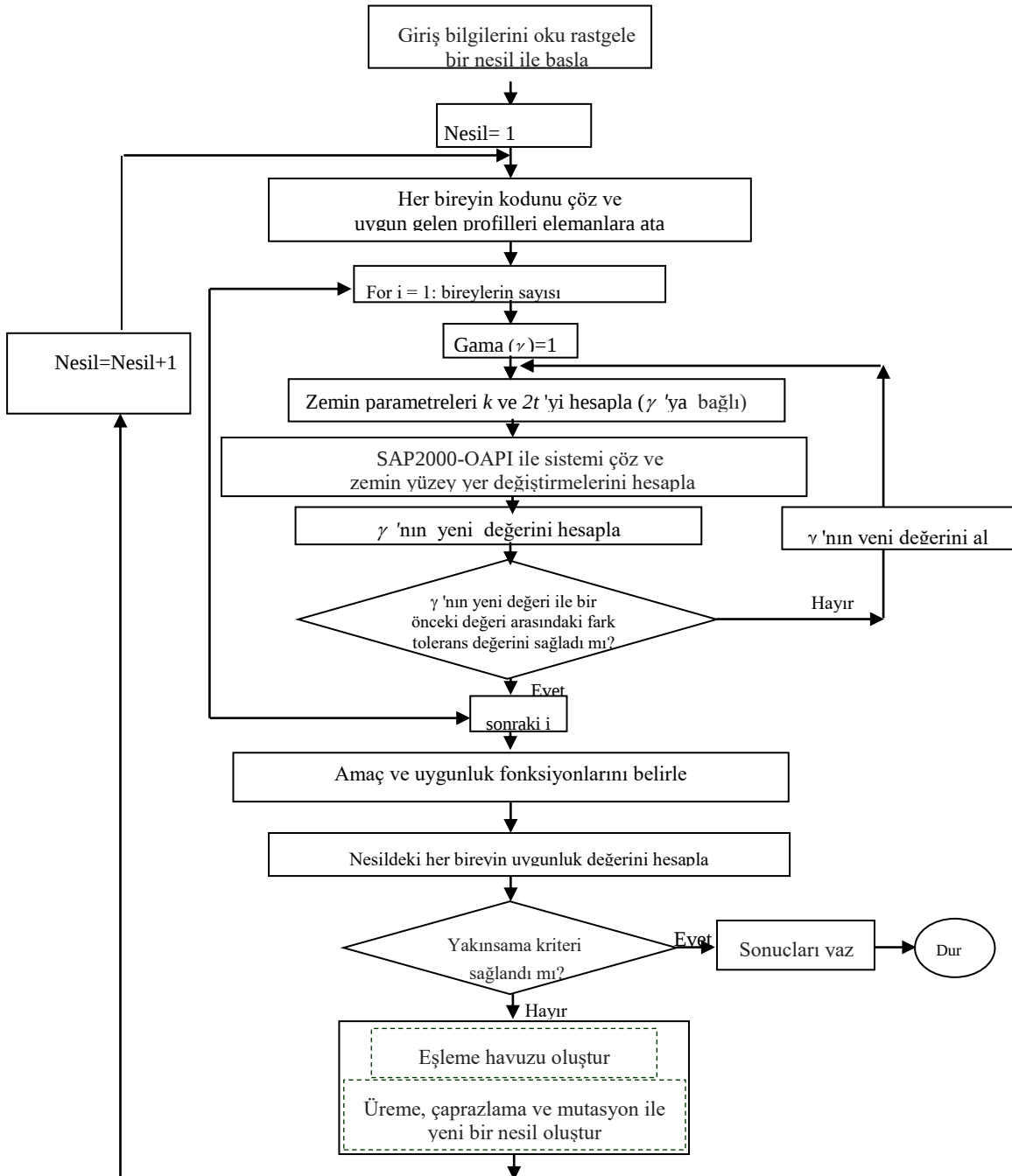
şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemde H_s kaya tabakaya kadar olan zemin derinliğidir, γ üçüncü zemin parametresidir ve aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir,

$$\left(\frac{\gamma}{H_s} \right)^2 = \frac{(1-2\nu_s)}{2(1-\nu_s)} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\nabla w)^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w^2 dx dy} \tag{10}$$

