

## Sinüsoidal Boşluklu Gövde Yüksekliği Arttırılmış Çelik Kirişlerin Optimum Boyutlandırılması

Ferhat Erdal<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya.

e-posta: eferhat@akdeniz.edu.tr

### Özet

Gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişler başlangıçlarından beri çelik yapılarda etkin bir yapı modeli olarak artan bir popüleriteye sahip oldular. Gelişmiş tasarımları kendilerine dayanım, derinlik, boyut ve sinüsoidal boşlukların yerleri için dolu gövdeli kirişlere oranla daha fazla esneklik sağlar. Bu kirişlerin üretiminin asıl amacı; kirişin derinliği, atalet momenti ve kesit katsayısını arttırmaktır. Artan atalet momenti ve kesit katsayısı kirişin dayanımının ve rijiditesinin yükselmesini sağlar. Gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişler büyük açıklıkları rahat geçebilmek için birincil ya da ikinci derecede olan döşeme kirişleri olarak kullanılır. Bu kirişler ayrıca çerçeve sundurmaların ötesinde çatı kirişleri olarak kullanılır ve eğimli çatı uygulamalarında ağırlık ve maliyet düşürülmesiyle mükemmel sonuçlar verirler. Bu çalışmanın amacı; sinüsoidal boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişlerin uygulanan yük kombinasyonu altında denemeye dayalı optimizasyon yöntemleri ile optimum boyutlandırılmasıdır. Bu kapsamda sözü geçen kirişlerin algıya dayalı arama yöntemleri olan harmoni arama ve partikül küme teknikleri kullanılarak optimum boyutlandırılması yapılmıştır. Harmoni arama yöntemi UB kesitleri arasından uygun profili seçer böylece SCI (Steel Construction Institute)'da tanımlanan tasarım sınırlamaları sağlanır ve sistemin ağırlığı minimuma indirgenir. Sözü geçen kirişlerin uygulanan yük altında boyutlandırılmasında orijinal I-kesitli profil, kirişin son boyu, kirişte oluşacak gövde boşluğunun yüksekliği, kirişte oluşacak her eğrinin yatay uzunluğu, boşluğun yassı kısmının uzunluğu, boşluklar arası mesafe ve kiriş açıklığı boyunca boşluk sayısı seçimine gereksinim duyulacağından dolayı optimum boyutlandırma probleminde tasarım değişkenleri olarak alınırlar. 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 flanşında oluşabilecek bölgesel burkulma alınmıştır.

### Anahtar kelimeler

Sinüsoidal Gövde  
Açıklıklı Kirişler;  
Stokastik Arama  
Teknikleri; Harmoni  
Arama; Partikül Küme;  
Minimum  
Ağırlık; Yapıların  
Optimum  
Boyutlandırılması

## Optimum Design of Web-Expanded Steel Beams with Sinusoidal Openings

### Abstract

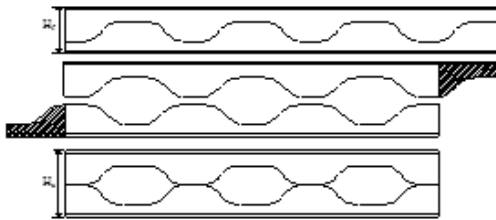
Web-expanded beams became increasingly popular as an efficient structural form in steel construction since their introduction. Their sophisticated design and profiling process provides greater flexibility in beam proportioning for strength, depth, size and location of sinusoidal holes. The purpose of manufacturing these beams is to increase overall beam depth, the moment of inertia and section modulus, which results in greater strength and rigidity. Web-expanded beams are used as primary or secondary floor beams in order to achieve long spans and service integration. They are also 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. The purpose of the current research is to study optimum design of web-expanded steel beams with sinusoidal openings using stochastic search methods. The minimum weight is taken as the design objective while the design constraints are implemented from the Steel Construction Institute. 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 and local buckling of compression flange. The design methods adopted in this publication are consistent with BS5950.

### Keywords

Web-Expanded Beams;  
Stochastic Search  
Methods; Harmony  
Search; Particle Search;  
Minimum Weight;  
Optimum Design of  
Structures.

