

## DAİRESEL GÖZENEKLİ PETEK KİRİŞLERİN HARMONİ ARAMA YÖNTEMİ KULLANILARAK OPTİMİZASYONU

F. Erdal\*, M. P. Saka\*

\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü  
06531 Ankara - TÜRKİYE

### ABSTRACT

Cellular beams became increasingly popular as an efficient structural form in steel construction since their introduction in 1987. They have been used in over 3500 projects in over twenty countries. Their sophisticated design and profiling process provides greater flexibility in beam proportioning for strength, depth, size and location of circular holes. The main goal of manufacturing these beams is to increase overall beam depth, the moment of inertia and section modulus, which results in greater strength and rigidity. Cellular beams can be used in a variety of applications. They are used as primary or secondary floor beams in order to achieve long spans and service integration. Cellular beams are used as roof beams beyond the range of portal-frame construction, and are the perfect solution for curved roof applications, combining weight savings with a low-cost manufacturing process. Since the 1950's the high strength to weight ratio of castellated beams has been a desirable item to structural engineers in their efforts to design even lighter and more cost efficient steel structures. Cellular beams invariably produce a more efficient and economical solution than castellated beams due to their flexible geometry. In this study the design problem cellular beams is as optimum design problem. The designation of I-Beam from which cellular beam is to be produced, the cell diameter and the total number of cells along the beam is taken as design variables. Design constraints include the displacement limitations, overall beam flexural capacity, beam shear capacity, overall beam buckling strength, web post flexure and buckling, vierendeel bending of upper and lower tees, local buckling of compression flange and practical restrictions between cell diameter and the spacing between cells. Solution of this combinatorial optimization problem is carried out using harmony search algorithm which is one of the recent additions to stochastic search techniques.

Keywords: *Cellular beams, Optimum structural design, Minimum weight design, Combinatorial optimization, Stochastic search techniques, Harmony search algorithm*

### ÖZET

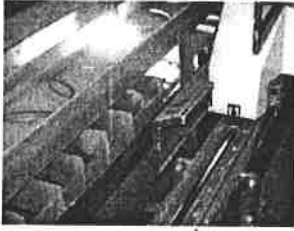
Dairesel gözenekli petek kirişler 1987 yılı başlangıcından beri çelik yapılarda etkin bir yapı modeli olarak artan bir popüleriteye sahip oldular. Gelişmiş tasarımları; dayanım, derinlik, boyut ve dairesel boşlukların yerleri için kirişe benzer elemanlara oranla daha fazla esneklik

sağlar. Dairesel gözenekli kirişler büyük açıklıkları rahat geçebilmek için birincil yada ikincil derecede olan döşeme kirişleri olarak kullanılırlar. Dairesel petek kirişlerde; kesim ve kaynaklama işleminden sonra kirişlerin gövdesinde oluşan dairese boşluklardan rahatlıkla mekanik, elektrik ve su tesisatları geçirilebildiğinden dolayı kat yüksekliklerinin arttırılmasına gerek yoktur. Bu çalışmanın amacı; dairese gözenekli çelik petek kirişlerin uygulanan yük kombinasyonu altında denemeye dayalı araştırma yöntemlerinden biri olan harmoni arama tekniği kullanılarak optimum boyutlandırılmasıdır. Dairesel gözenekli petek kirişlerin uygulanan yük altında boyutlandırılmasında orjinal I-kesitli profil, kirişin son boyu, dairese boşluk çapı, boşluklar arası mesafe ve kiriş açıklığı boyunca boşluk sayısı seçimine gereksinim duyulur. Optimum boyutlandırma probleminde standart çelik kesit tablosundan sıcak haddelenmiş kiriş kesit sıra numarası, dairese boşluk çapı ve kiriş açıklığındaki toplam boşluk sayısı tasarım değişkenleri olarak alınır. Tasarım sınırlayıcıları olarak deplasman kısıtlayıcısı, kiriş profilin esneklik kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi, kiriş gövdesi esneklik ve burkulma kapasitesi, kirişin alt ve üst parçalarının vierendeel eğilme kapasitesi ve kirişin üst flaşında oluşabilecek bölgesel burkulma alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Dairesel Gözenekli Petek Kirişler, Stokastik Arama Teknikleri, Harmoni Arama Yöntemi, Minimum Ağırlık, Optimum Yapı Boyutlandırılması.*

## 1.Giriş

Çelik I-kesitli profilin gövdesi boyunca yarım daire şeklinde kesilerek elde edilen alt ve üst parçaların kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucu oluşurlar (Şekil 1-2). Kiriş profilinin kesim işlemi, gövde bölgesinde oluşacak boşlukların bilgisayara dayalı sayısal kontrol (CNC) yöntemi ile yapılır.