Burada belirtilen üç zemin parametresi denklemlerden görüldüğü üzere $\Phi(z)$ ve H_s değerlerine bağlıdır, Şekil 2. Üçüncü zemin parametresi, γ , zemin derinliği ve yüzey deplasmanlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu complex yapı zemin ilişkisinde zemin parametrelerini elde edebilmek için bir iterasyon gereklidir. Bunun için başlangıçta üçüncü zemin parametresi, γ , 1'e eşit kabul edilerek diğer zemin parametreleri hesaplanmakta ve elastic zemine outran yapı analizi yapılmaktadır. Elde edilen zemin yüzey deplasmanları ile γ 'nın yeni değeri elde edilmekte ve iterasyona birbiri ardına gelen γ değerleri arasındaki fark önceden belirlenen bir toleranstan küçük olana kadar devam edilmektedir. Bu amaçla MATLAB'de bir program kodlanmıştır. Elastik zemine outran uzay çelik çerçevenin analizi SAP2000 ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerler iki yönlü veri akışı SAP2000-OAPI arayüzüyle sağlanmak suretiyle optimum boyutlar elde edilmiştir, Şekil 3.



Şekil 2. Elastik zemine oturan uzay çerçeve



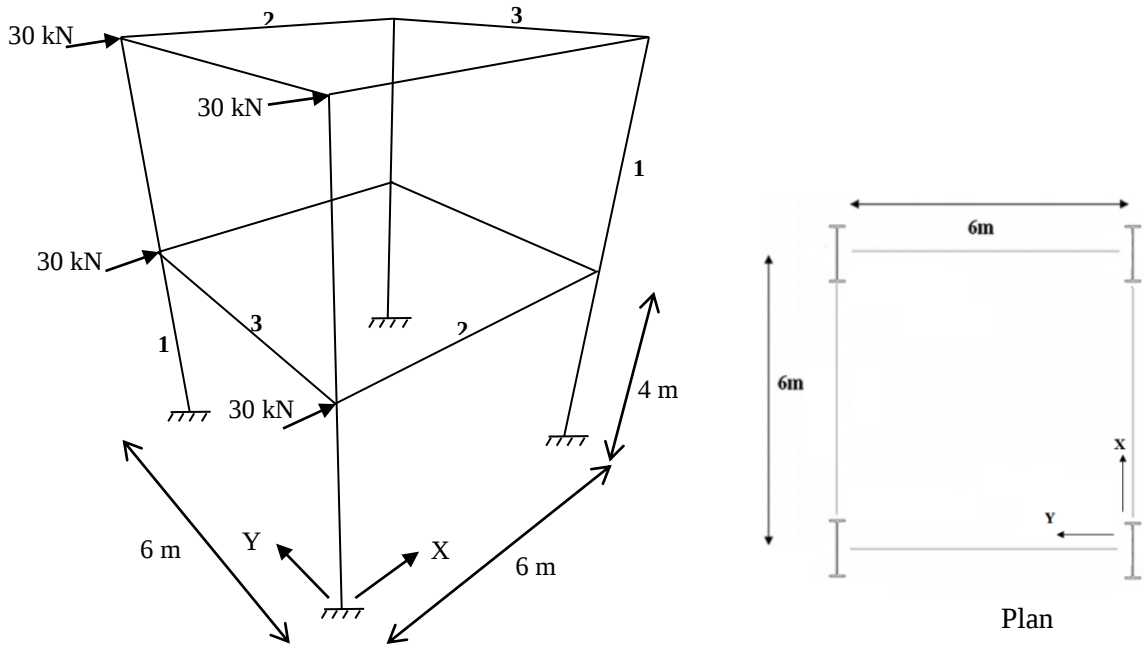
Şekil 3. Uygulanan genetik algoritma şeması

ÖRNEKLER

Geliştirilen algoritmanın uygulanabilirliği iki adet sayısal örnekle gösterilmektedir. Optimum boyutlandırma elastik zemin etkisi dikkate alınmadan ve dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı zemin türlerinin optimum boyutlandırmayı nasıl etkilediği araştırılmıştır. Her iki örnekte kullanılan çelik malzeme bilgileri, $E=200$ GPa, $f_y=248.2$ MPa ve $\rho=7.85$ ton/m³ tür. Optimum boyutlandırmalar AISC (American Institute of Steel Construction) den alınmış 64 W profili arasından gerçekleştirilmektedir; W8x15, W 8x21, W8x24, W 8x28, W 8x31, W 8x35, W 8x40, W 10x15, W 10x22, W 10x26, W 10x33, W 10x39, W 10x54, W 10x77, W 12x19, W 12x26, W 12x30, W 12x35, W 12x40, W 12x45, W 12x50, W 12x53, W 12x58, W 12x72, W 12x96, W 14x26, W 14x30, W 14x34, W 14x38, W 14x43, W 14x48, W 14x53, W 14x61, W 14x68, W 14x74, W 14x82, W 14x90, W 14x120, W 14x159, W 14x193, W 14x257, W 14x311, W 14x370, W 14x426, W 16x26, W 16x31, W 16x36, W 16x40, W 18x35, W 18x40, W 18x50, W 18x76, W 21x50, W 21x62, W 21x132, W 24x68, W 24x103, W 27x94, W 27x161, W 30x108, W 30x148, W 30x191, W 33x221, W 36x194.