## 1. Giriş

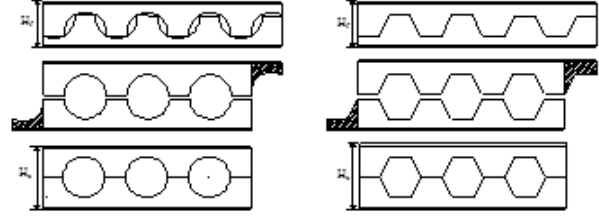
Optimizasyon ülkemizdeki mühendislik uygulamalarında hemen hemen hiç kullanılmamaktadır. Halbuki, stokastik yöntemler (Kirkpatrick ve ark. (1983), Glover (1989), Goldberg (1989), Pezeshk ve Camp (2002), Kochenberger ve Glover (2003), Dreo ve ark. (2006), Dorigo, M. and Stützle (2004)) kullanılarak yapılan yapı optimizasyonu ile, elemanları hazır profil listelerinden seçilen çelik yapıların en düşük ağırlıkla tasarlanması ve düşük maliyetle inşa edilmesi mümkündür. Önerilen projede, sinüsoidal boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişlerin optimizasyon yöntemleri ile ekonomik olarak tasarlanabilmeleri, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, Şekil 1'de gösterilen sinüs eğrisi şeklinde boşluklara sahip gövde açıklıklı çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemleri formüle edilerek elde edilen ayırık değişkenli optimizasyon probleminin çözümü, geliştirilmiş olan harmoni arama (HA) ve parçacık sürü (PK) meta-bulgusal optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilmiştir (Lee ve Geem (2004), Perez ve Behdinan (2007)).



**Şekil 1.** Sinüsoidal boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişler

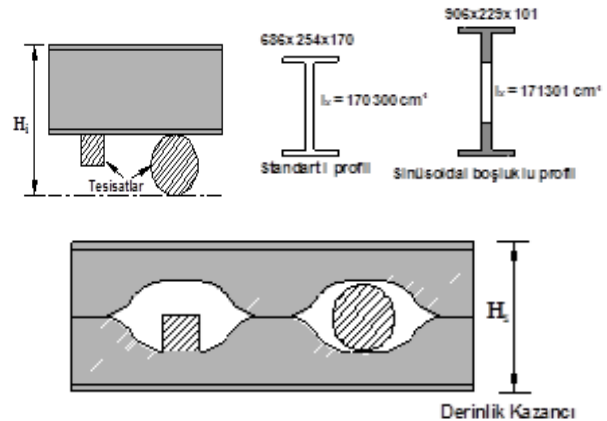
Bu kirişlerin optimum tasarımları kapsamında, NPI profil kesitleri, kiriş geometrisi ve boşluklar arası mesafe ile ilgili detaylar tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Bu sistemlerin tasarım kriterleri için BS (British Standart) şartnamesinde öngörülen hükümler esas alınacaktır [5]. Gövde açıklıklı kirişler; çelik I-kesit profilin gövdesi boyunca geometrisine bağlı olarak yarım daire (Ward (1990)), zigzag (Knowles (1985)) veya sinüs eğrisi şeklinde CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrolü)

yöntemi ile kesilip elde edilen parçaların kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda oluşurlar. Şekil 1 ve 2'de gösterilen bu işlemler sonucunda kirişin boyu, kesit katsayısı ve atalet momenti artarken kirişin ağırlığı ilk duruma oranla azalır.



**Şekil 2.** Dairesel ve altıgen şeklinde gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişler

Gövde açıklıklı kirişler değişken geometrileri ve kesit küçültülmesi sayesinde etkin ve ekonomik çözüm sağladıkları için ofis binaları, alışveriş merkezleri, otoparklar ve spor salonları gibi ara kolonların istenmediği büyük açıklıklı yapılarda tercih edilmektedirler. Gövde derinliği arttırılmış kirişler, geniş alanların kapatılmasında çatı kirişleri olarak kullanılmalrı, görselliklerinin yanı sıra ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlamaları sebebi ile mükemmel sonuçlar vermektedir. Boyutlandırma parametreleri olan boşluk boyutları, boşluklar arası mesafe ve boşluk sayısı, uygulanan yüklere göre hesaplanan bu kirişler; seçilen çelik I-kesit profilin ilk haline oranla yaklaşık olarak 40-60% daha derindirler ve 40-60% daha fazla dayanıklılık gösterirler.



**Şekil 3.** Kat yüksekliği farkı ve boy değişimi için gövde açıklıklı çelik kirişin gösterimi

Yapılarda kat yükseklik sınırlayıcıları önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır. Kesim ve

yeniden kaynaklanma sonrası daha yüksek ve daha hafif olan gövde yüksekliği arttırılmış kirişlerin gövde bölgesinde oluşan boşluklardan elektrik, su ve mekanik tesisat boruları rahatça geçebilmesi Şekil 3'de gösterildiği gibi yapıların kat yüksekliğinde kazanca olarak tanır. Gövde yüksekliği arttırılmış kirişlerin gövdesi boyunca kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda yine şekil 2'de gösterildiği üzere kirişin boyu buna bağlı olarak da kesit katsayısı ve atalet momenti artar.