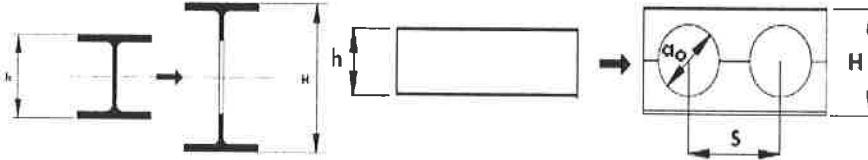


Şekil 1. Kesim İşlemi



Şekil 2. Kaynakla Birleştirme İşlemi

Yeni görünüş kirişe dayanım, derinlik ve boşlukların yerleri açısından büyük esneklik sağlar. Bu işlemlerin asıl amacı profilin atalet momentini ve kesit katsayısını arttırarak kirişin rijitliğinin ve dayanımının artmasını sağlamaktır. Kesim, ayrışma ve kaynakla yeniden birleştirme işlemi sonucunda kirişin boyu, kesit katsayısı ve atalet momenti artarken ağırlığı da ilk duruma oranla azalır. Artan atalet momentini ve kesit katsayısı kirişin dayanımının ve rijiditesinin yükselmesini sağlar.

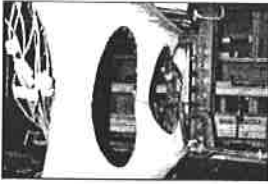


Şekil 3. Başlangıç ve Son Kesit

Yapılarda kat yükseklik sınırlayıcıları önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır. Ekonomik nedenlerin ağır bastığı bu durumlarda taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların kesit özelliklerine göre optimum boyutlandırılması önem kazanmaktadır. Kesim ve yeniden kaynaklanma sonrası daha yüksek ve daha hafif olan petek kirişlerin gövde bölgesinde oluşan boşluklardan elektrik, su ve mekanik tesisat boruları rahatça geçebileceğinden dolayı yapıda kat yüksekliğinden kazanç olur. Bunların dışında; şantiyedeki yüksek maliyetli güçlendirme işlemlerine gerek kalmadan hafif ve orta büyüklükteki tekil yükleri taşıyabilmeleri, benzer amaçlı kiriş kesitlere oranla daha az yatay bağlantı gerektirmeleri ve küçülen kiriş boyutlarının duvar yükseklikleri ile yapı maliyetinin azalmasında önemli bir etken olması petek kirişlerin diğer avantajlarıdır. Petek kirişlerin en önemli avantajlarından birisi de ağırlık azaltılmasıdır. Aynı atalet momentine sahip olan normal bir I-kesit profil petek kirişe oranla yaklaşık olarak %40 - %50 oranında daha ağırdır.

## 2. Petek Kirişlerin Göçme Durumları

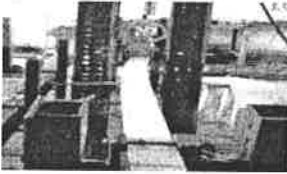
Petek kirişler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kiriş boşluk geometrisine, kiriş gövde narinliğine, yükleme tipine ve yanal desteklerin koşullarına bağlı olarak kirişte farklı göçme biçimleri gözlemlenmiştir. Bu göçmeler aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



