

Ülkemiz Mühendislik Uygulamalarında Çelik Çatı Sistemlerinin Optimum Tasarımına Dair İnceleme

Hasan ESER^{1*}
Oğuzhan HASANÇEBİ²



ÖZ

Bu çalışmada, ülkemiz mühendislik uygulamalarında büyük açıklıklı çelik çatı sistemlerinin ne kadar optimum tasarlandığına dair bir inceleme yapılmaktadır. Bu amaçla, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde inşa edilmiş üç kapalı yüzme havuzuna ait çelik çatı sistemlerinin optimum boyutlandırılması, kaotik kapasite kontrollü arama (kaotik-KKA) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum tasarımlar bu sistemlerin daha önceden proje firmaları tarafından geleneksel mühendislik yöntemleri kullanılarak oluşturulan orijinal tasarımları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde, büyük açıklıklı çelik çatı sistemlerinin tasarım aşamalarında yapı optimizasyonu yöntemlerinin kullanılması ile, yapı ağırlığında ve dolayısıyla maliyetinde, orijinal tasarımlara göre %10-40 oranında tasarruf sağlanabileceği tespit edilmiştir. Büyük açıklıklı çatı sistemlerinde çelik kullanımının azaltılması sadece malzeme masraflarını değil, aynı zamanda nakliye ve imalat maliyetlerini de düşürecektir. Bunun yanı sıra, çelik endüstrisinin çevresel zararlarını da azaltarak sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Çelik çatı sistemleri, yapı optimizasyonu, kaotik kapasite kontrollü arama yöntemi, endüstriyel uygulama, gerçek yapılar.

ABSTRACT

A Study on the Optimum Design of Steel Roof Systems in Turkish Engineering Practice

In this study, an investigation is conducted on how optimally large span steel roof systems are designed in Turkish engineering practice. For this purpose, the optimum sizing of the steel roofs of three indoor swimming pools constructed in different regions of Turkey was performed using the chaotic capacity controlled search (Chaotic-CCS) method and the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 4 Eylül 2024 günü ulaşmıştır. 12 Kasım 2024 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2025 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1543461>

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
heser@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-8527-020X>

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
oguzhan@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-5501-1079>

* Sorumlu yazar

obtained optimum designs were compared with the original designs of these systems by design office engineers using conventional design approach. As a result, it was determined that the use of structural optimization methods in the design phase of large span steel roof systems will reduce structural weight about 10-40% and thus the cost of structures compared to the original designs. Reducing the use of steel in large span roof systems will not only reduce material costs, but also transportation and construction costs. It will also contribute to sustainability by reducing the impact of the steel industry on the environment.

Keywords: Steel roof systems, structural optimization, chaotic capacity controlled search, industrial application, real structures.

1. GİRİŞ

Modern inşaat mühendisliği uygulamalarının önemli bir parçasını oluşturan büyük açıklıklı çelik çatı sistemleri, geniş alanların desteklenmesi amacıyla kullanılan yapısal çözümlerdir. Bu sistemler, ekseriyetle spor salonları, alışveriş merkezleri, uçak hangarları, sergi salonları ve depolar gibi geniş iç mekanlar gerektiren yapılarda yaygın olarak kullanılırlar. Büyük açıklıklı çatı sistemlerinin tasarımı, yapının stabilitesi, güvenliği, estetiği ve ekonomisi açısından dikkatli bir mühendislik uygulaması gerektirir. Yapılara etki eden yüklerin doğru bir şekilde hesaplanması, yapının güvenliği ve dayanıklılığı için kritik öneme sahiptir.

Bu yapıların geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen tasarım sürecinde, tasarım mühendisi deneyimlerine, sezgilerine ve bazı yaklaşık hesaplamalara dayanarak bir ön tasarım oluşturur. Ardından bu tasarım analiz edilir. Analiz sonuçlarına göre, dayanımı yetersiz olan yapı elemanlarının kesitleri büyütülürken, gereğinden fazla dayanıma sahip elemanların kesitleri küçültülür. Bu süreç, tasarım koşullarını (deplasman, dayanım, vb.) sağlayan ilk uygun tasarım elde edilene kadar genellikle birkaç kez tekrarlanır. Böylece yapı için hem geçerli ve hem de ekonomik bir tasarım elde edilmeye çalışılır. Ancak, en küçük bir yapı probleminin tasarımında bile sonsuz sayıda geçerli (uygun) çözüm olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu geleneksel deneme-yanılma yaklaşımıyla elde edilen tasarımın, yapı için en ekonomik tasarım olmayacağı açıktır. Üstelik, bu yöntemle bazen gereğinden fazla ağır veya maliyetli tasarımların elde edilme olasılığı da vardır.

Yapı optimizasyonu, bir mühendislik yapısının sonsuz sayıda uygun tasarımı arasından ağırlık veya maliyet açısından en iyi (optimum) çözümü bulmayı amaçlar. Temelleri 1960'lı yıllara dayanan ve o tarihten itibaren sürekli bir gelişim içerisinde olan bu disiplinde, inşaat mühendisliği yapılarının optimum tasarımları için ilkin matematiksel programlama ve optimumluk kriteri yöntemleri kullanılmıştır [1-3]. Ancak, bu yöntemlerde kullanılan türeve dayalı algoritmaların tasarım değişkenlerini sürekli-değerli kabul etme zorunluluğu, bu yöntemlerle gerçekçi ve uygulanabilir çözümlerin elde edilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, söz konusu yöntemler zamanla terk edilmiş ve yeni algoritmalar geliştirilmeye çalışılmıştır [4-8].

1990'lı yılların başından itibaren, diğer tüm disiplinlerde olduğu gibi yapı optimizasyonu literatüründe de meta-sezgisel (metaheuristic) olarak adlandırılan optimizasyon algoritmalarının ön plana çıktığı ve yaygın olarak kullanılmaya başlandığı görülmüştür. Doğadaki oluşumların taklit edilerek nümerik bir arama algoritmasına dönüştürülmesi esasına göre geliştirilen bu yöntemlerin ortak özellikleri, türeve dayalı arama metodolojilerini

reddetmeleri ve ayrık-değerli tasarım değişkenleri içeren optimizasyon problemleri için çözüm üretebilmeleridir. Ayrıca, bu yöntemlerin türeve dayalı olmayan arama metodolojileri, kötü lokal optimum çözümlere yakalanmadan tasarım uzayının kapsamlı bir şekilde taranmasına olanak vermektedir. Yapı optimizasyonu literatüründe, yeni meta-sezgisel optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesi, bu yöntemlerin çeşitli uyarlamaları, birbirleriyle karşılaştırmaları ve farklı yapı türlerine uygulanmaları konularında çok sayıda çalışma mevcuttur [9-17]. Öte taraftan, bu yöntemlerin yakınsama hızları oldukça düşüktür. Global optimum çözüme veya iyi bir lokal optimum çözüme yakınsamadan önce, problem boyutuna bağlı olarak binlerce, on binlerce ve hatta yüz binlerce iterasyona ihtiyaç duyabilirler. Ancak, tasarım için harcanan zamanın önemli bir unsur olarak görülmesi sebebiyle, meta-sezgisel yöntemlerin proje ofisleri tarafından benimsenerek gerçek mühendislik yapılarının tasarımında kullanılması çok muhtemel gözükmemektedir. Dahası, performans dayalı, doğrusal olmayan yapısal analiz yöntemlerinin tasarım şartnamelerinde yer almaya başlaması ile birlikte yapı analiz sürelerinin uzaması, çok sayıda iterasyon gerektiren meta-sezgisel yöntemlerin gerçek mühendislik uygulamalarında kullanımını zaman yönünden daha da elverişsiz hale getirmektedir [18].

Son dönemlerde tasarım-odaklı (design-driven) yöntemler, yapı optimizasyonunda öne çıkmaktadır. Bu yöntemler önceki iterasyonlardaki analiz ve tasarım aşamalarından elde edilen alan bilgisinden (domain knowledge) yararlanarak arama sürecini daha etkin bir şekilde yönlendiren algoritmalar kullanırlar [19-22]. Bu nedenle, olasılıksal geçiş kurallarını kullanan meta-sezgisel yöntemlerden birkaç kat daha hızlı çalışırlar ve gerçek mühendislik uygulamalarında kullanılma potansiyelleri daha yüksektir.

