

**OPTIMUM DESIGN OF NONLINEAR STEEL SPACE FRAMES VIA TABU SEARCH METHOD**

**S. Özgür DEĞERTEKİN<sup>1</sup>, M. Sedat HAYALİOĞLU<sup>\*1</sup>, Mehmet ÜLKER<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, DİYARBAKIR

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ

**Geliş/Received: 11.07.2005 Kabul/Accepted: 23.02.2006**

**ABSTRACT**

In this study, an algorithm and its computer program were developed for the optimum design of steel space frames using tabu search method. Two methods were followed and the results obtained from these methods were compared. Geometrical nonlinearity was considered and the material was assumed to be linear-elastic in the analysis of the space frames. The lateral and vertical loads, lateral displacement, interstory drift and stress constraints imposed on the frames were taken from the relevant design codes. Moreover, section size constraints was considered in the optimum design. In this study, obtaining of minimum-weight frames was aimed under the above mentioned loads and constraints. Optimization methods have to be suitable for employing discrete design variables because of using standard steel sections in the design of steel frames. Tabu search is suitable optimization method for using discrete design variables. Optimum designs of two steel space frame were performed to show the applications of the developed algorithms and computer programs.

**Keywords:** Steel space frames, nonlinear analysis, optimum design, tabu search.

**GEOMETRİK OLARAK LİNEER OLMAYAN UZAY ÇELİK ÇERÇEVELERİN TABU ARAMA YÖNTEMİ İLE OPTİMUM BOYUTLANDIRILMASI**

**ÖZET**

Bu çalışmada, uzay çelik çerçevelerin tabu arama yöntemiyle optimum boyutlandırması için bir algoritma ve bunun bilgisayar programı geliştirilmiştir. Tabu aramada iki yöntem kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çerçevelerin analizinde geometrik bakımdan lineer olmama etkileri göz önüne alınmış, malzeme lineer elastik kabul edilmiştir. Çerçevelere etki eden yatay ve düşey yük değerleri ile yanal deplasman, görelî kat ötelenmesi ve gerilme sınırlayıcıları ilgili boyutlandırma yönetmeliklerine uygun olarak alınmıştır. Ayrıca optimum boyutlandırmada kesit boyut sınırlayıcıları da kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen yükler ve sınırlayıcılar altında minimum ağırlıklı çerçevelerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çelik çerçevelerin boyutlandırmasında standart çelik profiller kullanıldığından optimizasyon yönteminin ayrık boyutlandırma değişkenlerine uygun bir yöntem olması gerekmektedir. Tabu arama bu duruma uygun bir optimizasyon yöntemidir. Geliştirilen algoritma ve bilgisayar programının uygulaması olarak iki tane uzay çelik çerçevenin optimum boyutlandırması yukarıda bahsedilen yöntemlerle yapılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Uzay çelik çerçeveler, lineer olmayan analiz, optimum boyutlandırma, tabu arama.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Autor: e-mail/e-ileti: hsedat@dicle.edu.tr; Tel: (0412) 248 84 02

## 1. GİRİŞ

Tabu, sözlüklerde herhangi bir şeyin dini veya ahlaki sebeplerle yasaklanması olarak tanımlanır. Optimizasyon problemlerinde ise, optimum boyutlandırmayı (tasarım) elde etmek için kullanılan yasaklar ve kısıtlamaları ifade etmektedir.

Tabu arama (TA), optimum tasarımı elde etmek için tasarım uzayını hareket mekanizmasıyla araştıran ve yapay hafıza görevi gören tabu listesi sayesinde daha önceki tasarımları üretmeyerek lokal optimumlardan kurtulan gelişmiş bir arama yöntemidir. TA'nın esasları çok önceleri verilmesine rağmen [1], bugün kullanılan şekli Glover tarafından açıklanmıştır [2-3]. TA şimdiye kadar elektronik devre tasarımı [4], iş çizgeleme [5-6], kesim problemleri [7], parça tasnifi [8], araç güzergah problemleri [9], tarımsal sistemlerin planlanması [10], telekomünikasyon ağlarının optimizasyonu [11], düzlem ve uzay kafes sistemlerin optimizasyonu [12-18], büyük ölçekli devre tasarımları [19], radar sistemlerinin tasarımı [20], elektrik dağıtım şebekelerindeki kayıpların minimizasyonu [21] gibi birçok farklı alana uygulanmış güçlü bir optimizasyon yöntemidir. TA konusunda detaylı bilgi ve yöntemin daha birçok uygulaması ilgili kaynaklarda mevcuttur [22-23].

Yukarıda yapılan literatür araştırmasından görüleceği üzere bir çok bilim dalında olduğu gibi tabu arama yönteminin yapı mühendisliğinde de uygulamaları mevcuttur. Bununla birlikte yapı mühendisliğinde tabu arama yöntemi kullanılarak yapılan tüm çalışmalar sadece düzlem ve uzay kafes sistemlerin optimizasyonu ile sınırlı kalmıştır. Bu çalışmanın amacı ise uzay çelik çerçevelerin optimum tasarımını tabu arama yöntemi ile yapmaktır. TA'da iki çözüm yöntemi geliştirilmiş bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Optimum tasarımda kullanılan sınırlayıcılar; gerilme, yanal deplasman, görelî kat ötelenmesi sınırlayıcıları olup ilgili yönetmeliklere uygun biçimde seçilmiştir. Bunun yanında konstrüktif nedenlerden dolayı kesit boyut sınırlayıcıları da kullanılmıştır.

## 2. TABU ARAMA

TA çözüm uzayındaki arama işlemini komşu arama ile yapmaktadır. Komşu aramada, herhangi bir olası tasarımın diğer olası tasarımlardan oluşan komşuları olduğu kabul edilir. Optimizasyon probleminde ise olası birçok tasarım içinde amaç fonksiyonunu minimum yapan tasarım aranır. Bu amaçla çözüm uzayında hareket mekanizmasıyla mevcut tasarımdan bu tasarıma komşu olan tasarımlara gidilir. Komşu aramada komşuluğun karşılıklı olduğu kabul edilir. Yani X tasarımı, Y tasarımının bir komşusu ise, Y tasarımı da X tasarımının bir komşusudur.