16 Elemanlı Uzay Çerçeve

16 elemanlı uzay çerçeve örneği Şekil 4'te gösterilmektedir. Rüzgar yükü, 30 kN, yine şekilde görüldüğü gibi uygulanmaktadır ve her kiriş üzerinde 16 kN/m ölü yük bulunmaktadır. Ayrıca elemanlar şekilde görüldüğü gibi üç grupta toplanmaktadır.



Şekil 4. 16 elemanlı uzay çerçeve

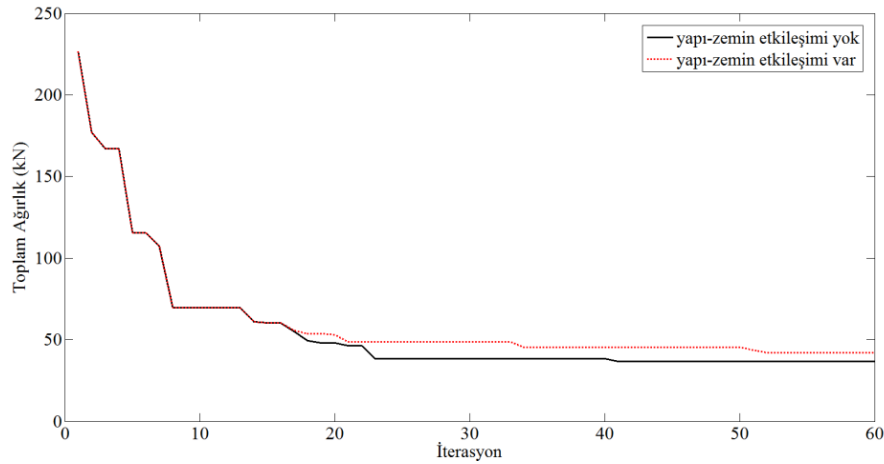
Analizler sonucunda elde edilen zemin parametreleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar için yapılan çözümlerde elde edilen optimum sonuçlar Tablo 2'de gösterilmektedir. Her iki duruma ait toplam ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi Şekil 5'te ve yapı-zemin etkileşimin bulunduğu çözüme ait zemin çökmeleri Şekil 6'da gösterilmektedir.

Tablo 1. Zemin parametreleri

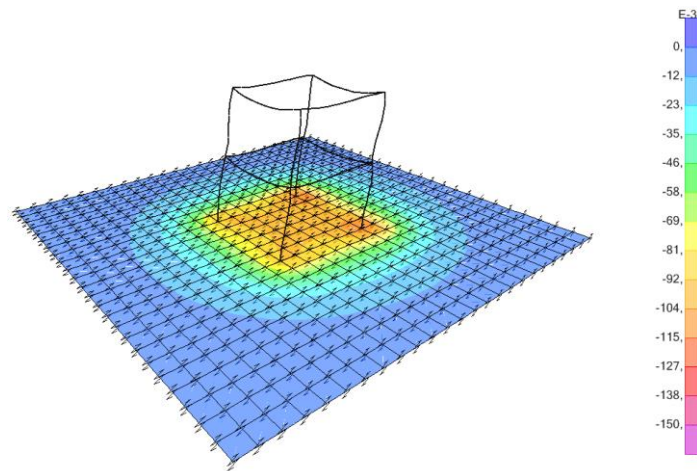
	E (kN/m ²)	Gama, γ	k (kN/m ³)	2t (kN/m)
Zemin A	68950	1.515	8929.082	70854.458

Tablo 2. Optimum boyutlandırma sonuçları

Grup No	Yapı-Zemin Etkileşimi yok	Yapı-Zemin Etkileşimi var
Kolonlar (1)	16x36	16x36
Kirişler- X doğ. (2)	16x31	14x38
Kirişler- Y doğ. (3)	14x26	14x34
Toplam Ağırlık (kN)	36.89	42.13
Maks. yatay yerd. (cm)	1.85	1.90
Maks. katlar arası rölatif yerd. (cm)	0.94	0.95