Yapı optimizasyonunda kullanılan yöntemlerin yukarıdaki paragraflarda bahsedilen dezavantajları, bu yöntemlerin proje ofisleri tarafından yapı tasarımı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasını kısıtlamıştır. Ancak, bu alanda yapılan akademik ve bilimsel çalışmalarda da konunun güncel mühendislik uygulamalarına kazandırılması yönünde özel bir çaba gösterilmediği de bir gerçektir. Nitekim, yapı optimizasyonu üzerine yapılan araştırmalarda gerçek uygulamalara yer veren çalışmalar oldukça sınırlıdır [23-28]. Bu alanda yayınlanan akademik ve bilimsel çalışmalarda sayısal uygulamalar ekseriyetle küçük ölçekli veya idealize edilmiş yapı sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bazı çalışmalarda binlerce elemandan oluşan büyük ve gerçek boyutlu yapılar kullanılmış olsa da bu problemler yükleme durumlarının sadeleştirilmesi veya gerçek mühendislik problemlerinde göz önüne alınması gereken tasarım kriterlerinin göz ardı edilmesiyle nispeten basitleştirilerek kullanılmıştır. Böyle olunca, yapı optimizasyonu alanının akademik dünyadaki gelişimi ile mühendislik uygulamalarındaki kullanımı arasında oluşan boşluk bir türlü kapatılamamıştır.

Şüphesiz, yapı optimizasyonunun mühendislik uygulamalarına yeterince entegre edilememesinin tek sebebi, bu alanda kullanılan yöntemlerin belirtilen dezavantajlarından kaynaklanmamaktadır. Yapı optimizasyonu yöntemleri ve uygulamaları konularında proje ofislerinin yeterli bilgiye sahip olmamaları, yapı optimizasyonun maliyet avantajları konusunda yapı sahiplerinin (kişi, özel teşebbüs veya kamu kurum ve kuruluşları) farkındalıklarının bulunmaması, kamu kurum ve kuruluşları tarafından ihale edilen işlerde yapıların proje ofisleri tarafından ne kadar ekonomik tasarlandığının idarelerce incelenmemesi, ilave malzeme kullanımı ile daha güvenli bir tasarım oluşturduğuna dair yanlış inanışlar, yapım maliyetlerinin kamu kurum ve kuruluşları tarafından karşılanması

sebebiyle, proje ofislerinin maliyet azaltma konusuna yeterince önem vermemesi gibi faktörler, bu sorunun diğer nedenleri arasında sayılabilir.

Bu çalışmada, bir kamu idaresi tarafından ihale edilerek Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde inşa edilmiş üç kapalı yüzme havuzuna ait çelik çatı sistemlerinin tasarım odaklı bir optimizasyon tekniği olan kaotik kapasite kontrollü arama (Kaotik-KKA) yöntemi ile optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu sistemler için elde edilen optimum tasarımlar yapıların daha önceden proje firmaları tarafından geleneksel mühendislik yöntemleri kullanılarak oluşturulan orijinal tasarımları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, ülkemiz mühendislik uygulamalarında büyük açıklıklı çelik çatı sistemlerinin ne derece ekonomik tasarlandığını incelemek ve yapı optimizasyonu ile elde edilebilecek maliyet avantajlarını ortaya koyarak, bu yöntemlerin ülkemiz mühendislik uygulamalarında kullanılmasını teşvik etmektir.

Makalenin diğer bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde, yapı optimizasyonu probleminin tanımı ve matematiksel formülasyonu ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan Kaotik-KKA yöntemi ve algoritması özetlenmiştir. Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan yapı optimizasyonu problemleri tanıtılmış ve bu yapılar için elde edilen optimum tasarımlar, yapıların orijinal tasarımları ile karşılaştırılmıştır. Beşinci ve son bölümde ise, elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve yapı optimizasyonunun bir tasarım rutini haline getirilmesinin gerekliliği ve maliyet avantajları vurgulanmıştır.

2. YAPI OPTİMİZASYONU PROBLEMİNİN FORMÜLASYONU

Bir çelik yapının tasarımında yapı elemanları, kesit havuzu veya profil listesi olarak tanımlanan hazır (ayrık) kesitler arasından seçilerek boyutlandırılmalıdır. Bir profil listesindeki kesitler artan kesit alanına göre sıralanırlar ve her kesite 1'den başlanarak bir sıra numarası verilir. Böylelikle, listedeki en küçük kesit alanına sahip olan kesitin sıra numarası 1'e, en büyük kesit alanına sahip kesitin sıra numarası ise toplam kesit sayısına eşitlenir. İmalat ve montaj kolaylığı açısından, yapı genelinde çok fazla sayıda farklı kesit kullanılması tercih edilmez. Bu sebeple, tasarım aşamasında yapı elemanları genellikle belirli sayıda (N_g) eleman grubuna ayrılır ve bir gruba ait tüm elemanlar için aynı kesit ataması yapılır. Bu bilgiler ışığında, bir çelik yapı için ayrık boyutlandırma optimizasyon problemi (kesit optimizasyonu) şu şekilde formüle edilir:

Yapı optimizasyonu işleminde amaç, bir yapının ağırlığını (W) tasarım sınırlayıcılarına (g_k) uygun olarak minimize eden tasarım değişkenleri vektörünü ($\mathbf{I}$) elde etmektir.

$$\mathbf{I}^T = [I_1, I_2, \dots, I_{N_g}] \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^{N_g} \gamma_i A_i \sum_{j=1}^{N_{m,i}} L_{j,i} \quad (2)$$

$$g_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, N_c \quad (3)$$

Denklem (1-3)'te, tasarım değişkeni vektörü ($\mathbf{I}$), kesit havuzundan N_g eleman grubuna atanan kesitlerin sıra numaralarını; γ_i ve A_i sırasıyla bir eleman grubuna atanan ayrık bir kesitin

birim ağırlığını ve alanını; $N_{m,i}$, i 'nci eleman grubundaki toplam eleman sayısını; $L_{j,i}$, i 'nci eleman grubundaki j 'inci elemanın uzunluğunu; g_k , k 'inci normalize edilmiş tasarım sınırlayıcısını ve N_c toplam tasarım sınırlayıcı sayısını ifade etmektedir.

Optimizasyon işlemi sonunda elde edilecek uygun bir tasarımın, yapı tasarım şartnameleri ve yapı uygulamaları gereği yerine getirmesi gereken tüm koşullar ve hükümler, optimizasyon probleminin sınırlayıcıları olarak tanımlanır. Ülkemizde çelik yapıların tasarımı için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanan “Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapımına dair esaslar” [29] şartnamesi kullanılmaktadır. Bu şartnameye göre, çelik yapı elemanlarının aşağıdaki dayanım sınırlayıcılarını sağlamaları gerekmektedir.

Eğilme momenti ve eksenel kuvvet etkisindeki çift ve tek simetri eksenli elemanlar için:

$$\left(\frac{P_r}{P_c}\right)_j \geq 0.2 \text{ ise } g_1 = \left(\frac{P_r}{P_c}\right)_j + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right)_j - 1.0 \leq 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{P_r}{P_c}\right)_j < 0.2 \text{ ise } g_1 = \left(\frac{P_r}{2P_c}\right)_j + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right)_j - 1.0 \leq 0 \quad (5)$$

Kesme kuvveti etkisi altındaki elemanlar için:

$$g_2 = \left(\frac{V_r}{V_c}\right)_j - 1 \leq 0 \quad (6)$$

Burulma, kesme kuvveti, eğilme ve eksenel kuvvetin ortak etkisindeki boru ve kutu enkesitli elemanlar için:

$$\left(\frac{T_r}{T_c}\right)_j \geq 0.2 \text{ ise } g_3 = \left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right)_j + \left(\frac{V_{rx}}{V_{cx}} + \frac{V_{ry}}{V_{cy}} + \frac{T_r}{T_c}\right)_j^2 - 1 \leq 0 \quad (7)$$

Bu denklemlerde, g_1 , eğilme momenti ve eksenel kuvvet etkisindeki çift ve tek simetri eksenli elemanlar için; g_2 , kesme kuvveti etkisi altındaki elemanlar için; g_3 , eğilme ve eksenel kuvvetin ortak etkisindeki boru ve kutu enkesitli elemanlar için dikkate alınan dayanım sınırlayıcılarıdır. Herhangi (j numaralı) bir yapı elemanı için P_r , M_r , V_r ve T_r sırasıyla gerekli eksenel kuvvet, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momenti dayanımlarını; P_c , M_c , V_c ve T_c sırasıyla ilgili şartname hükümlerine göre belirlenen mevcut eksenel kuvvet, eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momenti dayanımlarını; x ve y ise sırasıyla elemanın güçlü ve zayıf eksenlerini ifade etmektedir.