TA'da arama boyunca en iyi komşu tasarımların elde edilmesini sağlayan hareketler yapay bir hafızaya kaydedilir. Bu hafıza kısa dönemli hafıza olarak adlandırılır. Bu yapay hafıza kullanılarak aramada önceki tasarımların tekrar elde edilmesini sağlayacak hareketler yasaklanır. Arama esnasında yapılması yasaklanan bu hareketlere tabu denir. Tabu hareketler tabu listesi adı verilen ve yapay hafıza görevi gören tek boyutlu bir listede muhafaza edilir. Tabu listesine kaydedilen her hareket bir tasarım değişkenini temsil eder. TA'da her tasarım değişkeni için tanımlanan komşu tasarımlar içerisinde en iyi olan tasarım tabu listesi de kontrol edilerek mevcut tasarımın yerini alır. Arama işlemine mevcut tasarımın yerini alan en iyi komşu tasarım ile devam edilir. Aynı işlem diğer tasarım değişkenleri için de tekrarlanarak bir iterasyon tamamlanır. Kabul edilen durdurma kriteri sağlanıncaya kadar her iterasyon için bu işlemler tekrarlanır. Bu çalışmada kullanılan tabu arama algoritmasında maksimum iterasyon sayısının aşılması durdurma kriteri olarak kullanılmıştır.

TA'da herhangi bir iterasyonda X tasarımından bu tasarımın en iyi komşusu olan Y tasarımına bir hareket gerçekleştiğinde bu hareket tabu listesine kaydedilir. Mevcut bir X tasarımından  $h_1$  hareketi ile en iyi Y komşu tasarımına gidilsin,  $Y=h_1(X)$ . Bir sonraki iterasyonda mevcut tasarım olan Y tasarımının en iyi komşu tasarımı X olabilir. Y tasarımından  $h_2$  hareketi ile X tasarımına gidilir,  $X=h_2(h_1(X))$ . Bu olasılığın gerçekleşmesi durumunda aramada aynı tasarım

etrafında bir çevrim oluşacaktır. Tabu listesi ile bu durum yasaklanmakta ve aramanın çözüm uzayında farklı alanlara yönelmesi sağlanmaktadır.

TA'da yapılan bir hareketin ne kadar süreyle tabu listesinde kalacağı tabu listesi uzunluğu ile belirlenir. Tabu listesinin yeniliğe dayanan bir hafıza yapısı bulunmaktadır. Buna göre tabu olan hareketlerin sayısı tabu listesi uzunluğuna eriştiğinde tabu listesinin en başında olan en eski hareket listeden çıkarılır. Liste bir sıra yukarı hareket ettirilerek listenin ikinci sırasındaki hareket birinci sıraya, üçüncü sırasındaki hareket ikinci sıraya gelir bu şekilde devam edilerek en son tabu olan hareket sondan bir önceki sıraya gelir. Boşalan son sıraya ise yeni yapılan hareket yerleşir. Yeniliğe dayanan hafıza yapısını kullanan TA'da tabu listesinin uzunluğu oldukça önemlidir. Eğer tabu listesi çok uzun olursa aramada hareketlerin çoğu tabu olacağından TA'nın hareket kabiliyeti azalır. Tersine tabu listesinin çok kısa seçilmesi durumunda ise aynı tasarımlar etrafında çevrim olabileceğinden arama başlangıç tasarımının yakınında lokal bir optimuma yakınsayabilir. Bu çalışmada tabu listesinin uzunluğu sabit bir tamsayı olarak seçilmiştir. Buna göre tabu listesi uzunluğu  $t$  olmak üzere tabu listesine kaydedilen bir hareketin, bu hareketten sonra  $t$  adet yeni hareket yapılmıncaya kadar tekrar edilmesine izin verilmez.  $t$  adet yeni hareket yapıldıktan sonra hareketin tabu durumu kaldırılır ve bu hareket tabu listesinden çıkartılır.

Tabu yıkma kriterleri, tabu olan bir hareketin bazı şartları sağlaması durumunda tabu olmasına rağmen yapılabilmesini sağlayan kriterlerdir. Bu kriterlerle tabu listesi ile kısıtlanan aramaya esneklik kazandırılmaktadır [15]. Literatürde en çok kullanılan tabu yıkma kriteri aspirasyon kriteridir. Buna göre; yapılan bir hareket sonucunda şimdiye kadar elde edilen en iyi tasarımdan daha iyi bir tasarım bulunursa bu hareket tabu olsa dahi kabul edilir. Bu kriterle kabul edilen bir hareketin tabu olma durumu kaldırılmaz ve hareket tabu listesinden çıkarılmaz. Sadece hareketin tabu olma durumu aspirasyon kriterini sağladığı için geçici olarak göz ardı edilir. TA'da tabu listesi dışında aspirasyon listesi adı verilen ve tek bir değer ihtiva eden bir liste daha vardır. Bu listeye arama boyunca optimizasyon sınırlayıcılarını sağlayan tasarımlar kaydedilir. Arama esnasında sınırlayıcıların tamamını sağlayan bir tasarımla karşılaşıldığında bu tasarım aspirasyon listesine kaydedilir. Herhangi bir iterasyonda aspirasyon listesindeki tasarımdan daha hafif bir tasarım bulunursa bu tasarım tabu olan bir hareket sonucunda elde edilmiş bile olsa kabul edilir ve aspirasyon listesindeki mevcut tasarımın yerini alır.

TA'da tabu listesi ve aspirasyon kriteri kısa dönemli hafıza görevi görmektedir. Bununla birlikte kısa dönemli hafıza ile beraber uzun dönemli hafızanın da kullanılması arama işleminin daha kuvvetli bir hal almasını sağlayabilir. Uzun dönemli hafıza ile arama esnasında elde edilen en iyi tasarımlara dönüş yapılarak bu tasarım bölgelerinde daha detaylı bir araştırma yapılır. Böylece bu bölgelerde bulunabilecek daha iyi tasarımların elde edilmesi olasılığı değerlendirilir. Uzun dönemli hafıza aramanın lokal olarak kuvvetlenmesini, global olarak ise çeşitlenmesini sağlamak için kullanılır [23]. Bu çalışmada uzun dönemli hafıza olarak kuvvetlendirme stratejileri kullanılmıştır. Bu stratejiye göre aramada belli bir iterasyona kadar kısa dönemli hafıza kullanılır. Önceden belirlenen iterasyona gelindiğinde o ana kadar ki en iyi tasarıma geri dönülür ve bu tasarım sonraki iterasyon için başlangıç tasarımı olarak alınır. Bu esnada tabu ve aspirasyon listesindeki bilgiler silinmeyerek yeni bir çözüm yolu araştırılır.