## 2. Kiriş Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada iki farklı stokastik yöntem kullanılarak, sinüsoidal boşluklu çelik kirişler için optimum tasarımlarını yapacak olan bilgisayar yazılım programları geliştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde Harmoni arama (HA) ve Partikül küme (PK) metodlarını kullanarak çelik gövde açıklıklı sinüsoidal boşluklu kirişlerin optimum boyutlandırılmasını içeren bilgisayar yazılımları hazırlanmıştır. Bu yazılım FORTRAN programlama dili kullanılarak Windows ortamında derlenmiştir. Yazılımların analitik ve tasarımsal becerileri aşağıda belirtilmiştir.

i. BS (British Standart) şartnamesine göre çözüm üretilebilir.

ii. Optimum tasarım, çelik gövde açıklıklı kirişler için şartnamelerce öngörülen şu tahkikler göz önüne alınarak gerçekleştirilebilir (Kerdal ve Nethercot (1982), Zaarour and Redwood(1996))

- \* Eğilme ve eksenel gerilme tahkikleri
- \* Sekonder (vierendeel) eğilme tahkiki
- \* Kiriş gövde burkulması tahkiki
- \* Narinlik oranı tahkiki
- \* Maximum deplasman tahkiki
- \* Kesme gerilmesi tahkiki

### 2.1. Harmoni Arama Yöntemi

Geem ve Lee tarafından oluşturulan HA yöntemi; orkestranın bir müzik parçasını çalmaya başlamadan önce, müzik aletlerinin akortlarının yapılarak ortak bir harmoni elde edilmesi kavramı üzerine oturtulmuştur (Lee ve Geem (2004)). Orkestranın insanlara dinlettirdiği bir eserin

çalınmasındaki müzik aletlerinin uyumu, optimizasyon işleminin global optimumu bulmasına benzetilmiştir. Yapısal optimizasyon metodlarının çoğu bilgi isteyen matematiksel algoritmalara gereksinim duyarlar ve başlangıç değerlerin seçimi algoritmanın global optimum değere yakınsamasını sağlamak için önemlidir. HA algoritması ise fazla matematiksel algoritmaya ihtiyaç duymaz ve başlangıç değerlerine gerek yoktur. HA metodunda derece arttırılarak arama yerine rastgele arama yapılır ve türevsel bilgiye gerek yoktur.

I-Harmoni hafıza matrisinin oluşturulması: İlk olarak başlangıç harmoni hafıza matrisi (H) oluşturulur. Denklem 1'de de gösterildiği gibi matrisin büyüklüğü harmoni hafızanın büyüklüğü kadardır. H matrisi, genetik algoritmalar ve evrimsel stratejiler yöntemindeki popülasyon ile kavramsal olarak eşdeğerdir. Harmoni hafıza matrisinin büyüklüğü ( $\mu$ ) çözüm vektörlerinin sayısı kadardır. Her bir çözüm (harmonik vektörü,  $\mathbf{I}^i$ ) tasarım değişkenlerinden ( $N_d$ ) oluşmaktadır ve her harmonik vektörü matrisin ayrı satırında gösterilir. Sonuç olarak, harmonik hafıza matrisi  $H = \mu \times N_d$  şeklinde ifade edilir.

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

II-Harmoni hafıza matrisinin değerlendirilmesi: Harmonik hafıza matrisi çözümleri analiz edildikten sonra onların amaç fonksiyon değerleri birleştirilmiş genel formül içinde hesaplanır. Değerlendirilen çözümler matris içindeki amaç fonksiyon değerlerinin artan dizisine göre sıralanır. Bu sıralama  $\phi(\mathbf{I}^1) \leq \phi(\mathbf{I}^2) \leq \dots \leq \phi(\mathbf{I}^\mu)$  şeklindedir.

III - Yeni harmoninin geliştirilmesi: Yeni harmonik matrisi  $\mathbf{I}' = [I'_1, I'_2, \dots, I'_{N_d}]$  harmonik hafıza ya da tamamlanmış ayrık set tarafından her bir dizayn değişkeni seçilerek geliştirilir. Harmonik hafıza tarafından bir dizayn değişkeninin seçilme olasılığı algoritmanın önemli bir parametresi olan harmonik 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  $i$ 'inci sütunu tarafından atanan herhangi bir değer tarafından denklem 2'de gösterildiği gibi seçilir. Eğer  $r_i$  sayısı  $hmcr$  parametresinden büyükse rastgele değer tamamlanmış ayırık set tarafından atanır.