Büyük açıklıklı çelik yapı sistemlerinde elemanların dayanım gereksinimleri yanı sıra, çatı makaslarında oluşacak sehmin de sınırlandırılması gerekmektedir. Buna ilişkin olarak, aşağıdaki sehmin sınırlayıcıları tanımlanır:

$$g_4 = \frac{\Delta_l^{max}}{\Delta_l^a} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

Denklem (8)'de, g_4 , çatı makaslarının altında oluşan sehmin sınırlandırılması için dikkate

alınan deplasman sınırlayıcısıdır. Δ_i^{max} , i 'nci çatı makası için belirli yük kombinasyonları altında hesaplanan azami sehim, Δ_i^a ise izin verilen sehim limitini ifade eder.

2.1. Ceza Fonksiyonu Yaklaşımı

Bu çalışmada, optimizasyon problemindeki sınırlayıcıların yönetimi için harici ceza fonksiyonu yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda, optimizasyon işlemi süresince üretilen tasarımlar arasında sınırlayıcıları ihlal eden geçersiz (uygun olmayan) tasarımlar için ceza uygulanmakta ve bu tasarımların amaç fonksiyon değerleri Denklem (9) kullanılarak elde edilmektedir.

$$\phi = W[1 + ceza(I)] = W[1 + r_o(\sum_{k=1}^{N_c} \max(0, g_k))] \quad (9)$$

Bu denklemde, ϕ , uygun olmayan bir I tasarım için hesaplanan cezalandırılmış (kısıtlı) amaç fonksiyonu değerini; g_k , k 'inci normalize edilmiş tasarım sınırlayıcısını; ve N_c ise toplam tasarım sınırlayıcı sayısını ifade etmektedir. Ayrıca bu denklemde r_o ile gösterilen statik ceza katsayısı, cezanın şiddetini genel olarak ayarlamak için kullanılır ve bu çalışmada 1.0 olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon süreci sonunda, süreç boyunca elde edilen tasarımlar arasından, tüm tasarım sınırlayıcılarını sağlayan en hafif tasarım, optimum tasarım olarak kabul edilir. Diğer yandan, amaç fonksiyonu değeri daha düşük olsa bile, bir veya birden fazla tasarım sınırlayıcısını ihlal eden tasarımlar optimum tasarım olarak değerlendirilmez.

3. OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Kapasite kontrollü arama (KKA) algoritması yazarlar tarafından son dönemlerde geliştirilmiş olan bir optimizasyon yöntemidir [30]. KKA tasarım odaklı bir yöntem olduğundan, meta-sezgisel yöntemlere kıyasla optimum çözüme çok daha hızlı yakınsamaktadır. Bu yöntemde temel olarak her tasarım grubu için talep/kapasite (T/K) oranının mümkün olan en yüksek değere çıkarılması ve böylece yapı elemanlarının verimli bir şekilde kullanılması hedeflenir. Ayrıca, deplasman sınırlayıcılarının olasılıksal bir yaklaşımla ele alınarak sağlanması amaçlanır. Bu çalışmada, KKA algoritmasının kaos tabanlı bir varyantı olan Kaotik-KKA metodu geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Kaotik-KKA, orjinal KKA algoritmasının tüm temel özelliklerini taşıırken; eleman gruplarının seçilmesi ve bu gruplara yeni kesitlerin atanması aşamasında düzgün dağılımlı rastgele sayılar yerine kaotik rastgele sayılar kullanılmasıyla ayrılmaktadır. Kaotik-KKA yönteminin uygulama adımları aşağıda özetlenmiştir:

I. Başlangıç: Optimizasyon işlemine başlanmadan önce, her eleman grubu için bir kesit havuzu (profil listesi) belirlenir. Yapı genelinde kullanılan eleman tipine bağlı olarak, bir problemde birden fazla profil listesi tanımlanabilir. Bir profil listesinde yer alan kesitler, kesit alanlarına göre küçükten büyüğe doğru sıralanmalıdır. Genellikle, başlangıç tasarımı, her eleman grubuna bağlı olduğu profil listesindeki en büyük kesitin atanmasıyla oluşturulur. Ancak, eğer yapı için daha önce geleneksel yöntemlerle geçerli bir tasarım oluşturulmuşsa, bu tasarım da başlangıç tasarımı olarak kullanılabilir. Daha sonra, başlangıç tasarımı için yapı analizi gerçekleştirilerek her bir eleman grubu için maksimum T/K oranı belirlenir ve iterasyon sayacı bir olarak ayarlanır.

II. Pertürbasyon için Eleman Gruplarının Seçimi: Mevcut tasarımın iyileştirilmesi amacıyla aday bir tasarım oluşturulur. Bu tasarım, mevcut tasarımdaki bazı eleman gruplarının seçilmesi ve bu gruplara yeni kesitlerin atanması yoluyla gerçekleştirilir. Yapı optimizasyonunun formülasyonu kapsamında, bu işlem bazı tasarım değişkenlerinin seçilmesi ve bu değişkenlere yeni değerlerin atanmasını ifade eder. Tasarım değişkenlerinin seçimi, eleman gruplarının mevcut tasarımdaki T/K oranları kullanılması ile Denklem (10) doğrultusunda gerçekleştirilir.

$$\max(P_{min}, |1 - DCR_i|^u) \geq \xi_n \quad (10)$$

$$\xi_{n+1} = 4\xi_n(1 - \xi_n), \quad \xi_0 = 0.49 \quad (11)$$

Denklem (10) ve (11)'de, DCR_i i'inci eleman grubu (tasarım değişkeni) için maksimum T/K oranını; u seçilme olasılığını ayarlamaya yarayan bir katsayıyı, ξ_n logistik kaos haritası kullanılarak 0 ile 1 arasında üretilen rastgele bir sayıyı ve P_{min} ise bir tasarım değişkeni için belirlenmiş asgari seçilme olasılığını ifade etmektedir. Bir tasarım değişkeni için bu denklemin sağlanması durumunda, değişken bir sonraki aşamada yapılacak pertürbasyon (değişiklik) için seçilir ve güncellenir. Aksi takdirde bu değişken seçilmez ve mevcut tasarımdaki değeri aday tasarımda da korunur.

III. Pertürbasyon: Seçilen bir tasarım değişkeninin pertürbasyonu, değişkenin mevcut değeri çevresinde tanımlanan bir aralık içerisinde eleman grubuna yeni bir kesitin rastgele atanması suretiyle gerçekleştirilir. Pertürbasyon aralığının genişliği, önce Denklem (12) ve (13) kullanılarak uyarlamalı aralık genişliği (nw_a) şemasına göre belirlenir:

$$nw_{a,i} = \text{round}(\sqrt{N_{sec,i} - 1}) \cdot (\min(1, |1 - DCR_i|)^{\rho}) \quad (12)$$

$$nw_{min} \leq nw_{a,i} \quad (13)$$

Denklem (12) ve (13)'de, $N_{sec,i}$, i 'inci eleman grubu için kesit havuzundaki toplam kesit sayısını; ρ aralığın genişliğindeki azalma oranını ayarlamak için kullanılan bir parametreyi; ve nw_{min} minimum aralık genişliğini ifade eder. Daha sonra, Denklem (14) ve (15) kullanılarak pertürbasyon aralığı ($nw_{a,i}$) içerisinde rastgele belirlenen yeni kesit, eleman grubuna atanır.

$$I_i^{iter+1} = I_i^{iter} + \beta \cdot \text{round}(\max(1, |Randn_i| \cdot nw_{a,i})) \quad (14)$$

$$\beta = \text{sign}((DCR_i - 1)(\tau - \xi_n)) \quad (15)$$

Denklem (14) ve (15)'te, I_i eleman grubu için atanan kesitin sıra (indeks) numarasını; β eleman grubuna daha küçük veya daha büyük bir kesitin atanıp atanmayacağını belirleyen olasılıksal bir parametreyi; τ , β 'yı ayarlamak için kullanılan bir sabiti; $Randn_i$ ortalaması 0 ve standart sapması 1 olan normal dağılıma sahip rastgele bir sayıyı ifade etmektedir.