Çelik çerçevelerin TA ile optimum tasarımında öncelikle rastgele bir başlangıç tasarımı üretilir. Daha sonra her eleman grubu bir defa seçilmek şartıyla rastgele bir grup seçilir. Profil kesit listesinde bu grubu temsil eden profile komşu olan profiller belirlenir. Bu belirleme komşu derinliğine göre yapılır. Örneğin komşu derinliği  $\pm 1$  ise; diğer gruplara ait profil kesitler aynı kalmak koşuluyla bu profilin kesit listesinde bir üstünde ve bir altında bulunan profiller sırasıyla bu profilin yerine konarak, iki ayrı tasarım yapılır. Tabu listesi ve aspirasyon kriteri kontrol edilmek şartıyla bu iki tasarımdan hafif olanı mevcut tasarımın yerini alır. Dikkat edilirse komşu derinliğinin  $\pm 1$  olması durumunda iki ayrı tasarım yapılmaktadır. Benzer biçimde komşu derinliğinin  $\pm 2$  olması durumunda seçilen gruba ait profilin kesit listesinde bir ve iki üstündeki profiller sırasıyla mevcut profilin yerine konarak iki farklı tasarım yapılır. Gene seçilen gruba ait

profilin kesit listesinde bir ve iki altındaki profiller mevcut profilin yerine konarak ayrı ayrı iki tasarım daha yapılır. Böylece komşu derinliğinin  $\pm 2$  olması durumunda dört farklı tasarım yapılır. Bu durum genelleştirilirse; komşu derinliğinin  $\pm\beta$  olması halinde  $2 \times \beta$  kadar komşu tasarım yapılarak bunlar içinde en hafif olan tasarım tabu listesi ve aspirasyon kriteri kontrol edilerek mevcut tasarımın yerini alır. Burada  $\beta$  bir tamsayıdır.

TA'da tabu listesinin çalışma mekanizması şu şekildedir; mevcut tasarımda rastgele seçilen bir tasarım değişkeni için komşu derinliğinde yapılan hareketler sonucu elde edilen tasarımlardan en hafif olanının, tasarım değişkenlerinin tabu listesinde olup olmadığı tek tek kontrol edilir. En az bir tasarım değişkeni dahi tabu listesinde değilse bu tasarım mevcut tasarımın yerine geçer. Tüm tasarım değişkenleri tabu listesinde ise aspirasyon kriteri kontrol edilir. Aspirasyon kriterinin sağlanması durumunda bu tasarım gene mevcut tasarımın yerine geçer. Aynı işlemler her grup için tekrarlanarak bir iterasyon tamamlanır. Maksimum iterasyon sayısına varıncaya kadar her iterasyonda yukarıdaki işlemler tekrarlanır.

### 3. OPTİMUM TASARIM PROBLEMİ

Lineer olmayan uzay çelik çerçevelerin optimum tasarım problemi şu şekilde tanımlanabilir.

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

Burada;  $W(x)$  çerçeve ağırlığını,  $A_k$  k'nci gruptaki elemanların kesit alanını,  $mk$  k'nci gruptaki toplam eleman sayısını,  $\rho_i$  ve  $L_i$  i'nci elemanın özgül ağırlığı ve uzunluğunu,  $ng$  ise çerçevedeki toplam grup sayısını gösterir. Optimum tasarımda kullanılan sınırlayıcılar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Yanal deplasman sınırlayıcısı ;

$$g_i(x) = \frac{\delta_i}{\delta_{iu}} - 1.0 \leq 0 \quad ; i=1, \dots, p \quad (2)$$

şekindedir. Burada;  $\delta_i$  i'nci sınırlanmış deplasman değeri,  $\delta_{iu}$  sınırlanmış deplasmanın üst sınırını,  $p$  ise çerçevedeki sınırlanmış deplasmanların toplam sayısını göstermektedir.

Görel kat ötelenmesi sınırlayıcısı;

$$g_j(x) = \frac{(\delta_{ju} - \delta_{ja})}{\delta_{js}} - 1.0 \leq 0 \quad ; j=1, \dots, ncl \quad (3)$$

şekindedir. Burada;  $\delta_{ju}$  j'nci kolonun üst ucundaki deplasman değeri,  $\delta_{ja}$  j'nci kolonun alt ucundaki deplasman değeri,  $\delta_{js}$  j'nci kolon için görel kat ötelenmesi sınır değeri,  $ncl$  ise çerçevedeki toplam kolon sayısını göstermektedir.

Konstrüktif nedenlerle kullanılan kesit sınırlayıcıları aşağıdaki biçimde verilebilir.

$$g_k(x) = \frac{b_{kfb}}{b_{kfc}} - 1.0 \leq 0 \quad ; k=1, \dots, nns \quad (4a)$$

$$g_k(x) = \frac{b_{kfb'}}{(d_{kbc} - 2t_{kfb})} - 1.0 \leq 0 \quad ; k=1, \dots, nns \quad (4b)$$

$$g_l(x) = \frac{d_{ld}}{d_{le}} - 1.0 \leq 0 \quad ; l=1, \dots, ncl \quad (4c)$$

Bu denklemlerde;  $b_{kfb}$  k'nci düğüm noktasına yapı X (Şekil 2) eksenini doğrultusunda bağlanan kirişin  $b_f$  başlık genişliği,  $b_{kfc}$  k'nci düğüm noktasındaki kolonun  $b_f$  başlık genişliği,  $b_{kfb'}$

k'ncı düğüme bağlanan yapı Y eksenine doğrultusundaki kirişin  $b_f$  başlık genişliği,  $d_{kbc}$  k'ncü düğüm noktasındaki kolonun  $d$  gövde derinliği,  $t_{kfb}$  k'ncü düğümdeki kolonun  $t_f$  başlık kalınlığı,  $d_{ld}$  gözönüne alınan kolonun  $d$  gövde derinliği,  $d_{le}$  gözönüne alınan kolonun alt katındaki kolonun  $d$  gövde derinliği,  $nns$  mesnetler hariç toplam düğüm noktası,  $ncl$  zemin kat kolonları hariç toplam kolon sayısıdır.