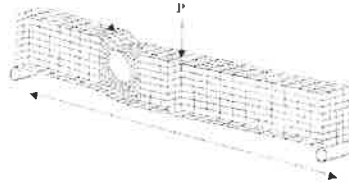
Şekil 4. Kiriş Gövdesinde Burkulma



Şekil 5. Kaynak Bölgesinde Kopma



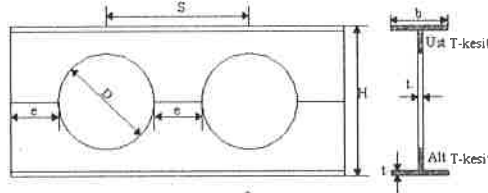
Şekil 6. Kiriş Gövdesinde Burkulma



Şekil 7. Kaynak Bölgesinde Kopma

## 3. Dairesel Gözenekli Petek Kirişlerin Geometrik Özellikleri

Uygulanan yük kombinasyonları altında dairesele gözenekli petek kirişlerde oluşabilecek kusurları engellemek için dikkate alınacak geometrik ve davranışsal sınırlayıcılar "The Steel Construction Institute" Yayın No: 100 başlıklı "Design of Composite and Non-composite Cellular Beams" dan alınmıştır. Boyutlandırma yöntemleri "BS5950 part 1 and 3, and BS449" şartnamelerine uygundur. Dairesel gözenekli petek kirişler için kullanılan standart profil geometrisi and notasyonlar Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Dairesel Gözenekli Petek Kirişin Geometri ve Notasyonları

### 3.1. Petek Kirişlerin Boyutlandırma Sınırlayıcıları

Petek kirişlerde oluşabilecek kusurları engellemek için bazı sınırlayıcılar dikkate alınmalıdır. Petek kirişlerin boyutlandırılmasında kirişin alt ve üst parçalarının vierendeel eğilme kapasitesi, kirişin üst başlığında oluşabilecek bölgesel burkulma, profilin esneklik kapasitesi, kesme kapasitesi, kiriş gövdesi burkulma kapasitesi ve deplasman kısıtlayıcısı boyutlandırılma sınırlayıcıları olarak alınmaktadır.

#### 3.1.1. Maksimum moment kapasitesi

Elastik tasarım yönteminde; kirişlerde oluşabilecek maksimum moment aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir. Kirişin dış yüklere dayanıklı olması için uygulanan yükler altında dairesel gözenekli petek kirişte oluşacak maksimum moment değeri izin verilebilir moment değerini aşmamalıdır.

$$M_p = A_{te} \times p_y \times h \text{ ve } M_u \leq M_p \quad (1)$$

#### 3.1.2. Kiriş kesme kuvveti kapasitesi

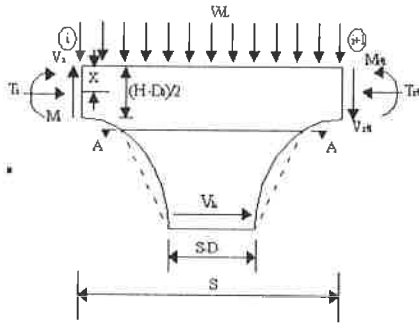
Petek kirişlerin boyutlandırılmasında iki kesme kuvveti tahkiki yapılır. Bunlardan ilki; kirişteki düşey kesme kuvveti kontrolü yapılır. Kirişin boşluktan dolayı oluşan alt ve üst T-kesitlerindeki kesme kuvvetleri kapasitelerinin toplamı kirişin toplam kesme kapasitesini verir. Uygulanan yük kombinasyonundan dolayı petek kirişte oluşacak düşey yöndeki kesme kuvveti sınır değerini ( $P_{vy}$ ) aşmamalıdır.

$$P_{vy} = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{Gövdedeki en küçük alan}) \quad (2)$$

İk tahkike ek olarak yanal kesme kuvveti kontrolü yapılır. Yanal kesme kuvveti; kirişin üst parçasındaki aksenal kuvvetlerin değişmesinden dolayı kirişin gövde kısmında meydana gelir. Kirişin gövde bölgesindeki yanal kuvvet, yanal kesme kuvveti kapasitesinden ( $P_{vh}$ ) küçük olmalıdır.

$$P_{vh} = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{Gövdedeki üst ve alt kesitlerin alanları}) \quad (3)$$