IV. Aday Tasarımın Değerlendirilmesi: Sıradaki adım aday tasarımın amaç fonksiyonu değerini hesaplamaktır. Aday tasarımın amaç fonksiyonu değeri, ilkin yapısal analiz

gerçekleştirilmeksizin sadece yapısal ağırlığı dikkate alınarak, Denklem (9) ile hesaplanır. Yapısal analiz öncesinde aday tasarımın hesaplanan amaç fonksiyon değerine, analiz öncesi amaç fonksiyonu denir. Bu değer, mevcut tasarımın amaç fonksiyonu değerinden yüksekse, aday tasarım otomatik olarak reddedilir ve algoritma ikinci adıma geri döner. Aksi takdirde, aday tasarım için yapısal analiz gerçekleştirilir ve tüm sınırlayıcı ihlalleri dikkate alınarak amaç fonksiyonu değeri Denklem (9)'e göre yeniden hesaplanır. Eğer aday tasarım, mevcut tasarımdan daha düşük bir amaç fonksiyonu değerine sahip ise mevcut tasarım aday tasarımla değiştirilir; aksi takdirde aday tasarım reddedilir.

V. Duraklama Kontrolü: Sonraki adım algoritmanın duraklama kontrolünü yapmaktır. Mevcut tasarımın, önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısı boyunca iyileştirilememesi, algoritmanın lokal bir optimum çözüme yakalandığı ve bu sebeple optimizasyon işleminde bir duraklama veya tıkanma sürecinin yaşandığı anlamına gelir. Böyle bir durumda, algoritmanın yakalandığı bu lokal çözümden kaçabilmesi için duraklamadan kaçış dönemi *DKD* başlatılır. *DKD* önceden belirlenen bir sayıda iterasyondan oluşur. *DKD*'nin başlamasıyla birlikte, sadece bir kereye mahsus olmak üzere elitizm kuralı askıya alınır ve mevcut tasarıma kıyasla daha yüksek bir amaç fonksiyonuna sahip bir aday tasarımın mevcut tasarımın yerine geçmesine izin verilir (yukarı doğru hareket). Ancak, bu olurken çok kötü bir çözüme geçişi engellemek için, aday tasarımın amaç fonksiyonu değerinin mevcut tasarımın amaç fonksiyonu değerine oranının önceden belirlenmiş bir oranı (α_u) aşmaması koşulu aranır. *DKD*, mevcut tasarımdan daha iyi bir aday tasarım bulunduğunda sona erer.

VI. Sonlandırma: Algoritma, maksimum iterasyon sayısına ($iter^{max}$) ulaştığında veya mevcut tasarımın belirli bir iterasyon sayısı boyunca ($iter^{ni}$) iyileştirilememesi durumunda sonlandırılır. Bu iki kriterden biri karşılanmadığı sürece, iterasyon sayısı bir artırılır ve ikinci adıma geri dönülür.

4. SAYISAL ÖRNEKLER

Çalışmanın bu bölümünde, ülkemiz mühendislik uygulamalarında büyük açıklıklı çelik çatı sistemlerinin ne derece ekonomik tasarlandığı ve yapı optimizasyonu ile elde edilebilecek maliyet avantajları sayısal olarak incelenmektedir. Bu amaçla, bir kamu idaresi tarafından ihale edilerek Türkiye'nin farklı bölgelerinde inşa edilen üç kapalı yüzme havuzuna ait çelik çatı sistemleri, örnek yapı problemi olarak kullanılmıştır. Burada vurgulanması gereken önemli bir husus, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yapı optimizasyonu ile, yapıların detaylı tasarımları öncesi ön boyutlandırma işlemi yapılmaktadır. Birleşim noktalarının tasarımları ve birleşimlerin teşkili nedeniyle oluşan enkesit kayıplarının yapı elemanlarında dayanım azalmasına veya ilave yapısal yetmezlik modlarına sebebiyet verip vermeyeceği, ön tasarım aşamasını müteakiben detaylı tasarım aşamasında yapılması gereken tahkiklerdir. Bu yaklaşım, mühendislik yapılarının tasarım süreçlerinde yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir; çünkü birleşim noktalarının detaylandırılması ve birleşimlerden kaynaklanan taşıma gücü kontrolleri, ön boyutlandırma sonrasında yapılacak daha kapsamlı analizler ve hesaplamalar gerektirmektedir. Netice olarak, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yapı optimizasyonu ile çelik çatı sistemlerinin ön boyutlandırma işlemleri gerçekleştirilmekte olup çekme elemanları için blok kırılma dayanımı gibi detaylı tasarım aşamalarında yapılması gereken tahkikler, bu çalışma kapsamında yer almamaktadır.

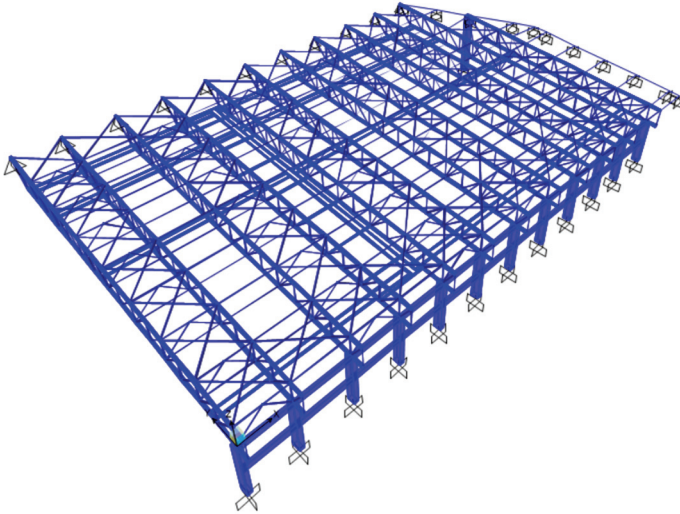
Bu problemler şunlardır:

- (1) 1263-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı
- (2) 1567-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı
- (3) 1634-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı

Bu çatı sistemlerinin proje firmaları tarafından gerçekleştirilen yapısal modelleme, analiz ve tasarım işlemlerinde SAP2000 [31] yazılımı kullanılmıştır. Tasarım aşamasında yapı elemanlarının dayanım tahkikleri, ülkemiz şartnamesi [29] ile uyumlu olan, ASCE 360-10 [32] şartnamesinin, Yük ve Dayanım Katsayılarına göre tasarım (YDKT) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çelik elemanlarının enkesitlerin narinlik koşulları gerek orijinal tasarımlarda gerekse bu yapıların optimum tasarım sürecinde sınırlayıcı olarak doğrudan dikkate alınmamıştır, ancak bu koşulların (3 no'lu örnekteki yapma kolon kesiti - eleman grubu no. 3- dışında) her üç örnekteki tüm çelik elemanlar için sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sehim hesaplamaları için tanımlanan yük kombinasyonları altında çatı makaslarındaki düşey deplasmanlar, açıklığın 1/300'ü ile sınırlandırılmıştır. Yapıların optimum tasarımları elde edilirken, orijinal tasarımlarda esas alınan tüm bu hüküm ve kısıtlara tam anlamıyla uyulmuştur.

Tablo 1 - Kaotik-KKA algoritmasının parametre değerleri

u	ρ	τ	nw_{min}	α_u	DKD	$iter^{ni}$	$iter^{max}$
2	3	0.8	2	1.1	20	80	500



Şekil 1 - 1263-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı SAP2000 modeli.

Çalışmada kullanılan optimizasyon algoritması MATLAB [33] ile kodlanmış ve yapısal analizler ve tasarım kontrolleri için SAP2000 programının OAPI altyapısı kullanılmıştır. Analizler, Intel i7-12700H mobil CPU ve 32 GB DDR5 RAM'e sahip kişisel bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan optimizasyon yönteminin (Kaotik-KKA) kısmen stokastik yapıda olması sebebiyle, her problem için algoritma birden fazla kez bağımsız olarak çalıştırılmış ve elde edilen en hafif tasarım, o yapının optimum tasarımı olarak kabul edilmiştir. Kaotik-KKA algoritmasının bu çalışmada kullanılan parametre değerleri Tablo 1'de özetlenmektedir.