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

Eğer bir dizayn değişkeni harmoni hafıza tarafından kendi değerine ulaştırılırsa, bu değer derece uyumluluğu (pitch-adjusted) olup olmadığı kontrol edilmelidir. Basit bir şekilde derece uyumluluğu değişkenin şimdiki değeri tarafından eklenerek veya çıkarılarak elde edilen değişkenlerin komşu değerlerden birisinin örneklemevidir. Benzer şekilde  $hmcr$  parametresi de derece uyumluluğu ( $par$ ), Denklem 3, olarak bilinen olasılık kavramı ile birlikte çalıştırılır. Eğer  $par$  tarafından etkinleştirilmemiş dizayn değişkeni farklılaşmaz.

$$I_i'' = \begin{cases} I_i' \pm 1 & \text{if } r_i \leq par \\ I_i' & \text{if } r_i > par \end{cases} \quad (3)$$

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

V - Sonlandırma: 3. ve 4. Adımlar algoritma döngünün maksimum sayısına ( $N_{cyc}$ ) ulaşıncaya kadar tekrar edilir.

## 2.2. Partikül Küme Optimizasyon Yöntemi

Partikül Küme Optimizasyon (PK) yöntemi hayvanlarda rastlanan böcek kümelenmesi, kuş sürüleri ve balıkların toplu hareketleri gibi sosyal davranışlarını temel alır (Perez ve Behdinan

(2007)). Bu davranış bütün sürü hareketini gösteren bilgi ve aynı zamanda her bir bireyin hafızasına dayalı olan sosyal gruplandırmaya dayanır. Prosedür bir amaç fonksiyonu örnek uzayı içerisinde rastgele olarak oluşturulan sürüyü meydana getiren belli miktarda partikülü ihtiva eder. Sürü içerisindeki her partikül optimum tasarım problemi için birer aday çözümdür. Partiküller örnek uzaya doğru uçuş eğilimindedirler ve bir zaman aralığı için her bir adımdaki pozisyonları, mevcut pozisyonları ve hız vektörleri ve kullanılarak güncellenir.

I - Partiküllerin oluşturulması: Bir partikül kümesi küme boyutunu ( $\mu$ ) temsil eden ve önceden belirlenmiş miktarda partikülden oluşur. Her partikül ( $\mathbf{P}$ ) iki adet bileşene sahiptir; bir yer (tasarım)  $\mathbf{I}$  vektörü ve bir hız vektörü  $\mathbf{v}$  (Eşitlik 4). Yer vektörü  $\mathbf{I}$  tasarım değişkenlerinin yerlerini ihtiva ederken hız vektörü  $\mathbf{v}$  de arama süresince bu yer vektörünün güncellenmesi için kullanılır. Sürü içindeki her bir partikül bütün ilk pozisyonlar  $I_i^{(0)}$  ve hızlar  $v_i^{(0)}$  Eşitlik 5 ve 6'ya bağlı kalacak şekilde rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur.

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I}, \mathbf{v}), \quad \mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_{N_d}] \quad , \quad \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{N_d}] \quad (4)$$

$$I_i^{(0)} = I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min}), \quad i = 1, \dots, N_d \quad (5)$$

$$v_i^{(0)} = \frac{I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min})}{\Delta t}, \quad i = 1, \dots, N_d \quad (6)$$

Burada  $r$ , 0 ile 1 arasında rastgele seçilmiş bir numara;  $\Delta t$  zaman aralığı; ve  $I_{\min}$ ,  $I_{\max}$  ise sırasıyla kesit listesindeki ilk ve son çelik profilin sıra numaralarını göstermektedir.

II - Partiküllerin değerlendirilmesi: Bütün partiküller ana denkleme bağlı kalınmak suretiyle analiz edilir ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

III - Partiküllerin en iyi değerinin ve küme içindeki en iyi partikül değerinin güncellenmesi: Bir partikülün o ana kadarki en iyi pozisyonu partikülün en iyi değeri olarak kabul edilir ve her bir partikülün en iyi değeri  $\mathbf{B}$  vektörüne kaydedilir. Bunun yanı sıra prosesin başlangıcından itibaren herhangi bir partikül tarafından elde edilmiş olan en iyi pozisyon ise en iyi global pozisyon olarak  $\mathbf{G}$  vektörüne kaydedilir. Her bir  $k$  iterasyon adımı için partikül ve global en iyi pozisyon değerleri güncellenir.

$$\mathbf{B}^{(k)} = [B_1^{(k)}, \dots, B_i^{(k)}, \dots, B_{N_d}^{(k)}] \quad (7)$$

$$\mathbf{G}^{(k)} = [G_1^{(k)}, \dots, G_i^{(k)}, \dots, G_{N_d}^{(k)}]$$

**IV - Partiküllerin hız vektörlerinin güncellenmesi:** Her partikülün hız vektörü partiküllerin mevcut pozisyonu, lokal ve global en iyi pozisyon dikkate alınarak aşağıdaki gibi güncellenir.

$$v_i^{(k+1)} = w v_i^{(k)} + c_1 r_1 \left( \frac{G_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t} \right) + c_2 r_2 \left( \frac{B_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t} \right) \quad (8)$$