Eksenel basınç kuvvetinin eğilme momenti ile birlikte etkimesi durumunda çubukta eğilmeli burkulma durumu oluşacaktır. Bu durum için gerilme kontrolleri ile ilgili tüm denklemler ve hesap esasları TS 648 [24] yönetmeliğinden alınmıştır. Eksenel basınç ve eğilmeye maruz çubuklar için oluşacak bileşik gerilme durumunun kontrolünde,

$$g_n(x) = \frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{bem}} + \frac{C_{mx}}{\left(1 - \frac{\sigma_{eb}}{\sigma'_{ex}}\right)} \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{Bx}} + \frac{C_{my}}{\left(1 - \frac{\sigma_{eb}}{\sigma'_{ey}}\right)} \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{By}} - 1.0 \leq 0 \quad ; n=1, \dots, nb \quad (5)$$

$$g_n(x) = \frac{\sigma_{eb}}{0.6\sigma_a} + \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{bx}} + \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{by}} - 1.0 \leq 0 \quad ; n=1, \dots, nb \quad (6)$$

şeklinde dir. Eğer  $\sigma_{eb}/\sigma_{bem} \leq 0.15$  ise (5) ve (6) denklemleri yerine sadece,

$$g_n(x) = \frac{\sigma_{eb}}{\sigma_{bem}} + \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{Bx}} + \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{By}} - 1.0 \leq 0 \quad ; n=1, \dots, nb \quad (7)$$

denklemleri kullanılabilir. (5)-(7) denklemlerindeki  $nb$  çerçevedeki toplam eleman sayısını göstermektedir.

Yukarıdaki bağıntılarda;  $\sigma_{eb}$  yalnız eksenel basınç kuvveti etkimesi halinde hesaplanan gerilme,  $\sigma_{bem}$  yalnız eksenel basınç kuvveti etkimesi halinde müsaade edilen gerilme,  $\sigma_{bx}$  yalnız  $M_x$  eğilme momenti etkisi altında hesaplanan basınç-eğilme başlığı gerilmesi,  $\sigma_{by}$  yalnız  $M_y$  eğilme momenti etkisi altında hesaplanan basınç-eğilme başlığı gerilmesi,  $\sigma_{Bx}$  yalnız  $M_x$  eğilme momenti etkimesi halinde müsaade edilen basınç-eğilme başlığı gerilmesi,  $\sigma_{By}$  yalnız  $M_y$  eğilme momenti etkimesi halinde müsaade edilen basınç-eğilme başlığı gerilmesi,  $\sigma'_{ex}$  x-x asal eksenine etrafındaki burkulmalar için hesaplanan gerilme,  $\sigma'_{ey}$  y-y asal eksenine etrafındaki burkulmalar için hesaplanan gerilme,  $C_{mx}$  ve  $C_{my}$  sırasıyla  $M_x$  ve  $M_y$  moment diyagramlarına ve hesap yapılan düzleme dik doğrultudaki çubuğun tutulma düzenini göz önüne alan katsayılar olup yanal deplasmanın mümkün olduğu çerçevelerde 0.85 alınır,  $\sigma_a$  ise çeliğin akma dayanımıdır.

Eksenel çekme ve eğilmeye maruz çubuklar için (6) denkleminin sağlanması gerekmektedir. Bu durumda  $\sigma_{eb}$  yalnız eksenel çekme kuvveti etkimesi halinde hesaplanan gerilme gerilme,  $\sigma_{bx}$  ve  $\sigma_{by}$  sırasıyla  $M_x$  ve  $M_y$  eğilme momentlerinin etkimesi halinde hesaplanan eğilme-çekme gerilmeleridir.

Çubukların burkulma boyunun hesabında çubuğun gerçek boyu  $K$  etkili kolon uzunluk faktörü ile çarpılır. Bu faktör yanal deplasmanın mümkün olduğu uzay çerçevelerde aşağıdaki denklemlerle hesaplanır [25].

$$K_x = \sqrt{\frac{1.6G_{Ax}G_{Bx} + 4(G_{Ax} + G_{Bx}) + 7.5}{G_{Ax} + G_{Bx} + 7.5}} \quad (8a)$$

$$K_y = \sqrt{\frac{1.6G_{Ay}G_{By} + 4(G_{Ay} + G_{By}) + 7.5}{G_{Ay} + G_{By} + 7.5}} \quad (8b)$$

Bu denklemlerde  $K_x$  eğilmede kuvvetli olan yapı Y eksenindeki etkili kolon uzunluk faktörü,  $K_y$  eğilmede zayıf olan yapı X eksenindeki etkili kolon uzunluk faktörüdür.  $G_{Ax}$ ,  $G_{Bx}$  sırasıyla kolonların üst ve alt uçları için yapı Y eksenindeki rijitlik dağıtım faktörleri,  $G_{Ay}$ ,  $G_{By}$  kolonların üst ve alt uçları için yapı X eksenindeki rijitlik dağıtım faktörleri olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{Ax} = \left( \frac{\sum I_c/s_c}{\sum I_g/s_g} \right)_{x-x} ; \quad G_{Ay} = \left( \frac{\sum I_c/s_c}{\sum I_g/s_g} \right)_{y-y} \quad (9a)$$

$$G_{Bx} = \left( \frac{\sum I'_c/s'_c}{\sum I'_g/s'_g} \right)_{x-x} ; \quad G_{By} = \left( \frac{\sum I'_c/s'_c}{\sum I'_g/s'_g} \right)_{y-y} \quad (9b)$$