Şekil 5. Toplam ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi



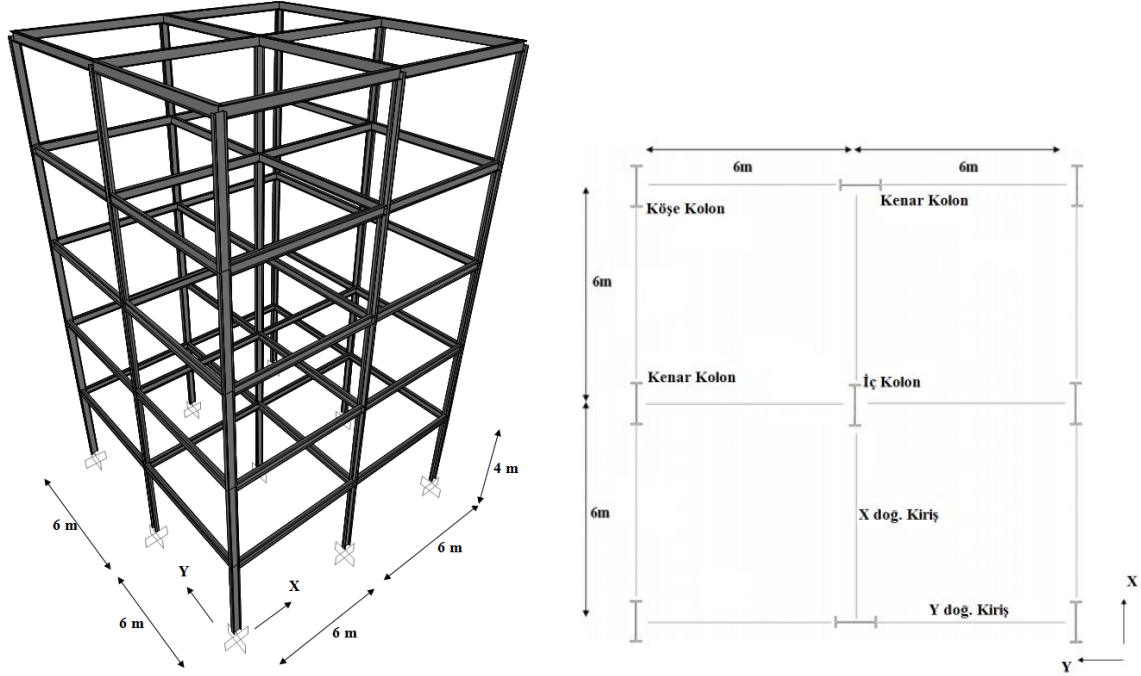
Şekil 6. Yapı-zemin etkileşiminde zemindeki çökmeler (cm)

Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığı zaman maksimum çökme değeri -0,1155 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Tablo 2’de belirtildiği gibi kirişler için kesit atalet momenti ve alanı daha büyük olan profiller seçilmiş olmasına rağmen yer değiştirme değerlerinde artışlar bulunmaktadır.

Beş katlı İki Açıklıklı Uzay Çerçeve

Beş katlı iki açıklıklı uzay çerçeve örneği Şekil 7'de gösterilmektedir. Elemanların gruplandırmaları Tablo 3'te verilmektedir. Çerçeve Aydoğdu [12] tarafından Karınca Kolonisi Algoritması ve Harmoni Algoritması yöntemleri ile optimum boyutlandırılmıştır. Bu çalışmada bu örnek GA ile zemin etkisi dikkate alınmadan ve dikkate alınarak iki farklı zemin