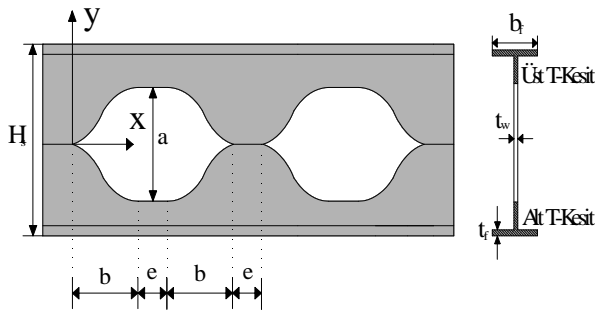
Burada,  $r_1$  ve  $r_2$  0 ile 1 arasında seçilen rastgele sayılar;  $w$  algoritmanın keşif özelliklerini kontrol eden partikül atalet parametresi; ve  $c_1$  ve  $c_2$  ise partikülün sırasıyla kendisine ve sürüye ne kadar bağlı kalacağını gösteren güven parametreleridir.

**V - Partikül pozisyon vektörünün güncellenmesi:** Daha sonra güncellenen hız vektörü kullanılarak her bir partiküle ait pozisyon vektörü güncellenir.

$$I_i^{(k+1)} = I_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \Delta t \quad (9)$$

**VI - Sonlandırma:** İki den beşe kadar olan adımlar önceden belirlenmiş olan  $N_{ite}$  kadar iterasyon için tekrarlanır.

### 3. Sinüsoidal Gövde Açıklıklı Kirişin Optimizasyon Modeli



**Şekil 4.** Sinüs Eğrisi Boşluklu Kirişin Geometri ve Notasyonları

Geometri ve notasyonları Şekil 4'de gösterilen minimum ağırlıklı sinüs eğrisi şeklinde gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişlerin optimum boyutlandırılması probleminde değişkenler aşağıdaki gibi alınır:

$$\{I\} = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}^T \quad (10)$$

Tanımlanan değişken kümesinde,  $I_1$  çelik kesit

profilin sıra numarasını,  $I_2$  kirişte oluşacak gövde boşluğunun yüksekliğinin,  $I_3$  kirişte oluşacak her eğrinin yatay uzunluğunun,  $I_4$  boşluğun yassı kısmının uzunluğunun ve  $I_5$  ise açıklık boyunca oluşacak toplam boşluk sayısının sıra numarasını tanımlar. Yapı elemanları, geniş başlıklı I-profilleri gibi şartnamelerce tanımlanan ve piyasada bulunan hazır profil listelerinin arasından seçilir. Amaç, yapı ağırlığını minimize etmektedir. Sinüs eğrisi boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış çelik kirişin ağırlığı  $W_{SSIB}$  olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu denklem (11) gibi olacaktır.

$$W_{SSIB} = \rho_s \times A_{SSIB} \times L_{SSIB} - \rho_s \left( 4 \times \int_0^x y \times dx \right) \times t_w \times N_{hole} \quad (11)$$

Burada,  $\rho_s$  çeliğin yoğunluğunu,  $A_{SSIB}$  çelik kesitin kesit alanını,  $L_{SSIB}$  kiriş açıklığını,  $y$  eğri denklemini ve  $N_{hole}$  açıklık boyunca kirişte oluşacak toplam sinüsoidal boşluk sayısını ifade eder. Kirişte oluşacak olan eğrinin fonksiyonel ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$y = \left( 0.5 \times \frac{a}{2} \right) \times \sin \left[ \pi \left( \frac{x}{b} + \frac{3}{2} \right) \right] + \frac{a}{4} \quad (12)$$

Sinüs eğrisi boşluklu çelik kirişlerin optimum tasarımında bazı geometrik ve davranış sınırlayıcılarının sağlanması gereken geometrik sınırlayıcılar aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir. Geometrik sınırlayıcılar boşluk yüksekliği değerlerine ( $a$ ), her bir eğrinin yatay uzunluğuna ( $b$ ), boşluğun yassı kısmının uzunluğuna ( $e$ ), kirişin ilk boyuna ( $H_{ilk}$ ) ve kirişin kesim ve kaynaklama işlemi sonundaki son boyuna ( $H_{son}$ ) bağlı olarak aşağıdaki eşitlikleri sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

$$1.4 \times H_{ilk} - H_{son} \leq 0 \quad (13)$$

$$H_{son} - 1.7 H_{ilk} \leq 0 \quad (14)$$

$$3a - (2b + e) \leq 0 \quad (15)$$

$$(2b + e) - 5a \leq 0 \quad (16)$$

#### 3.1. Çelik Gövde Yüksekliği Arttırılmış Kirişler İçin Davranış Sınırlayıcıları:

Gövde açıklıklı kirişler için düşey yükler altında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kiriş boşluk



geometrisine, kiriş gövde narinliğine, yükleme tipine ve yanal desteklerin koşullarına bağlı olarak kirişte farklı göçme biçimleri gözlemlenmiştir (Lawson (1986), Hoffman ve ark. (2006)). Yük kombinasyonları altında kirişlerde oluşabilecek kusurları engellemek için bazı davranışlar dikkate alınmalıdır.