4.1. 1263-Elementli Kapalı Yüzme Havuzu Çatısı

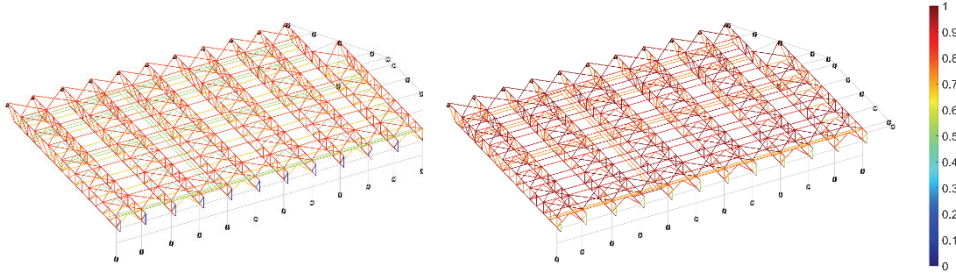
İlk örnek problem olarak, 1263-elementli bir yüzme havuzu çatısının optimum tasarımı ele alınmıştır (Şekil 1). Çatı, x-yönünde 79.10 metre, y-yönünde ise 53.99 metre uzunluğa sahip olup, çatı makaslarının yüksekliği (dikme uzunluğu) 3.25 metredir. Çelik elementler, yapının orijinal tasarımındaki gruplandırmaya uygun olarak 14-element grubuna ayrılmıştır. Bu element gruplarına kesit ataması yapmak üzere S275 sınıfındaki H kesitlerden ve S235 ve S355 sınıfındaki boru kesitlerden oluşan 2 farklı profil listesi kullanılmıştır. Yapının tasarımı

Tablo 2 - 1263-elementli kapalı yüzme havuzu çatısı - orijinal ve optimum tasarımların karşılaştırması

#	Element Grubu	Orijinal Tasarım		Optimum Tasarım	
		Kesitler	T/K Oranı	Kesitler	T/K Oranı
1	ALT BAŞLIK	HE360B	0.9427	HE340B	0.9775
2	ALT YATAY1	BORU 139.7x3.0-S355	0.6614	BORU 127.0x3.0-S235	0.9579
3	ALT YATAY2	HE220A	0.7666	HE200A	0.9871
4	DİKEY ÇAPRAZ1	BORU 139.7x3.0-S355	0.4851	BORU 114.3x3.0-S355	0.8423
5	DİKEY ÇAPRAZ2	BORU 168.3x4.0-S355	0.6784	BORU 165.1x4.0-S235	0.8319
6	DİYAGONALLER1	BORU 139.7x3.0-S355	0.0833	BORU 76.1x3.0-S235	0.5440
7	DİYAGONALLER2	BORU 168.3x4.0-S355	0.7594	BORU 168.3x4.0-S355	0.7718
8	DİYAGONALLER3	BORU 219.1x5.0-S355	0.8403	BORU 193.7x5.0-S355	0.9707
9	DİYAGONALLER4	BORU 244.5x6.0-S355	0.7822	BORU 244.5x6.0-S355	0.7661
10	KEDİYOLU	HE200A	0.5291	HE180A	0.7472
11	ÜST BAŞLIK	HE360B	0.8924	HE320B	0.9666
12	ÜST YATAY1	BORU 168.3x4.0-S355	0.8033	BORU 165.1x4.0-S235	0.8672
13	ÜST YATAY2	BORU 219.1x5.0-S355	0.5349	BORU 193.7x5.0-S355	0.7154
14	YATAY ÇAPRAZ	BORU 219.1x5.0-S355	0.8225	BORU 219.1x4.0-S235	0.9901
Tasarım Ağırlığı (ton)		307.81		277.27	
Tasarruf (%)		-		9.92	
Max. Düşey Deplasman (cm)		12.34		13.24	
Global Temel Periyot (s)		0.32		0.33	
Analiz Sayısı ve Süresi		-		71 Analiz (1 saat, 39 dakika)	

için toplamda 162 adet yük kombinasyonu tanımlanmış olup, bu yük kombinasyonlardan 159'u elemanların dayanım tahkikleri için, 3'ü ise makasların sehim kontrolleri için kullanılmıştır. Sehim hesaplamaları için tanımlanmış yük kombinasyonları altında çatı makaslarında oluşan düşey deplasmanlar 18.0 cm ile sınırlandırılmıştır.

Çatının bir proje firması tarafından geleneksel mühendislik yöntemleri kullanılarak elde edilen orijinal tasarımının ağırlığı 307.81 ton olarak belirlenmiştir. Kaotik-KKA yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda, bu ağırlık %9.92 oranında bir azalma göstererek 277.27 tona düşürülmüştür. Optimizasyon işleminde başlangıç tasarımı olarak yapının orijinal tasarımı kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi süresince 71 analiz yapılmış olup, algoritmanın toplam hesaplama süresi 1 saat 39 dakika olarak kaydedilmiştir. Yapının orijinal ve optimum tasarımları, yapı ağırlıkları, eleman gruplarına atanan kesitler, eleman grupları için hesaplanan en büyük T/K oranları, çatı makaslarında hesaplanan maksimum sehimler ve global temel periyotları açısından Tablo 2'de karşılaştırılmıştır. Her iki tasarım da sehim sınırlayıcılarını sağlamaktadır. Tablodaki global temel periyot değerleri, kütle katılımının en fazla olduğu modu temsil etmektedir. Orijinal ve optimum tasarımlarda global temel periyotların yakın olması, optimizasyon işlemi sonucunda yapının rijitliğinin yapının ağırlığı ile orantılı olarak azaldığını göstermektedir. Şekil 2'de tasarım modeli üzerinde grup bazında T/K oranları görselleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu görselleştirmeden optimum tasarım yöntemine göre boyutlandırılmış yapı elemanlarının, orijinal tasarıma kıyasla daha verimli kullanıldığı görülmektedir.

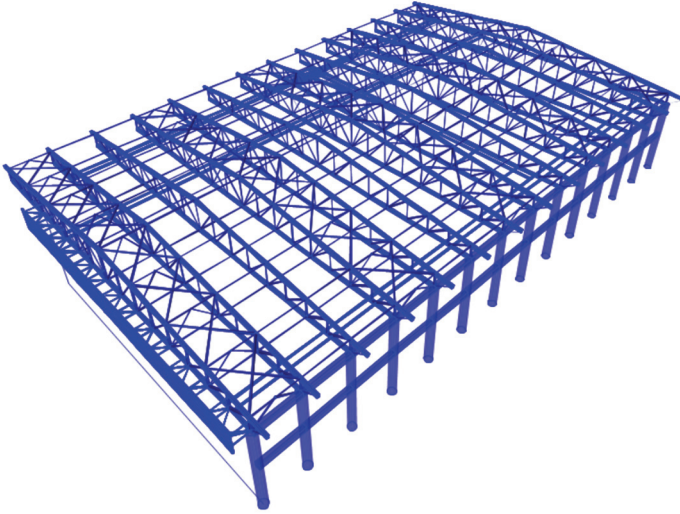


Şekil 2 - 1263-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı grup bazında talep/kapasite oranları (orijinal tasarım solda, optimum tasarım sağda)

4.2. 1567-Elementli Kapalı Yüzme Havuzu Çatısı

İkinci örnek problem olarak, 1567-elemanlı bir yüzme havuzu çatısının optimum tasarımı ele alınmıştır (Şekil 3). X-yönünde 76.80 metre uzunluğa, y-yönünde 49.40 metre uzunluğa sahip olan çatının, maksimum çatı makası yüksekliği (dikme uzunluğu) 4.25 metredir. Çelik elemanlar, yapının orijinal tasarımındaki gruplandırmaya uygun olarak 20-eleman grubuna ayrılmıştır. Bu eleman gruplarına kesit ataması yapmak üzere S275 sınıfındaki H kesitlerden, S275 sınıfındaki I kesitlerden, S235 sınıfındaki kutu kesitlerden ve S235 sınıfındaki boru kesitlerden oluşan 4 farklı profil listesi kullanılmıştır. Yapının tasarımı için toplamda 121 adet yük kombinasyonu tanımlanmış olup, bu yük kombinasyonlardan 115'i elemanların dayanım tahkikleri için, 6'sı ise makasların sehim kontrolleri için kullanılmıştır. Sehim

hesaplamaları için tanımlanmış yük kombinasyonları altında çatı makaslarında oluşan düşey deplasmanlar 16.47 cm ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 3 - 1567-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı SAP2000 modeli.