(9a) ve (9b) denklemlerinde parantez dışındaki indisler ilgili eksen göstermek üzere;  $I_c$  ve  $I'_c$  gözönüne alınan kolonun sırasıyla üst ve alt ucuna rijit olarak bağlanan kolonların atalet momentlerini,  $I_g$  ve  $I'_g$  gözönüne alınan kolonun üst ve alt ucuna rijit bağlı kirişlerin atalet momentlerini,  $s_c$  ve  $s'_c$  gözönüne alınan kolonun üst ve alt ucuna rijit bağlı kolonların boyunu,  $s_g$  ve  $s'_g$  gözönüne alınan kolonun alt ve üst ucuna rijit bağlı kirişlerin boyunu göstermektedir. Ankastr mesnetler için  $G_i=1.0$  değeri alınır. TA ile yapılan optimum tasarımlarda literatürde iki farklı yaklaşım kullanıldığı görülmektedir. Birincisi; sınırlayıcıları sağlamayan çözümlerin direk olarak reddedilmesidir. Bu yöntem ile optimum tasarımların elde edilmesi tüm çözüm uzayının aranması ile mümkündür. Aksi halde yöntemin lokal optimumlara yakınsaması kaçınılmaz olacaktır [13]. İkinci yaklaşımda ise arama boyunca elde edilen tasarımlar sınırlayıcıları sağlamasa dahi reddedilmemektedir. Böylece arama daha geniş bir çözüm uzayında gerçekleşmekte ve birinci yaklaşıma göre daha iyi sonuçlar elde edilmektedir [13]. Bu çalışmada ikinci yaklaşım kullanılmıştır. Buna göre optimum tasarımda kullanılan sınırlayıcısız amaç fonksiyonu aşağıdaki biçimde verilebilir.

$$\phi(x) = W(x) \left( 1 + R \sum_{i=1}^m c_i \right) \quad (10)$$

Burada m toplam sınırlayıcı sayısı, R probleme özgü bir sabit olup bu çalışmada 0.9 alınmıştır.  $c_i$  ise ihlal edilme katsayısı olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

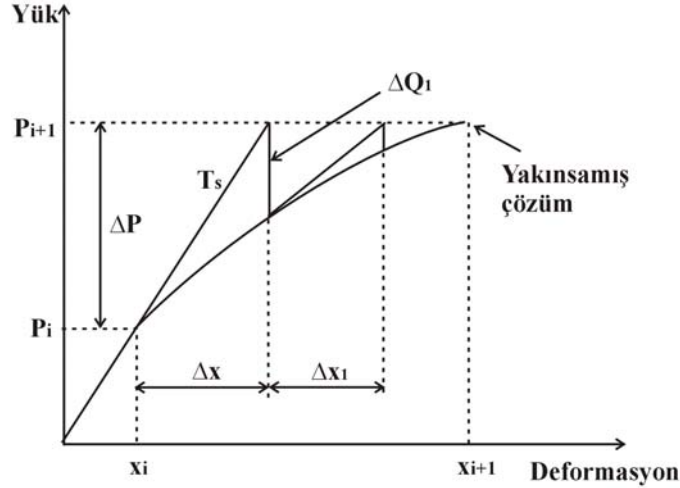
$$\begin{aligned} g_i(x) > 0 \text{ ise } c_i &= g_i(x) \\ g_i(x) \leq 0 \text{ ise } c_i &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

TA'da yapılan her tasarımda sınırlayıcıların ihlal edilip edilmediğinin tespiti için çerçevedeki deplasman ve gerilme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu ise uzay çelik çerçevelerin lineer olmayan analizi ile mümkündür. Bu nedenle bundan sonraki kısımda bu çalışmada kullanılan lineer olmayan analiz kısaca açıklanacaktır.

#### 4. UZAY ÇELİK ÇERÇEVELERİN LİNEER OLMAYAN ANALİZİ

Bu çalışmada lineer olmayan davranışların hesaplanması için kaynak [26]'da açıklanan Newton-Raphson algoritması ve bilgisayar program kodu kullanılmıştır. Geometrik rijitlik matrisi ise kaynak [27]'deki gibidir. Newton-Raphson çok bilinen bir nümerik algoritma olduğundan burada detaylı olarak açıklanmayacaktır.

Verilen her bir yük artımı için düğüm dengesinin elde edilmesini sağlayan Newton-Raphson iterasyonun hesap yöntemi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Lineer olmayan analiz için hesaplama adımları

Burada  $P_i$  ve  $x_i$   $i$ 'nci adımdaki yük ve deplasman değeri,  $P_{i+1}$  ve  $x_{i+1}$   $(i+1)$ 'nci adımdaki yük ve deplasman değeridir.  $\{\Delta P\}$ ,  $\{\Delta x\}$  ve  $[T_s]$  sırasıyla yük artımı, deplasman artımı ve sistem rijitlik matrisi,  $\{\Delta Q\}$  dengelenmemiş düğüm yükleridir.

$\{\Delta Q\}_j / \{\Delta P\}$  oranı  $\epsilon$  ile gösterilen ( $\epsilon=0.0001$ ) sifra çok yakın belli küçük bir değerin altına ininceye Şekil 1'de gösterilen adımlar tekrarlanır. Bu çalışmada  $\{P\}_{i+1}$  yük artımı her iterasyonda sabit bir değer almaktadır. Nihai yük artımı sonunda elde edilen eleman kuvvetleri çerçevenin aranan eleman kuvvetleridir.

## 5. UZAY ÇELİK ÇERÇEVELERİN TABU ARAMA YÖNTEMİYLE OPTİMUM TASARIM ALGORİTMASI

TA ile optimum tasarımda iki algoritma kullanılmıştır. Bunlardan birincisi; tabu listesi ve aspirasyon kriteri gibi tabu aramada kısa dönemli hafıza özelliklerine sahip algoritmadır (TA-I). İkincisi ise birinci algoritmadaki kısa dönemli hafıza özelliklerine ilave olarak uzun dönemli hafıza özelliğini kullanan algoritmadır (TA-II). Aşağıda TA-II yönteminin algoritması verilmiştir. Bu algoritmadaki 9'ncü adım çıkarılırsa sadece kısa dönemli hafızanın kullanıldığı TA-I yönteminin algoritması elde edilir. Verilen algoritmada; çerçevenin her bir tasarımı  $ng$  adet eleman gruplarından oluşur;  $ig=1, \dots, ng$ . Her grup profil kesit listesindeki bir kesitle temsil edilir ve tasarım değişkeni adını alır. Tabu listesi uzunluğu  $itl$  ile gösterilen bir tamsayıdır. Aramada komşu derinliği  $\pm 6$  seçilmiştir;  $imv=-6, \dots, -2, -1, 1, 2, \dots, 6$ . Tabu aramada maksimum iterasyon sayısı  $kl$  olarak alınan bir tamsayıdır;  $mi=1, \dots, kl$ . Buna göre uzay çelik çerçevelerin tabu arama yöntemiyle optimum tasarımı için geliştirilen algoritma şu adımlardan oluşmaktadır.