### 3.1.1. İkincil (Vierendeel) Eğilme Kapasitesi:

Bu kirişlerde eğilme altındaki kirişin alt ve üst parçalarının esneklik kapasitesinin tahkik edilmesi gerekir. Kiriş kesmeye maruz kaldığı zaman, kiriş boşluğunun alt ve üst kısmındaki T-kesitleri birincil ve ikincil momentlerin yanı sıra uygulanan kesmeyi de taşımaktadır (Eşit.17). Birincil moment kiriş kesiti üzerindeki klasik eğilme momentidir. Kesme kuvvetlerinin Şekil 2'de detaylı olarak gösterildiği gibi her bir boşluk boyunca aktarılması ise ikincil eğilme (vierendeel) momentine neden olur.

$$\frac{P_o}{P_U} + \frac{M}{M_P} \leq 1.0 \quad (17) \quad P_o = T \cos \theta - \frac{V}{2} \sin \theta$$

(18)

$$M = T(x_{s0} - x_0) + \frac{V}{2} \left( \frac{H_s}{2} - x_{s0} \right) \quad (19)$$

### 3.1.2. Kesme Kuvveti Kapasitesi:

Gövde yüksekliği arttırılmış kirişlerin boyutlandırılmasında üç kesme kuvveti kontrolü yapılır. Bunlardan ilki; mesnetlerdeki kesme kuvveti tahkikidir. 20. eşitsizlikteki sınırlayıcı; mesnetteki kesme kuvveti değerinin ( $V_{\max \text{ sup}}$ ) kiriş kesitinin maksimum kesme kuvvet kapasitesini ( $P_v$ ) aşmamasını sağlar.

$$V_{\max \text{ sup}} - P_v \leq 0 \quad (20)$$

$$P_v = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{kiriş gövde alanı}) \quad (21)$$

İlk tahkike ek olarak kirişteki düşey kesme kuvveti kontrolü (22) 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  $V_{O \max}$ ;  $P_{vy}$  değerini aşmamalıdır.

$$V_{O \max} - P_{vy} \leq 0 \quad (22)$$

$$P_{vy} = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times T\text{-kesit gövde alanı}) \quad (23)$$

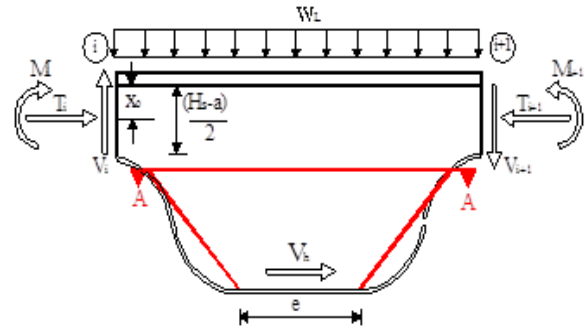
Son olarak yanal kesme kuvveti kontrolü (24) yapılır. Yanal kesme kuvveti; kirişin üst parçasındaki aksel kuvvetlerin değişmesinden dolayı kirişin gövde kısmında meydana gelir (Şekil 5). Kirişin gövde bölgesindeki yanal kuvvet ( $V_{H \max}$ ); yanal kesme kuvveti kapasitesi ( $P_{vh}$ ) değerinden küçük olmalıdır.  $V_{H \max} - P_{vh} \leq 0$  (24)

$$P_{vh} = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{Min. gövde alanı}) \quad (25)$$

$$V_{i+1} = V_i \quad (26)$$

$$M_i = T_i \times (H_s - 2 \times x_0) \quad (27)$$

$$V_h = T_{i+1} - T_i = V_{i+1} \frac{S}{H_s - 2 \times x_0} \quad (28)$$



Şekil 5. Kirişin üst gövdesinde oluşan yanal kesme

### 3.1.3. Kaynak Bölgesinde Kopma:

Gövde açıklıklı kirişlerde uygulanan yük altında kaynak dikişi mesafesinin kiriş T-kesitlerinde oluşacak ikincil momenti azaltmak amacıyla kısa tutulması veya kaynak dikişi kalınlığının küçük alınması durumunda kaynaklı birleşim bölgesinde kopma meydana gelebilir. Bu kirişlerdeki yapılan çift taraflı kaynağın kalınlığını ifade eden minimum "a" değerinin formülasyonu Eşitsizlik 29'da gösterilmektedir. Bu ifadede,  $V_h$  kaynak bölgesinde oluşan yanal kesme kuvveti,  $w$  kaynak dikiş mesafesini,  $\gamma_w$  sabit parametreyi ifade eder.  $f_u$  ve  $\beta_w$  değerleri ise çelik sınıfına göre belirlenir.