Petek kirişlerde eğilme altındaki kirişin alt ve üst parçalarının esneklik kapasitesinin tahkik edilmesi gerekir. Petek kiriş kesmeye maruz kaldığı zaman, kiriş boşluğunun alt ve üst kısmındaki T-kesitleri birincil ve ikincil momentlerin yanısıra uygulanan kesmeyi de taşımaktadır.



$$V_{i+1} = V_i$$

$$M_i = T_i \times (H_S - 2x_0)$$

$$V_h = T_{i+1} - T_i = V_{i+1} \frac{S}{H_S - 2x_0}$$

Şekil 9. Dairesel Gözenekli Petek Kirişin Gövde T-Kesiti

### 3.1.3. Vierendeel (sekonder) eğilme kapasitesi

Petek kirişlerde eğilme altındaki kirişin alt ve üst parçalarının esneklik kapasitesinin tahkik edilmesi gerekir. Petek kiriş kesmeye maruz kaldığı zaman, kiriş boşluğunun alt ve üst kısmındaki T-kesitleri birincil ve ikincil momentlerin yanısıra uygulanan kesmeyi de taşımaktadır. Kesme kuvvetlerinin her bir boşluk boyunca aktarılması ise ikincil eğilme (vierendeel) momentine neden olur. Petek kirişte ikincil eğilme momentinden oluşacak bu kusur en yüksek kesme kuvvetinin olduğu boşlukta meydana gelir.

## 4. Harmoni Arama Yöntemi

Yöntem; orkestranın müzik parçasını çalmaya başlamadan önce, müzik aletlerinin akortlarının yapılarak orkestrada ortak bir harmoni elde edilmesi kavramı üzerine oturtulmuştur. Orkestranın keyifle dinlettiği eserin çalınmasındaki müzik aletlerinin uyumu, optimizasyon işleminin global optimumu bulmasına benzetilmiştir. Yapısal optimizasyon metotlarının çoğu önemli derece bilgi isteyen matematiksel algoritmalara gereksinim duyarlar ve başlangıç değerlerin seçimi algoritmanın global optimum değere yakınsamasını için önemlidir. HA algoritmasında başlangıç değerlerine gerek yoktur. HA metodunda derece artırılarak arama yerine rastgele arama yapılır ve türevsel bilgiye gerek yoktur.

**Harmoni hafıza matrisinin oluşturulması :** İlk olarak başlangıç harmoni hafıza matrisi (H) oluşturulur. Denklem 7'de de gösterildiği gibi matrisin büyüklüğü harmoni hafızanın büyüklüğü kadardır. Harmoni hafıza matrisinin büyüklüğü ( $\mu$ ) çözüm vektörlerinin sayısı kadardır. Her bir çözüm (harmonik vektörü,  $\mathbf{I}^i$ ) tasarım değişkenlerinden ( $N_d$ ) oluşmaktadır ve her harmoni vektörü matrisin ayrı satırında gösterilir. Sonuç olarak, harmoni hafıza matrisi  $H = \mu \times N_d$  şeklinde ifade edilir.

$$H = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & \dots & I_{N_d}^1 & \phi(\mathbf{I}^1) \\ I_1^2 & I_2^2 & \dots & I_{N_d}^2 & \phi(\mathbf{I}^2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1^\mu & I_2^\mu & \dots & I_{N_d}^\mu & \phi(\mathbf{I}^\mu) \end{bmatrix} \quad (4)$$

**Harmoni hafıza matrisinin değerlendirilmesi :** Harmoni hafıza matrisi çözümleri analiz edildikten sonra onların amaç fonksiyon değerleri hesaplanır. Değerlendirilen çözümler matris içindeki amaç

fonksiyon değerlerinin artan dizisine göre sıralanır. Bu sıralama  $\phi(I^1) \leq \phi(I^2) \leq \dots \leq \phi(I^n)$  şeklindedir.