1.  $mi=0$  değerini ata.
2. Rastgele bir  $X_0$  başlangıç tasarımı üret, bu tasarıma ait  $f(X_0)$  amaç fonksiyonunu hesapla, bu tasarımı  $X_c$  mevcut tasarım olarak ata,  $X_c=X_0$ .
3. Hareket mekanizmasını uygulamak için rastgele bir tasarım değişkeni seç.  $ig \in [1, \dots, ng]$  olmak üzere her tasarım değişkeni sadece bir defa seçilecektir.
4.  $ig$ 'nci grupta her komşu  $imv$  değeri için aspirasyon kriterini kontrol ederek sırasıyla tabu olmayan  $X_{p1}$  komşu tasarımlarını hareket mekanizmasıyla elde et. Bu tasarımlara ait  $f(X_{p1})$  amaç fonksiyonları içinde minimum değerli olanı seç,  $f(X_{p0})=\min f(X_{p1})$ .

5.  $f(X_{pl})$  değerini aspirasyon listesinde bulunan ve  $f(X_g)$  ile gösterilen mevcut optimum tasarımıyla kıyasla. Eğer  $f(X_{pl}) \leq f(X_g)$  ise minimum değerli komşu tasarımı,  $X_g$  mevcut optimum tasarım ve  $X_c$  mevcut tasarım olarak ata.,  $X_g=X_{pl}$  ve  $X_c=X_{pl}$  7. adıma git.  $f(X_{pl}) \leq f(X_g)$  şartı sağlanmıyorsa 6. adıma git.

6. Eğer  $f(X_{pl}) > f(X_g)$  ise minimum değerli komşu tasarımı sadece mevcut tasarım olarak ata,  $X_c=X_{pl}$ .

7. Tabu ve aspirasyon listelerini güncelle. Eğer tabu listesi uzunluğu itl aşılırsa listenin başındaki en eski hareketi listeden çıkar. Listeyi bir sıra yukarı kaydır, boşalan son sıraya yeni hareketi kaydet.

8. Tüm tasarım değişkenleri birer kez seçilmişse 9. adıma git, değilse 3. adıma git.

9. Eğer  $m_i=100$  ise  $m_i=m_i+1$  ve önceki yüz iterasyon için elde edilen  $X_g$  mevcut optimum tasarımı başlangıç tasarımı olarak ata, 3'ncü adıma git. Değilse 10'ncü adıma git.

10.  $m_i \leq k_l$  ise  $m_i=m_i+1$  değerini ata ve 3. adıma git, değilse tabu arama işlemini bitir. Aspirasyon listesinde bulunan  $X_g$  tasarımı optimum tasarım,  $f(X_g)$  ise çerçevenin optimum ağırlığıdır.

## 6. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmadaki tüm uygulamalarda malzeme çelik olup elastisite modülü  $E=1.999 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup>, akma dayanımı  $\sigma_a=248211.28$  kN/m<sup>2</sup>, özgül ağırlığı  $\rho=76.8195$  kN/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Lineer olmayan analiz için yük adımları eşit olup yük adımı sayısı beş seçilmiştir. Optimum tasarımda ülkemizdeki kesit listelerinin profil sayısının az olmasından dolayı 128 adet Amerikan geniş başlıklı I profili (W kesitler) kullanılmıştır [28].

Uzay çerçevelerde ölü yük 3.25 kN/m<sup>2</sup>, hareketli yük 2.0 kN/m<sup>2</sup> ve hareketli çatı yükü için 2.0 kN/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Geliştirilen bilgisayar programı genel olup yatay yük olarak deprem veya rüzgar yükleri seçilebilir. Bu çalışmada yatay yük olarak rüzgar yükleri göz önüne alınmıştır. Çerçevelere etki eden rüzgarın pozitif yapı Y doğrultusunda estiği kabul edilmiştir. Rüzgar yükü TS 498 [29] yönetmeliğine göre  $W=C \times q$  bağıntısıyla hesaplanmıştır. Bu bağıntıda; W rüzgar yükü, C yapı cinsine göre verilen bir katsayı olup basınç yüzünde +0.8, emme yüzünde ise -0.4 alınmıştır, q ise hız basıncı değeri olup çerçevenin zeminden yüksekliğine göre belirlenir. Hesaplanan rüzgar yükü yapı Y doğrultusunda mesnetler haricindeki dış kiriş-kolon düğümlerine etki ettirilmiştir. Her iki uygulamada da kolonların eğilmede kuvvetli eksenleri yapı Y doğrultusundadır. Uygulamalar Pentium IV 2.4 Ghz mikro işlemcili kişisel bilgisayarda icra edilmiştir. Her iki TA yönteminde aynı durdurma kriteri kullanıldığından hesaplama süreleri birbirine eşittir.

Çalışmadaki tüm örneklerde en üst katın yanal deplasmanları sınırlandırılmıştır. Bu sınırlama tüm çerçeve yüksekliği H olmak üzere en üst kattaki her düğüm noktası için  $H/400$  olarak alınmıştır. Katlar arası görelî ötelenme sınırlaması ise h kolon uzunluğu olmak üzere  $h/300$  alınmıştır.

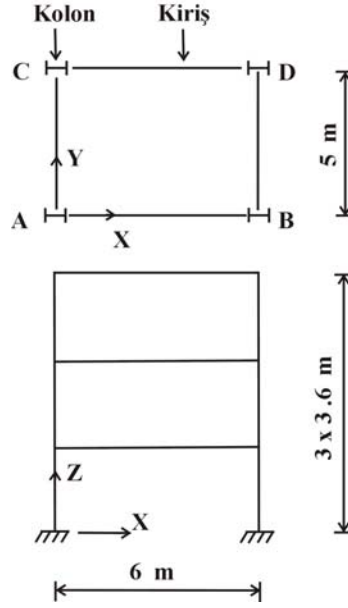
Tüm örneklerde maksimum iterasyon sayısı 200 olup, tabu aramada kısa dönemli hafıza ile birlikte uzun dönemli hafıza'nın da kullanıldığı ikinci yöntemde maksimum iterasyon sayısı ikiye bölünmüş ve arama işlemi esnasında yüzüncü iterasyona gelindiğinde, önceki yüz iterasyon boyunca elde edilen en iyi tasarım başlangıç tasarımı olarak seçilmiş ve yüzbirinci iterasyonda arama işlemine bu tasarımdan devam edilmiştir.