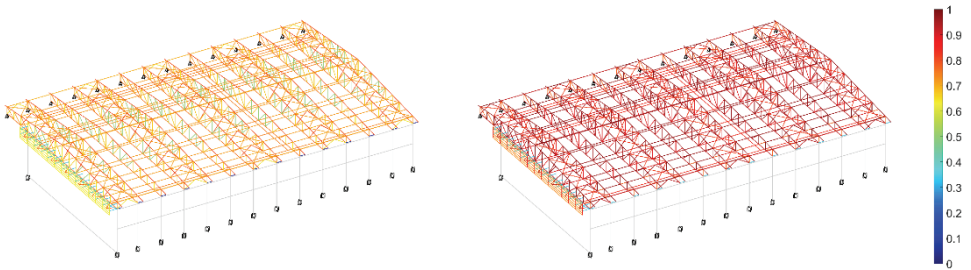
Çatının orijinal tasarımında yapı ağırlığı 240.55 ton olarak belirtilmiştir. Çatı elemanlarının optimum boyutlandırılması ile elde edilen tasarımın ağırlığı ise bu tasarıma kıyasla %17.95 daha hafif olup, sadece 197.37 tondur. Optimizasyon işleminde başlangıç tasarımı olarak yapının orijinal tasarımı kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi süresince 257 analiz yapılmış olup, algoritmanın toplam hesaplama süresi 5 saat 55 dakika olarak kaydedilmiştir. Yapının orijinal ve optimum tasarımları Tablo 3’de karşılaştırılmıştır. Bu tablodan her iki tasarımın da sehim kısıtlarını sağladığı görülmektedir. Optimizasyon işlemi sonucunda yapının periyodu biraz artmış olsa da orijinal ile optimum tasarımların periyotlarının yakın olması yapının kütlelerinin yapının rijitliğine olan oranının fazla değişmediğini ortaya koymaktadır. Şekil 3’de ise tasarım modeli üzerinde grup bazında T/K oranları görselleştirilerek karşılaştırılmıştır. Bu görselleştirmeden, optimum tasarım yöntemine göre boyutlandırılmış yapı elemanlarının orijinal tasarıma kıyasla daha verimli kullanıldığı açıkça görülmektedir.

Tablo 3 - 1567-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı - orijinal ve optimum tasarımların karşılaştırması.

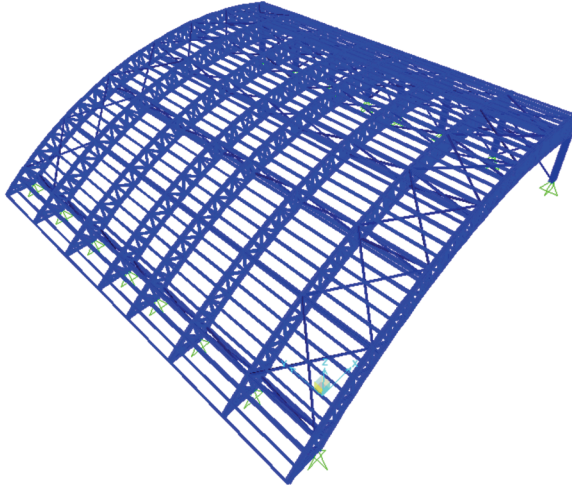
#	Eleman Grubu	Orijinal Tasarım		Optimum Tasarım	
		Kesitler	T/K Oranı	Kesitler	T/K Oranı
1	ALT BAŞLIK	HE300A	0.7671	HE260A	0.9386
2	ARA YATAYLAR1	BORU 139.7x3.0-S235	0.7240	BORU 127.0x3.0-S235	0.9779
3	ARA YATAYLAR2	BORU 168.3x4.0-S235	0.7023	BORU 159.0x3.0-S235	0.9290
4	DİKEY ÇAPRAZI	BORU 168.3x4.0-S235	0.6300	BORU 133.0x3.0-S235	0.9357

Tablo 3 - 1567-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı - orijinal ve optimum tasarımların karşılaştırması. (devam)

#	Eleman Grubu	Orijinal Tasarım		Optimum Tasarım	
		Kesitler	T/K Oranı	Kesitler	T/K Oranı
5	DİKEY ÇAPRAZ2	BORU 139.7x3.0-S235	0.8058	BORU 127.0x3.0-S235	0.9638
6	DİKEY DÜZ1	BORU 139.7x3.0-S235	0.7052	BORU 127.0x3.0-S235	0.9068
7	DİKEY DÜZ2	BORU 168.3x4.0-S235	0.7158	BORU 139.7x3.0-S235	0.9984
8	DİYAGONALLER1	BORU 139.7x3.0-S235	0.4963	BORU 101.6x3.0-S235	0.9688
9	DİYAGONALLER2	BORU 168.3x4.0-S235	0.6733	BORU 159.0x3.0-S235	0.8959
10	DİYAGONALLER3	BORU 219.1x4.0-S235	0.7536	BORU 165.1x4.0-S235	0.9564
11	DİYAGONALLER4	BORU 244.5x5.0-S235	0.6457	BORU 193.7x4.0-S235	0.9998
12	DİYAGONALLER5	BORU 273.0x8.0-S235	0.7303	BORU 323.9x6.0-S235	0.7842
13	DİYAGONALLER6	BORU 88.9x3.0-S235	0.0914	BORU 60.3x3.0-S235	0.3440
14	KEDİYOLU	IPE220	0.7573	IPE220	0.8555
15	PARAPET ÇAPRAZ	KUTU 60x4.0-S235	0.8149	KUTU 60x4.0-S235	0.9437
16	PARAPET DİKEY	KUTU 100x4.0-S235	0.6197	KUTU 80x4.0-S235	0.8652
17	PARAPET TAŞIYICI	KUTU 60x4.0-S235	0.3385	KUTU 60x4.0-S235	0.3416
18	PARAPET YATAY	KUTU 80x4.0-S235	0.6393	KUTU 80x4.0-S235	0.7381
19	ÜST BAŞLIK	HE320B	0.8146	HE340A	0.9778
20	YATAY ÇAPRAZ	BORU 219.1x4.0-S235	0.7215	BORU 193.7x4.0-S235	0.8304
Tasarım Ağırlığı (ton)		240.55		197.37	
Tasarruf (%)		-		17.95	
Max. Düşey Deplasman (cm)		6.91		8.16	
Global Temel Periyot (s)		0.49		0.52	
Analiz Sayısı ve Süresi		-		257 Analiz (5 saat, 55 dakika)	



Şekil 4 - 1567-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı grup bazında talep/kapasite oranları (orijinal tasarım solda, optimum tasarım sağda).



Şekil 5 - 1634-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı SAP2000 modeli.

4.3. 1634-Elemanlı Kapalı Yüzme Havuzu Çatısı

Üçüncü ve son örnek problemde, 1634-elemanlı bir yüzme havuzu çatısının optimum tasarımı ele alınmıştır (Şekil 5). Ark şeklinde makaslardan oluşan çatı, x-yönünde 35.65 metre, y-yönünde ise 41.95 metre plan uzunluğuna sahip olup, çatı makaslarının yüksekliği (dikme uzunluğu) 2 metredir. Yapının çelik elemanları, orijinal tasarımdaki gruplandırmaya uygun olarak 13-tasarım grubuna ayrılmıştır. Bu eleman gruplarına kesit ataması yapmak üzere S275 sınıfındaki H kesitlerden, S235 sınıfındaki boru kesitlerden ve S235 sınıfındaki UPN kesitlerden oluşan 3 farklı profil listesi kullanılmıştır. 3 numaralı eleman grubu için ise orijinal tasarımda kullanılan yapma kolon kesiti (Y900IST) olduğu gibi kullanılmıştır.