**Yeni harmoninin geliştirilmesi :** Yeni harmoni matrisi  $I' = [I'_1, I'_2, \dots, I'_{N_s}]$  harmoni hafıza ya da tamamlanmış ayırık set tarafından her bir dizayn değişkeni seçilerek geliştirilir. Harmoni hafıza tarafından bir dizayn değişkeninin seçilme olasılığı algoritmanın önemli bir parametresi olan harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranı (*hmcr*) ile kontrol edilir. Bu olasılığı uygulama amacıyla her bir değişken ( $I_i$ ) için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı ( $r_i$ ) oluşturulur. Eğer seçilen rastgele sayı ( $r_i$ ) harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranından (*hmcr*) küçük veya eşit ise değişken H harmoni matrisinin  $i$ 'nci sütunu tarafından atanan herhangi bir değer tarafından denklem 5'de gösterildiği gibi seçilir. Eğer  $r_i$  sayısı *hmcr* parametresinden büyükse rastgele değer tamamlanmış ayırık set tarafından atanır.

$$I'_i = \begin{cases} I'_i \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^n\} & \text{if } r_i \leq hmcr \\ I'_i \in \{1, \dots, N_s\} & \text{if } r_i > hmcr \end{cases} \quad (5)$$

Eğer bir dizayn değişkeni harmoni hafıza tarafından kendi değerine ulaştırılırsa, bu değer in derece uyumluluğu (pitch-adjusted) olup olmadığı kontrol edilmelidir. Benzer şekilde *hmcr* parametresi de derece uyumluluğu (*par*), Denklem 6, olarak bilinen olasılık kavramı ile birlikte çalıştırılır. Eğer *par* tarafından etkinleştirilmemişse dizayn değişkeni farklılaşmaz.

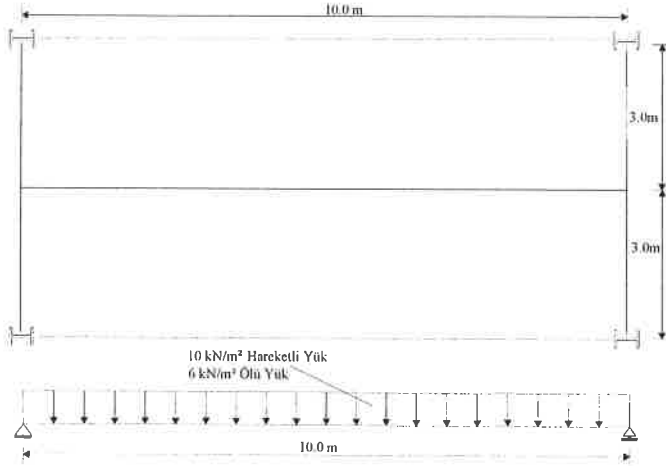
$$I''_i = \begin{cases} I'_i \pm 1 & \text{if } r_i \leq par \\ I'_i & \text{if } r_i > par \end{cases} \quad (6)$$

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

**Sonlandırma :** 3. ve 4. Adımlar döngünün maksimum sayısına ( $N_{ev}$ ) ulaşıncaya kadar tekrar edilir.

## 5. 10-Metre Açıklıklı Boyutlandırma Örneği

Şekil 11'de gösterilen aradaki çelik kirişin dairesel gözenekli petek kiriş yapılmasına karar verildiği varsayılıyor. Kiriş, kendi ağırlığının yanısıra sırasıyla 6 kN/m<sup>2</sup> ve 10 kN/m<sup>2</sup> düzenli yayılı ölü ve hareketli yüklere maruz kalıyor. Kirişler arası mesafe 3m. Hareketli yükler altında kiriş için izin verilebilir deplasman 34 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205kN/mm<sup>2</sup> ve çelik kiriş (St-50) için tasarım gerilmesi 35.5kN/mm<sup>2</sup>'dir. Kirişin boyutlandırılmasında farklı HA parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir.