$$a \geq \frac{V_h \times \beta_w \times \sqrt{3}}{w \times f_u \times \gamma_w} \quad (29)$$

### 3.1.4. Kiriş Gövde Burkulması:

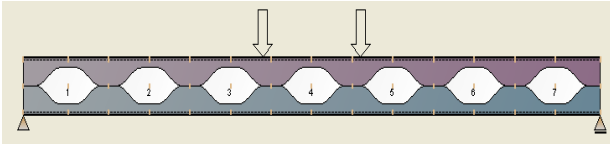
Şekil 4'de gösterildiği üzere kesitteki maksimum moment ( $M_{\max}$ ) ve neticesinde oluşan  $\sigma_w$  değerleri izin verilen maksimum moment ( $M_{w \max}$ )

ve  $\sigma_{w-allow}$  değerlerini aşmamalıdır.

$$M_{A-A \max} - M_{w \max} \leq 0 \quad (30)$$

#### 4. Tasarım Örneği

Şekil 6'de gösterilen ve 6-m açıklığı sahip çelik kirişin sinüs eğrisi şeklinde boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış kiriş yapılmasına karar verildiği varsayılıyor. Kiriş, kendi ağırlığının yanı sıra iki farklı noktadan tekil yüke maruz kalıyor. Hareketli yükler altında kiriş için izin verilebilir deplasman 17 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205kN/mm<sup>2</sup> ve çelik kiriş (St-37) için tasarım gerilmesi 27.5kN/mm<sup>2</sup>'dir.



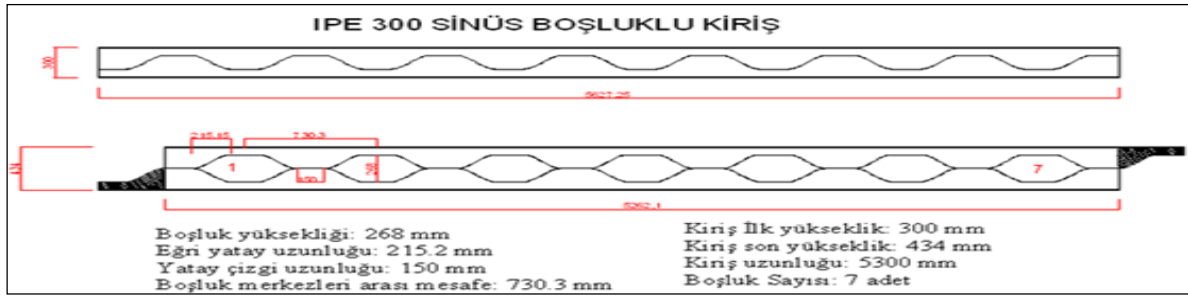
Şekil 6. Sinüs Eğrisi Boşluklu Kiriş

Optimum boyutlandırma probleminde standart çelik kesit profiltablosundan sıcak haddelenmiş kiriş kesit sıra numarası, boşluk yüksekliği, eğri yatay uzunluğu ve boşluk merkezleri arası mesafe, doğrusal bölgenin uzunluğu ve kiriş açıklığındaki toplam boşluk sayısı tasarım değişkenleri olarak alınır. Bu amaçla IPE-100 ile IPE-750 arasında değişen standart I-kesit kiriş profillerinden, 70mm ile 600 mm arasında değişen boşluk yüksekliklerinden 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, kiriş kesme kapasitesi, kiriş gövdesi esneklik ve burkulma kapasitesi, kirişin alt ve üst parçalarının vierendeel eğilme kapasitesi ve kirişin üst flanşında oluşabilecek bölgesel burkulma alınmıştır. Kirişin boyutlandırılmasında farklı Harmoni arama (HA) ve Partikül Küme (PK) yöntem parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir. Harmoni hafıza matrisi (*hms*) ve partikül