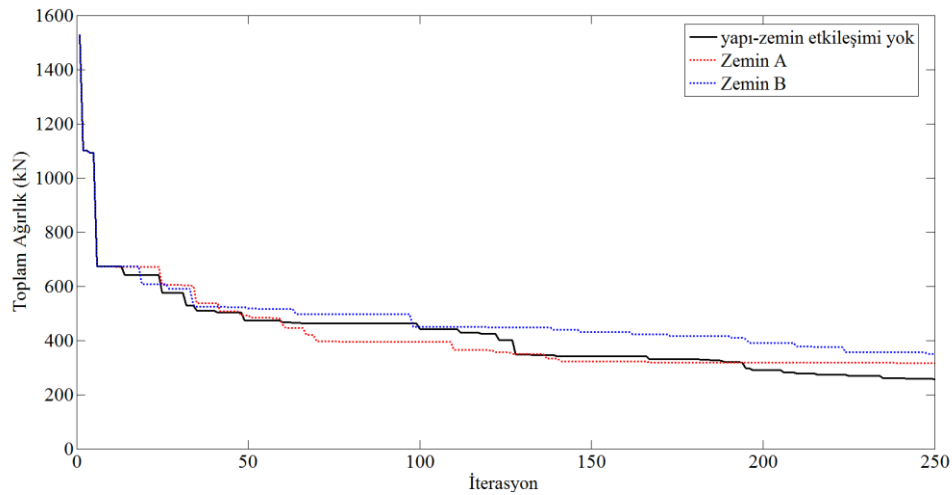
türü için çözülmüştür. Analizler sonucunda elde edilen değerler Tablo 4 ve Tablo 5'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Çerçeve için dikkate alınan yükler; ölü yük, $D=2.88 \text{ kN/m}^2$, hareketli yük, $L=2.39 \text{ kN/m}^2$, kar yükü $S=0.755 \text{ kN/m}^2$ ve hızı 105mph (65 m/s) olan rüzgar yüküdür. Uygulanan yük kombinasyonu; $1.2D + 1.6L + 0.5S$, $1.2D + 0.5L + 1.6S$, $1.2D + 1.6W + 0.5L + 0.5S$ dir. Çözümlere ilişkin toplam ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi Şekil 8'de ve zeminlerdeki çökmeler ise Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 7. Beş katlı uzay çerçeve görünüş ve planı

Tablo 3. Elemanların gruplandırması

Kat no	Grup no				
	Kiriş X doğ.	Kiriş Y doğ.	Köşe Kolon	Kenar Kolon	İç Kolon
1	1	2	9	10	11
2, 3	1	2	6	7	8
4, 5	1	2	3	4	5



Şekil 8. Toplam ağırlığın iterasyon adımları ile değişimi

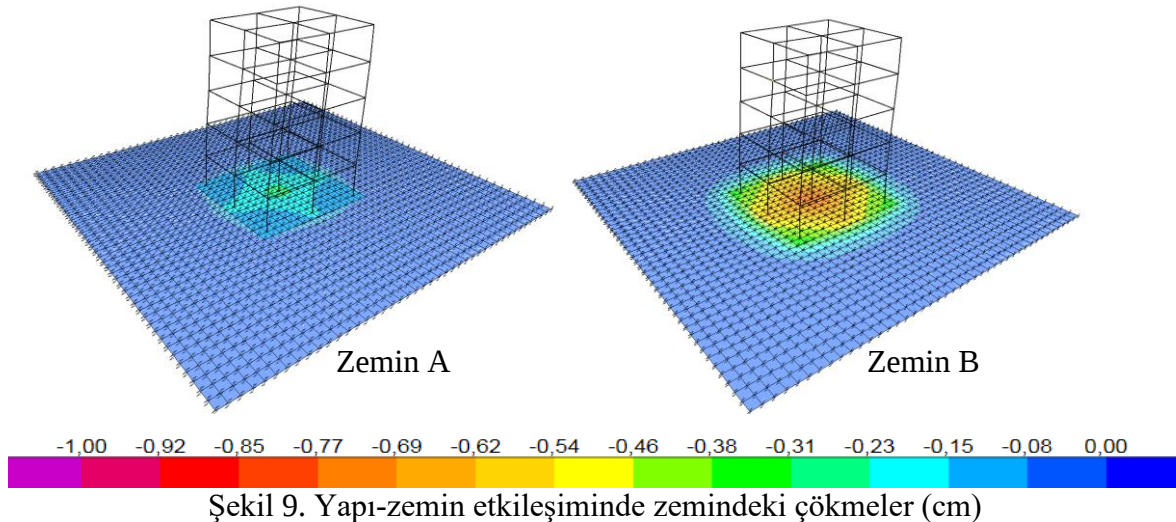
Tablo 4. Zemin parametreleri

Zemin Türü	E (kN/m ²)	Gama, γ	k (kN/m ³)	2t (kN/m)
Zemin A	68950	5.29	10949.25	52108.62
Zemin B	20000	4.62	2779.63	17275.08

Tablo 5'te görüldüğü gibi elde edilen sonuçlar literatürden alınan değerler ile paraleldir. Yapı-zemin etkileşiminin bulunduğu durumda Zemin A için minimum yapı ağırlığı 260.55 kN'dan 314.90 kN'a yükselirken Zemin B için bu ağırlık 350.87 kN'a yükselmektedir. Boyutlandırmalarda gerilme sınırlayıcılarının yanı sıra katlar arası rölatif yer değiştirme ve geometrik sınırlayıcılarının da oldukça aktif rol oynadıkları görülmektedir. Ayrıca Zemin A için maksimum çökme değeri -0,284 cm iken Zemin B için -0.784 cm'dir, Şekil 9. Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumlarda kolon kesitleri büyümektedir Tablo 5.