### 6.1. Yirmidört Elemanlı Uzay Çerçeve

Yirmidört elemanlı uzay çelik çerçeve Şekil 2'deki gibi üç gruba ayrılmıştır. I'nci grup; yapı X doğrultusundaki kirişler, II'nci grup; yapı Y doğrultusundaki kirişler, III'ncü grup; çerçevedeki kolon elemanlarıdır. Çerçevede en üst kat düğüm noktalarının yanal deplasmanları 2.7 cm ile, katlar arası görelî ötelenmede 1.20 cm ile sınırlandırılmıştır. Şekil 2'de planda AB ile gösterilen



taraf rüzgarın basınç kuvveti olarak etki ettiği yüz, CD ile gösterilen taraf rüzgarın emme olarak etki ettiği yüzüdür. Bu çerçeve için optimum tasarım sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Yirmidört elemanlı uzay çerçeve

**Çizelge 1.** Yirmidört elemanlı uzay çerçevede optimum tasarım sonuçları

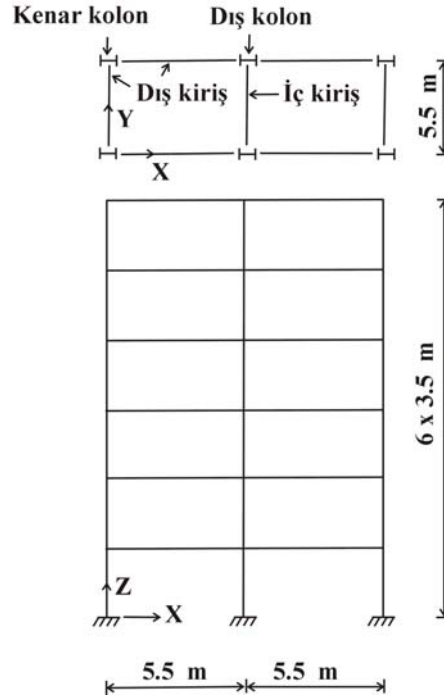
Grup no.	TA-I	TA-II
1	W18×35	W18×35
2	W18×35	W14×34
3	W18×71	W21×68
Ağırlık (kg)	7997.87	7773.34

Çizelge 1’den görüleceği üzere TA-II ile TA-I’e göre % 2.8 daha hafif bir tasarım elde edilmiştir. En üst kat en büyük yanıl ötelenme değeri TA-I’de 2.26 cm, TA-II’de 2.39 cm’dir. Katlar arası görelil ötelenmenin en büyük değeri birinci kat kolonlarında TA-I için 1.16 cm, TA-II için 1.20 cm ile sınır değeri almıştır. Gerilme sınırlayıcıları her iki tasarımda da birinci kat kolonlarında aktif, diğler çerçeve elemanlarında pasiftir. Hesaplama süresi 1 sa 9 dk olarak gerçekleşmiştir. Optimum tasarımda kullanılan yanıl deplasman, gerilme, görelil kat ötelenmesi ve kesit-boyut sınırlayıcıları tasarım uzayındaki aramaları kısıtlamaktadır. Dolayısıyla uygun kesitlerden oluşun başka tasarımlar mevcut sınırlayıcıların en az birini sağlamaması durumunda optimum tasarım olarak kabul edilmemektedir.

## 6.2. Yetmişsekiz Elemanlı Uzay çerçeve

Şekil 3’de verilen yetmişsekiz elemanlı uzay çelik çerçeve sekiz gruba ayrılmıştır. I’nci grup; 6,5 ve 4’ncü katların dış kirişleri, II’nci grup; 3,2 ve 1’nci katların dış kirişleri, III’ncü grup; 6,5 ve 4’ncü katların iç kirişleri, IV’ncü grup; 3,2 ve 1’nci katların iç kirişleri, V’nci grup; 6,5 ve 4’cü katların kenar kolonları, VI’nci grup; 3,2 ve 1’nci katların kenar kolonları, VII’nci grup; 6,5 ve 4’ncü katların dış kolonları, VIII’nci grup; 3,2 ve 1’nci katların dış kolon elemanlarıdır.

Çerçevede en üst kat düğüm noktalarının yanal deplasmanları 5.25 cm, katlar arası görelî ötelenme 1.17 cm ile sınırlandırılmıştır. Çerçeve için optimum tasarım sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Yetmişsekiz elemanlı uzay çerçeve

Çizelge 2. Yetmişsekiz elemanlı uzay çerçeve için optimum tasarım sonuçları

Grup no.	TA-I	TA-II
1	W18×35	W16×36
2	W18×46	W21×44
3	W21×44	W12×53
4	W14×120	W21×101
5	W12×65	W12×65
6	W21×111	W21×101
7	W24×104	W24×104
8	W24×146	W24×131
Ağırlık (kg)	34816.07	33388.59

Çizelge 2'deki sonuçlara göre TA-II ile TA-I'e göre % 4.1 daha hafif bir çerçeve tasarımı elde edilmiştir. En üst kat en büyük yanal ötelenme değeri orta açıklıktaki düğümlerde TA-I için 4.95 cm ve TA-II için 5.06 cm ile sınır değere yakın değerlerdir. Katlar arası görelî ötelenmenin en büyük değeri ikinci kat orta açıklıktaki kolonlarda TA-I için 1.09 cm ve TA-II için 1.17 cm ile sınır değerde olmuştur. Gerilme sınırlayıcıları her iki tasarımda da birinci ve ikinci kat kolon ve kiriş elemanlarında aktif, diğer elemanlarda pasif kalmıştır. Hesaplama süresi 4 sa 51 dk olmuştur.

## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada geometrik bakımdan lineer olmayan uzay çelik çerçevelerin yanal deplasman, görelî kat ötelenmesi, gerilme ve kesit sınırlayıcıları altında optimum boyutlandırması tabu arama yöntemi ile yapılmıştır. Tabu aramada iki farklı yöntem geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Uzun ve kısa dönemli hafızanın birlikte kullanıldığı TA-II ile sadece kısa dönemli hafızanın kullanıldığı TA-I'e göre sırasıyla % 2.8 ve % 4.1 daha hafif çerçeve tasarımları elde edilmiştir. Dolayısıyla uzun dönemli hafızanın kullanılması tabu arama algoritmasını olumlu yönde etkilemiştir.