sayısı ( $\mu$ ) her iki yöntem için eşit ve 10 olarak alınmıştır. Harmoni arama yönteminin diğer parametreleri *hmcr* ve *par* sırasıyla 0.8 ve 0.35 olarak alınmıştır. PK yönteminin tasarım parametreleri olan  $c_1$  ve  $c_2$  1 olarak,  $w$  2 olarak ve  $\Delta t$  ile  $V_{\max}$  değerleri de 2 olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile PK yönteminin bulduğu ilk matris yine Çizelge 1'de gösterilmiştir. HA algoritması parametreleri kullanılarak optimum boyutlandırması yapılan sinüs eğrisi boşluklu gövde yüksekliği arttırılmış kirişin sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Her iki yöntemde optimum sonuca yakın değerler bulmasına karşın HA algoritması bu kiriş için optimum sonucu *hms*, *hmcr* ve *par* parametreleri için sırasıyla 30, 0.80 ve 0.45 değerlerini kullanarak 10000 iterasyon sonra 225.1 kg ağırlık ile IPE-SB300 kirişini Şekil 7'de görüldüğü üzere optimum kesit tasarımını bulmaktadır. Bu değer PK yönteminin bulduğu minimum ağırlık değerinden sadece 1.2 kg daha hafif olmasına karşın HA yöntemi optimum tasarımı bulurken yakınsaması daha hızlı olmuştur.

Çizelge 1. Sinüs Eğrisi Boşluklu Kiriş için Bulunan Sonuçların Kıyaslanması

Optimizasyon Yöntemi	HA Algoritması	PK Algoritması
Optimum Kesitler (IPE)	IPE-SB300	IPE-SB300
Boşluklar Arası Mesafe (mm)	730,3	737,9
Boşluk Yüksekliği (mm)	268	259
Eğri Yatay Mesafesi	215,2	211,6
Toplam Boşluk Sayısı	7	7
Minimum Ağırlık (kg)	225,1	226,3



**Şekil 7.** IPE-SB300 Sinüs Eğrisi Boşluklu Gövde Yüksekliği Arttırılmış Kiriş Kesim ve Kaynak Sonrası Görünümü

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada sinüsoidal boşluklu çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemi; profil kesiti, kirişte oluşacak gövde boşluğunun yüksekliği, kirişte oluşacak her eğrinin yatay uzunluğu, boşluğun yassı kısmının uzunluğu, boşluklar arası mesafe ve kiriş açıklığı boyunca boşluk sayısı gibi tasarım değişkenleri kullanılarak geometrik ve davranışsal sınırlayıcıları altında çözülmüştür. Tasarım probleminin minimum ağırlığının bulunmasında yapısal optimizasyon yöntemlerinden harmoni arama ve partikül küme algoritmaları kullanılmıştır. Tasarım örneği, harmoni arama yönteminin yapıların optimum boyutlandırılmasında partikül küme yöntemine oranla daha etkili ve hızlı bir şekilde minimum ağırlığı elde edebileceğini göstermiştir.

**Teşekkür:** Bu çalışma Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü (BAP) tarafından NAP-284 proje numarası ile kısmi olarak desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Kirkpatrick, S., Gerlatt, C. D., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by Simulated Annealing, Science, 220, 671-680.
- Glover, F., 1989. Tabu Search-Part I, ORSA Journal on Computing, 1(3), 190-206.
- Goldberg D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing.
- Pezeshk S., Camp C.V., 2002. State of the Art on the Use of Genetic Algorithms in Design of Steel Structures, Recent Advances in Optimal Structural Design, Ed; S.A. Burns, ASCE, 55-80.
- Coello C. A. C., 2002. Theoretical and numerical

constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191, 1245-1287.

- Dorigo, M. and Stützle, T., 2004. Ant Colony Optimization, A Bradford Book, Massachusetts Institute of Technology.
- Dreo, J., Petrowski, A., Siarry, P. and Taillard, E., 2006. Meta-Heuristics for Hard Optimization, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Lee, K.S. and Geem, Z.W., 2004. A New Structural Optimization Method Based on Harmony Search Algorithm, J. Computers and Structures, 82, 781-798.
- Perez, R.E. ve Behdinan, K., 2007. Particle Swarm Approach for Structural Design Optimization, Computers and Structures, 85, 1579-1588.
- British Standards, BS-5950, 1990. Structural Use of Steelworks in Building. Part 1. Code of Practice for Design in Simple and Continuous construction, hot rolled sections, British Standard Institution, U.K. , London.
- Knowles, P.R., 1985 . Design of Castellated beams, The Steel Construction Institute.
- Ward J.K., 1990. Design of composite and non-composite cellular beams, The Steel Construction Institute Publication.
- Kerdal D., Nethercot A., 1982. Lateral-torsional buckling of castellated steel beams, Journal of The Institution of Structural Engineers, Part A Design and Construction, 60B, 53-61.
- Zaarour W., Redwood R.G., 1996. Web buckling in thin webbed castellated beams, Journal of Structural



Engineering (ASCE), 122 (8), 860-866.

Lawson R.M., 1988. Design for openings in the webs of composite beams, The Steel Construction Institute Publication.

Hoffman R., Dinehart D., Gross S., Yost J., 2006. *Analysis of stress distribution and failure behaviour of cellular beams*, The Proceedings of International Ansys Conference.