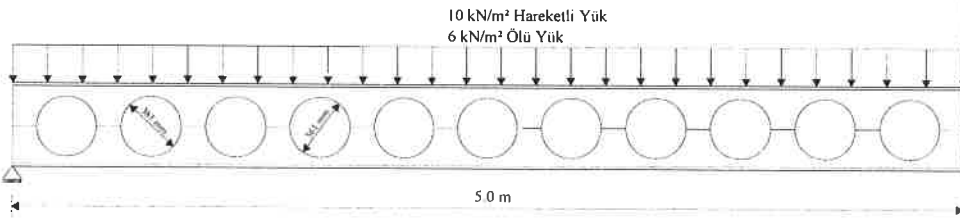
Şekil 11. 10-metre açıklıklı Kiriş

Optimum boyutlandırma probleminde standart çelik kesit tablosundan sıcak haddelenmiş kiriş kesit sıra numarası, dairesel boşluk çapı ve kiriş açıklığındaki toplam boşluk sayısı tasarım değişkenleri olarak alınır. Bu amaçla 254X102X28UB ile 914X419X388 UB arasında değişen ingiliz şartnamesindeki standart I-kesit kiriş profillerinden, 70mm ile 600 mm arasında değişen boşluk çaplarından ve 2 ile 40 arasında değişen kirişteki toplam oluşabilecek boşluk sayısından oluşan bir tasarım havuzu hazırlanır. Tasarım sınırlayıcıları olarak deplasman kısıtlayıcısı, kiriş profilin esneklik kapasitesi, kesme kapasitesi, gövde burkulma kapasitesi, kirişin alt ve üst parçalarının vierendeel eğilme kapasitesi ve kirişin üst flanşında oluşabilecek bölgesel burkulma alınmıştır. HA parametreleri kullanılarak optimum boyutlandırması yapılan dairesel gözenekli petek kirişin sonuçları tablo 1’de verilmiştir. HA algoritması bu kiriş için optimum sonucu *hms*, *hmc* ve *par* parametreleri için sırasıyla 30, 0.70 ve 0.45 değerlerini kullanarak 5000 iterasyon sonra 221.4kg ağırlık olarak buluyor.

Tablo 1. 10-metre açıklıklı Dairesel Gözenekli Petek Kirişin Optimum Boyutları

Optimum UB-Kesit Tasarımı	Boşluk Çapı (mm)	Toplam Boşluk Sayısı	Maksimum Gerilme oranı	Minimum Ağırlık (kg)
305X102X25 UB	361	22	0.96	221.4

Dairesel gözenekli petek kirişin ölü ve hareketli yük kombinasyonları altında optimum geometrik özellikleri şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Dairesel Gözenekli Petek Kirişin Profil Kesiti

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada dairesel gözenekli petek kirişlerin optimum boyutlandırma problemi; profil kesiti, boşluk çapı ve açıklık boyunca boşuk sayısı gibi tasarım değişkenleri kullanılarak geometrik ve davranışsal sınırlayıcıları altında ozlmüřtür. Tasarım probleminin minimum ağırlığının bulunmasında yapısal optimizasyon yöntemlerinden harmoni arama algoritması kullanılmıştır. Tasarım rneęi, HA yönteminin yapıların optimum boyutlandırılmasında etkili ve hızlı bir şekilde minimum ağırlığı elde edebileceğini göstermiştir.

## Kaynaklar

- [1] J.K. Ward, "Design of composite and non-composite cellular beams", The Steel Construction Institute Publication, 1990
- [2] R.M. Lawson, J. Lim, S.J. Hicks and W.I. Simms "Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large openings" Journal of Constructional Steel Research 62, 614-629, 2006
- [3] Macsteel Service Centres SA (Pty) Ltd., Design of Cellular Beams, Johannesburg, South Africa, <http://www.macsteel.co.za/cellbeam>, 2008.
- [4] H.C. Olander, "A method of calculating stresses in rigid frame corners", Journal of ASCE, August, 1953.
- [5] British Standards, BS 5950, "Structural Use of Steelworks in Building. Part 1. Code of Practice for Design in Simple and Continuous construction, hot rolled sections", British Standard Institution, London, U.K., 1990
- [6] K.S. Lee and Z.W. Geem, "A New Structural Optimization Method Based on Harmony Search Algorithm", J. Computers and Structures, 82, 781-798, 2004.
- [7] F. Erdal and M. P. Saka, "Optimum Design of Grillage Systems Using Harmony Search Algorithm", Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 38, No: 1, 25-41, 2009
- [8] Steelwork design Guide to BS 5950: Part 1, "Section Properties, Member Capacities", Vol.1, 4th edition, The Steel Construction Institute, U.K., 1990.