Bu örnek problem için iki farklı optimizasyon senaryosu oluşturulmuştur. İlk senaryoda, yapı eleman gruplarının kesit tipleri orijinal tasarıma uygun olarak belirlenmiştir. İkinci senaryoda ise, bazı eleman gruplarının kesit tiplerinde değişiklik yapılmış ve bu gruplar için daha elverişli olduğu düşünülen kesit tipleri kullanılmıştır. Bu değişiklikler şunları içermektedir: (1) 5. gruptaki diyagonaller için HEA/B profilleri yerine boru profiller kullanılmıştır, (2) 9. gruptaki aşıklar için HEA/B profilleri yerine UPN profiller kullanılmıştır, (3) 11. ve 12. gruptaki dikmeler için HEA/B profilleri yerine boru profiller kullanılmıştır. Yapının tasarımı için toplamda 59 adet yük kombinasyonu tanımlanmış olup, bu yük kombinasyonlardan 56'sı elemanların dayanım tahkikleri için, 3'ü ise makasların sehim kontrolleri için kullanılmıştır. Sehim hesaplamaları için tanımlanmış yük kombinasyonları altında çatı makaslarında oluşan düşey deplasmanlar 11.88 cm ile sınırlandırılmıştır.

Çatının geleneksel mühendislik yöntemleri kullanılarak elde edilen orijinal tasarımının ağırlığı 244.67 tondur. İlk senaryoda, yani eleman grupları için kesit tiplerinin orijinal tasarıma uygun olarak seçildiği durumda, yapılan optimizasyon sonucunda yapı ağırlığı %33.80 oranında azaltılarak 161.97 tona düşürülmüştür. Bu senaryoda, başlangıç tasarımı, her eleman grubuna bağlı olduğu profil listesindeki en büyük kesitin atanmasıyla

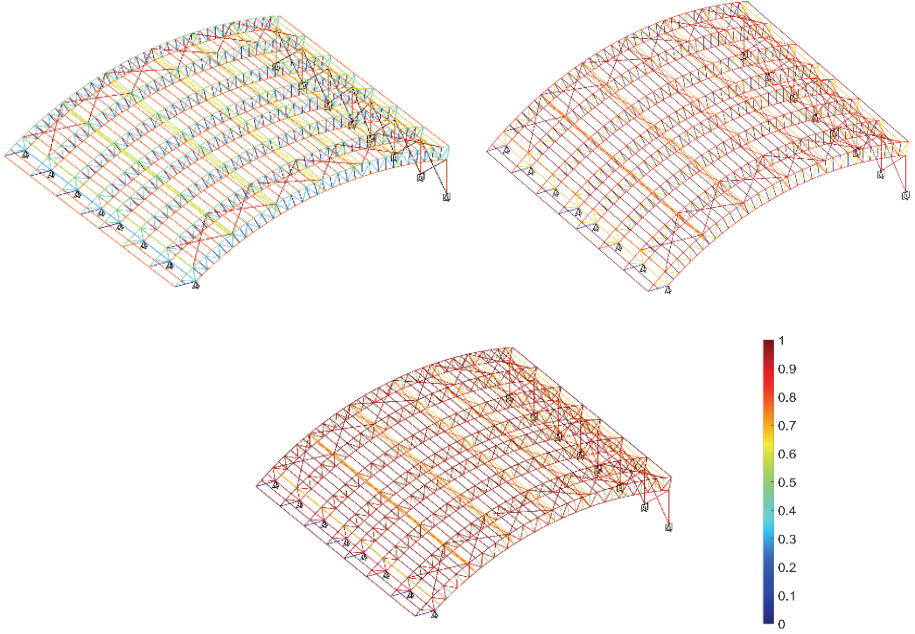
oluşturulmuştur. Optimizasyon işlemi süresince 308 analiz yapılmış olup, algoritmanın toplam hesaplama süresi 1 saat 40 dakika olarak kaydedilmiştir. İkinci senaryoda, yani kesit tiplerinde yapılan değişikliklerle gerçekleştirilen optimizasyon işleminde yapı ağırlığı orijinal tasarıma göre %40.52 azaltılarak, 145.54 tona düşürülmüştür. İlk senaryoda olduğu gibi bu senaryoda da, başlangıç tasarımı, her eleman grubuna bağlı olduğu profil listesindeki en büyük kesitin atanmasıyla oluşturulmuştur ve optimum tasarıma toplamda 55 dakika süren 171 analiz ile ulaşılmıştır.

Tablo 4 - 1634-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı - orijinal ve optimum tasarımların karşılaştırması

#	Eleman Grubu	Orijinal Tasarım		Optimum Tasarım (ilk senaryo)		Optimum Tasarım (ikinci senaryo)	
		Kesitler	T/K Oranı	Kesitler	T/K Oranı	Kesitler	T/K Oranı
1	ALT BAŞLIK	HE300A	0.7869	HE260A	0.8616	HE240A	0.9397
2	ALT BAŞLIK2	HE160A	0.0263	HE100A	0.0748	HE100A	0.0748
3	YAPMA KOLONLAR	Y900IST	0.8177	Y900IST	0.9329	Y900IST	0.9268
4	DİKEY ÇAPRAZLAR	BORU 168.3x6.0	0.6438	BORU 159.0x3.0	0.8481	BORU 159.0x3.0	0.8038
5	DİYAGONALLER	HE160A	0.3701	HE100A	0.6707	BORU 127.0x3.0	0.9343
6	YATAY ÇAPRAZLAR	BORU 193x12.0	0.9624	BORU 219.1x4.0	0.9821	BORU 219.1x4.0	0.9934
7	ARA YATAYLAR	HE240A	0.5464	HE200A	0.6959	HE200A	0.6598
8	AŞIKLAR1	UPN220	0.7980	UPN200	0.9999	UPN200	0.9946
9	AŞIKLAR2	HE240A	0.2702	HE160A	0.6905	UPN260	0.8883
10	ÜST BAŞLIK	HE300A	0.4720	HE120B	0.8593	HE120A	0.9929
11	DİKMELER1	HE180A	0.0676	HE100A	0.0652	BORU 60.3x3.0	0.5103
12	DİKMELER2	HE300A	0.3580	HE100A	0.6476	BORU 127.0x3.0	0.9856
13	KOLON ÇAPRAZLARI	BORU 168.3x6.0	1.1321	BORU 177.8x4.0	0.9330	BORU 177.8x4.0	0.9178
Tasarım Ağırlığı (ton)		244.67		161.97		145.54	
Kazanç (%)		-		33.80		40.52	
Max. Düşey Deplasman (cm)				2.33		2.58	
Global Temel Periyot (s)		0.42		0.64		0.69	
Analiz Sayısı ve Süresi				308 Analiz (1 saat 40 dk.)		171 Analiz (55 dakika)	

Yapının orijinal ve optimum tasarımlarının (her iki senaryo altında) karşılaştırması Tablo 4'de verilmiştir. Bu tablodan, orijinal tasarımda 13. grupta bir dayanım ihlali olduğu görülmektedir. Öte taraftan, orijinal ve her iki optimizasyon senaryosunda elde edilen optimum tasarımlar sehim kısıtlarını başarıyla karşılamaktadır. Optimizasyon işlemleri sonucunda yapı periyodunda gözlemlenen artış, eleman kesitlerinin küçülmesi ile birlikte yapının daha esnek hale geldiğine işaret etmektedir. Ancak, bu durum bu herhangi bir sorun teşkil etmemektedir. Zira optimum tasarımlar, sehim kriterleri de dahil olmak üzere tüm tasarım sınırlayıcılarını sağlarken, orijinal tasarımda dayanım sınırlayıcısı ihlali bulunmaktadır. Şekil 6'da tasarım modeli üzerinde grup bazında T/K oranları görselleştirilerek karşılaştırılmıştır. Bu görselleştirmeden, optimum tasarım yöntemine göre

boyutlandırılmış yapı elemanlarının, orijinal tasarıma kıyasla çok daha verimli kullanıldığı açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 6 - 1634-elemanlı kapalı yüzme havuzu çatısı - grup bazında talep/kapasite oranları (başlangıç tasarımı sol üstte, ilk senaryoya göre optimum tasarım üstte sağda, ikinci senaryoya göre optimum tasarım altta)

5. SONUÇ

Bu çalışmada ülkemiz mühendislik uygulamalarında büyük açıklıklı çelik çatı sistemlerinin ne derece ekonomik tasarlandığı araştırılmış ve yapı optimizasyonu ile elde edilebilecek maliyet avantajları ortaya koyulmuştur. Bu amaçla, bir kamu idaresi tarafından ihale edilerek Türkiye'nin farklı bölgelerinde inşa edilmiş üç kapalı yüzme havuzuna ait çelik çatı sistemlerinin optimum boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve bu sistemler için elde edilen optimum tasarımlar yapıların daha önceden geleneksel mühendislik yöntemleri kullanılarak oluşturulan orijinal tasarımları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde, büyük açıklıklı çelik çatı sistemlerinin tasarım aşamasında yapı optimizasyonu yöntemlerinin kullanılmasının, yapı ağırlığını ve dolayısıyla yapı maliyetini, %10-40 oranında azaltabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, eleman grupları için uygun kesit tipi seçilmesinin yapı maliyetinin düşürülmesinde önemli bir etken olduğu gösterilmiştir.