2. TA'da karar verilmesi gereken iki kritik problemle karşılaşmıştır. Bunlar komşu derinliğinin en büyük değişim değerinin tespit edilmesi ve en uygun tabu listesini uzunluğunun belirlenmesidir. Bu konuda yapılan detaylı bir çalışma uzay çelik çerçeveler için komşu derinliğinin en büyük değişimin  $\pm 6$  olması durumunda en ekonomik tasarımların elde edildiğini göstermektedir [30]. Tabu listesi uzunluğunun belirlenmesinde iki durumla karşılaşmıştır. Liste uzunluğunun çok kısa seçilmesi durumunda aramanın sürekli olarak aynı tasarımlar etrafında gerçekleştiği bunun sonucunda optimum tasarımların uzağında tasarımların elde edildiği gözlemlenmiş, buna karşın listenin çok uzun seçilmesi durumunda neredeyse tüm hareketler tabu olduğundan aramanın kısıtlı bir çözüm uzayında gerçekleşmesi sonucu lokal optimumlara yakınsamaların olduğu tespit edilmiştir. Hesaplamalardan elde edilen tecrübeler sonucunda tabu listesi uzunluğunun grup sayısının 10 katı olması durumunda uygun sonuçların elde edildiği görülmüştür [30].

3. Bu çalışmada geometrik bakımdan lineer olmama göz önüne alınmakla beraber malzeme lineer-elastik kabul edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda geometrik bakımdan lineer olmama durumunun yanında malzeme bakımından da lineer olmama durumu da göz önüne alınabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar programında kullanılan lineer olmayan analiz program kodunu bizimle paylaşan Prof. Dr. William R. Spillers ve Prof. Dr. Robert Levy'e en içten teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- [1] Glover, F., "Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints", Decision Sciences, 8, 156-166, 1977.
- [2] Glover, F., "Tabu Search-Part I", ORSA Journal on Computing, 1, 3, 190-206, 1989.
- [3] Glover, F., "Tabu Search-Part II", ORSA Journal on Computing, 2, 1, 4-32, 1990.
- [4] Bland, J.A. and Dawson, G.P., "Tabu Search and Design Optimization", Computer-Aided Design, 23, 3, 195-201, 1991.
- [5] Dell'Amico M. and Trubian M., "Applying Tabu Search to the Job-Shop Scheduling Problem", Annals of Operations Research, 41, 231-252, 1993.
- [6] Mooney, E.L. and Rardin, R.L., "Tabu Search for a Class of Scheduling Problems", Annals of Operations Research, 41, 253-278, 1993.
- [7] Blazewicz, J., Hawryluk, P. and Walkowiak, R., "Using a Tabu Search Approach for Solving the Two-Dimensional Irregular Cutting Problems", Annals of Operations Research, 41, 313-325, 1993.
- [8] Salomon, M. and Kuik R., "Statistical Search Methods for Lotsizing Problems", Annals of Operations Research, 41, 453-468, 1993.

- [9] Semet, F. and Taillard E., "Solving Real-Life Vehicle Routing Problems Efficiently Using Tabu Search", *Annals of Operations Research*, 41, 469-488, 1993.
- [10] Mayer, D.G., Belward, J.A. and Burrage, K., "Tabu Search not an Optimal Choice for Models of Agricultural Systems", *Agricultural Systems*, 58, 2, 243-251, 1998.
- [11] Eugenio, C., Fanni, A. and Giacinto, G., "A Tabu Search Algorithm for the Optimisation of Telecommunication Networks", *European Journal of Operational Research*, 106, 2-3, 357-372, 1998.
- [12] Hu, N., "Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35, 1055-1070, 1992.
- [13] Dhingra, A.K. and Bennage, W.A., "Discrete and Continuous Variable Structural Optimization Using Tabu Search", *Engineering Optimization*, 24, 177-196, 1995.
- [14] Bland, J.A., "Discrete-Variable Optimal Structural Design Using Tabu Search", *Structural Optimization*, 10, 87-93, 1995.
- [15] Bennage W.A. and Dhingra, A.K., "Optimization of Truss Topology Using Tabu Search, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*", 38, 4035-4052, 1995.
- [16] Bland, J.A., "Structural Design Optimization with Reliability Constraints Using Tabu Search", *Engineering Optimization*, 30, 55-74, 1998.
- [17] Bland, J.A., "A Memory-Based Technique for Optimal Structural Design", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11, 3, 319-325, 1998.
- [18] Manoharan, S. and Shanmuganathan, S., "A Comparison of Search Mechanisms for Structural Optimization", *Computers & Structures*, 73, 1-5, 363-372, 1999.
- [19] Sait, M.S. and Zahra M. M. , "Tabu Search Based Circuit Optimization", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15, 3-4, 357-368, 2002.
- [20] Mladenovic, N., Petrovic, J., Vujcic, V.K., Cangalovic, M., "Solving Spread Spectrum Radar Polyphase Code Design Problem by Tabu Search and Variable Neighbourhood Search", *European Journal of Operational Research*, 151, 2, 389-399, 2003.
- [21] Jeon, Y.J. and Kim, J.C., "Application of Simulated Annealing and Tabu Search for Loss Minimization in Distribution Systems", *Electrical Power & Energy Systems*, 26, 1, 9-18, 2004.
- [22] Glover, F. and Laguna M., *Tabu Search*, In: Colin R. Reeves (editor), "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems", Blackwell Scientific Publications, Osney Mead, Oxford, 70-150, 1992.
- [23] Glover, F. and Laguna M., "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1997.
- [24] TS 648, "Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
- [25] Dumonteil, P., "Simple Equations for Effective Length Factors", *Engineering Journal*, AISC, 3, 111-115, 1992.
- [26] Levy, R. and Spillers, W.R., "Analysis of Geometrically Nonlinear Structures", Chapman and Hall, New York, 1994.
- [27] Spillers, W. R., "Geometric Stiffness Matrix for Space Frames", *Computers & Structures*, 36, 1, 39-37, 1990.
- [28] American Institute of Steel Construction, "Manual of Steel Construction - Allowable Stress Design", Chicago, 1989.
- [29] TS 498, "Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.
- [30] Değertekin, S.O., "Lineer Olmayan Uzay Çelik Çerçevelerin Tabu Arama Yöntemiyle Optimum Tasarımı", Doktora Tezi, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 2005.