Tablo 5. Optimum boyutlandırma sonuçları

Grup No	Aydoğdu [11]		Bu çalışma MATLAB-SAP2000 OAPI- GA		
	ACO	HS	Zemin-Yapı etkileşimi yok	ZEMİN A	ZEMİN B
1	18x35	21x44	16x26	8x28	8x28
2	8x24	12x26	12x30	8x31	8x31
3	8x24	8x24	10x33	14x30	10x33
4	12x26	8x24	12x40	14x61	14x61
5	14x38	14x30	14x34	12x45	14x53
6	18x35	12x26	14x43	14x34	12x35
7	12x58	14x48	14x43	18x76	18x76
8	24x68	24x62	21x62	27x161	36x194
9	21x44	16x36	14x53	18x35	14x61
10	18x60	14x48	21x50	27x94	36x194
11	27x114	30x99	21x62	36x194	36x194
Toplam Ağırlık (kN)	265.38	278.196	260.55	314.90	350.87
Maks. yanal yer değ. (cm)	4.983	4.837	4.91	4.88	4.50
Maks.katlar arası rölatif yer değ. (cm)	0.569	1.333	1.30	1.33	1.19
Maks.çökme (cm)	-	-	-	(-)0.284	(-)0.784



Şekil 9. Yapı-zemin etkileşiminde zemindeki çökmeler (cm)

SONUÇLAR

Bu çalışmada elastik zemine oturan üç boyutlu çelik çerçevelerin optimum boyutlandırılması Genetik Algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Yapı zemin etkileşimi üç parametrelili zemin modeli kullanılarak dikkate alınmıştır. Çalışmada geliştirilen algoritmanın işlevselliği sayısal örneklerle gösterilmiştir. Uzak çerçeve örnekleri yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmadan ve alınarak optimum boyutlandırılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre zemin etkisinin dikkate alındığı durumlarda kesitlerde büyümeler meydana gelmesi suretiyle minimum toplam ağırlıkta önemli artışlar olduğu gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşiminin optimum boyutlandırmada oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [2] S. Rajeev, C.S. Krishnamoorthy, *Discrete optimization of structures using genetic algorithms*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 118(5):1233-1250, 1992.
- [3] A. Daloğlu, Z. Aydın, *Kafes sistemlerin uygulamaya yönelik optimum tasarımı*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(1): 951-957, 1999.
- [4] A. Daloğlu, M. Armutcu, *Genetik algoritma ile düzlem çelik çerçevelerin optimum tasarımı*, Teknik Dergi 116:1601-1615, 1998.
- [5] F. Erbatur, O. Hasançebi, İ. Tütüncü, H. Kılıç, *Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms*, Computers and Structures, 75(2): 209-224, 2000.
- [6] V. Toğan, A.T. Daloğlu, *An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping*, Computers and Structures, 86(11-12):1204–1218, 2008.
- [7] S.Ö. Değertekin, M. Ülker, M.S. Hayalioğlu, *Uzak çelik çerçevelerin tabu arama ve genetik algoritma yöntemleriyle optimum tasarımı*, Teknik Dergi, 259:3917-3934, 2006.
- [8] M.S. Hayalioğlu, S.Ö. Değertekin, *Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization*, Computers and Structures, 83(21-22):1849-1863, 2005.
- [9] M.P. Saka, *Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm*, Journal of Constructional Steel Research, 65(1):36–43, 2009.
- [10] İ. Aydoğdu, M.P. Saka, *Ant colony optimization of irregular steel frames including elemental warping effect*, Advances in Engineering Software, 44(1):150–169, 2012.
- [11] Vallabhan, C.V.G., Daloğlu, A.T., *Consistent FEM-Vlasov Model for Plates on Layered Soil*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 125(1), 108-113, 1999.
- [12] İ. Aydoğdu, *Optimum design of 3D irregular steel frames using ant colony optimization and harmony search algorithms*, Ph.D. Dissertation, Middle East Technical University, Ankara, 2010.