Çalışmada, ayrıca tasarım odaklı bir optimizasyon tekniği olan kaotik kapasite kontrollü arama (Kaotik-KKA) yönteminin ülkemizde inşa edilecek mühendislik yapılarının optimum boyutlandırılarak tasarlanması için önemli bir potansiyel barındırdığı gösterilmiştir. Kaotik-

KKA yönteminin basitliği ve az sayıda analizle optimum çözüme hızlı bir şekilde ulaşabilme yeteneği, bu yöntemi gerçek mühendislik uygulamalarında kullanışlı ve cazip kılmaktadır. Nitekim, bu çalışma kapsamında ele alınan gerçek yapı problemleri için optimum tasarımlara 71-308 analiz ile ulaşılmış ve optimizasyon süreci standart donanıma sahip bir kişisel bilgisayar ile birkaç saat içinde tamamlanmıştır. Yapısal çelik kullanımının azaltılması, yalnızca malzeme maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, nakliye ve imalat maliyetlerinde de ilave tasarruf sağlayacaktır. Ayrıca, çelik endüstrisinin çevresel etkilerini azaltarak daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir dünyaya katkıda bulunacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan örnek problemlerin hesap raporlarını ve tasarım modellerini yazarlarla paylaşılan proje ofislerine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Erbatur, F., Al-Hussainy, M. M. Optimum Design of Frames. Computers & Structures, 45, 887-91, 1992.
- [2] Tabak E. I., Wright, P. M. Optimality Criteria Method for Building Frames. Journal of Structural Division, ASCE, 107, 1327-1342, 1981.
- [3] Saka, M. P. Optimum Design of Steel Frames with Stability Constraints. Computers & Structures, 41, 1365-1377, 1991.
- [4] Goldberg, D. E. Samtani M. P., Engineering Optimization via Genetic Algorithm. In: Proceeding of the Ninth Conference on Electronic Computation, ASCE, 471-482, 1986.
- [5] Kirkpatrick, S., Gerlatt, C. D., Vecchi, M.P. Optimization by Simulated Annealing. Science, 220, 671-80, 1983.
- [6] Kennedy, J., Eberhart, R. Particle Swarm Optimization. In: IEEE International Conference on Neural Networks, IEEE Press, 1942-1948, 1995.
- [7] Colomi A., Dorigo, M., Maniezzo, V. Distributed Optimization by Ant Colony. In: Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, USA, 134-142, 1991.
- [8] Lee, K. S., Geem, Z. W. A New Structural Optimization Method Based On The Harmony Search Algorithm. Computers & Structures, 82, 781-798, 2004.
- [9] Toğan, V., Daloğlu, A. Genetik Algoritma ile Üç Boyutlu Kafes Sistemlerin Şekil ve Boyut Optimizasyonu. Teknik Dergi, 17(82), 3809-3825, 2006.
- [10] Hasançebi, O., Azad, S. K. An Exponential Big Bang-Big Crunch Algorithm For Discrete Design Optimization of Steel Frames. Computers & Structures, 110, 167-179, 2012.
- [11] Gandomi, A. H., Yang, X. S., Alavi, A. H. Cuckoo Search Algorithm: A Metaheuristic Approach to Solve Structural Optimization Problems. Engineering with Computers, 29, 17-35, 2013.

- [12] Artar, M., Daloğlu, A. Çok Katlı Kompozit Çelik Çerçevelerin Genetik Algoritma ile Dinamik Sınırlayıcı Optimizasyonu. *Teknik Dergi*, 26(2), 2015.
- [13] Askarzadeh, A. A Novel Metaheuristic Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems: Crow Search Algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12, 2016.
- [14] Mirjalili, S., Lewis, A. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67, 2016.
- [15] Karabörk, T., Sönmez, M., Aydın, E., Çelik, T., Bölükbaş, Y. Çelik Yapılarda Kullanılan Diyagonal Çelik Çaprazların Yapay Arı Koloni Algoritması ile Optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(1), 51-64, 2018.
- [16] Degertekin, S. O., Lamberti, L., Ugur, I. B. Sizing, Layout and Topology Design Optimization of Truss Structures Using the Jaya Algorithm. *Applied Soft Computing*, 70, 903-928, 2018.
- [17] Bekdaş, G., Yucel, M., Nigdeli, S. M. Evaluation of Metaheuristic-Based Methods for Optimization of Truss Structures via Various Algorithms And Lévy Flight Modification. *Buildings*, 11(2), 49, 2021.
- [18] Chan, C. M. Optimal Lateral Stiffness Design of Tall Buildings of Mixed Steel and Concrete Construction. *Structural Design of Tall Buildings*, 10(3), 155-77, 2001.
- [19] Elvin A, Walls R, Cromberge D. Optimising Structures Using the Principle of Virtual Work. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 51(2), 11-9, 2009.
- [20] Azad, S. K., Hasançebi, O. Computationally Efficient Discrete Sizing of Steel Frames via Guided Stochastic Search Heuristic. *Computers & Structures*, 156, 12-28, 2015.
- [21] Walls R, Elvin A. Optimizing Structures Subject to Multiple Deflection Constraints and Load Cases Using the Principle Of Virtual Work. *Journal of Structural Engineering*, 136(11), 1444-52, 2010.
- [22] Flager, F., Soremekun, G., Adya, A., Shea, K., Haymaker, J., Fischer, M. Fully Constrained Design: A General and Scalable Method for Discrete Member Sizing Optimization of Steel Truss Structures. *Computers & Structures*, 140, 55-65, 2014.
- [23] Kociecki, M., Adeli, H. Two-Phase Genetic Algorithm for Size Optimization of Free-Form Steel Space-Frame Roof Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 90, 283-296, 2013.
- [24] Dillen, W., Lombaert, G., Mertens, R., Van Beurden, H., Jaspaert, D., Schevenels, M. Optimization in A Realistic Structural Engineering Context: Redesign of The Market Hall in Ghent. *Engineering Structures*, 228, 111473, 2021.
- [25] De Souza, R. R., Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F., Torii, A. J. A Procedure for the Size, Shape and Topology Optimization of Transmission Line Tower Structures. *Engineering Structures*, 111, 162-184, 2016.
- [26] Luna, F., Zavala, G. R., Nebro, A. J., Durillo, J. J., Coello, C. A. C. Distributed Multi-Objective Metaheuristics for Real-World Structural Optimization Problems. *The Computer Journal*, 59(6), 777-792, 2016.

- [27] Lagaros, N. D. A General Purpose Real-World Structural Design Optimization Computing Platform. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49, 1047-1066, 2014.
- [28] Eser, H., Hasançebi, O., Gholizadeh, S. Optimizing Real-World Steel Structures: A Comparison with Design Office Solutions. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, ASCE, Under Review, 2024.
- [29] T. C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, 2018.
- [30] Eser, H., Hasançebi, O. Capacity Controlled Search: A New and Efficient Design-Driven Method for Discrete Size Optimization of Steel Frames. *Computers & Structures*, 275, 106937, 2023.
- [31] Computers and Structures Inc. SAP2000 version: 21.0.2. Berkeley, California, 2019.
- [32] AISC 360-10. Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, 2010.
- [33] MathWorks Inc. MATLAB version: 9.14.0 (R2023a), Natick, Massachusetts, 2023.

