Yapım Maliyetinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonunun Değer Mühendisliği Açısından İrdelenmesi

Ş. Atabay
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
satabay@yildiz.edu.tr

Özet

Yapıların statik ve betonarme hesapları yapılırken taşıyıcı sisteme ait elemanların geometrik boyutları mühendislik yeteneği, kazanılmış tecrübe ve sezgiye dayanılarak önceden tahmin edilir. Tasarım sırasında taşıyıcı sistem elemanlarının, kullanılan şartnamenin minimum koşullarını yerine getirmesine ve en olumsuz yükleme durumunda dahi gerilme ve yerdeğiştirme sınırlarını aşmamasına dikkat edilir. Uygulamada, taşıyıcı sistem elemanları, ilgili yönetmeliğin bütün şartlarını sağlamakla beraber sayısız farklı şekilde boyutlandırılabilir. Bununla beraber, bu tasarımların pek çoğu ekonomik çözümden oldukça uzaktır ve bunun için bir optimizasyon yönteminin kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, bir yapının Genetik Algoritma yöntemi yardımıyla optimizasyonu sonucunda elde edilen toplam maliyet değeri ile geleneksel yöntemle taşıyıcı eleman boyutları belirlenerek hesaplanan toplam maliyet değeri bir örnek üzerinde karşılaştırılacaktır. Taşıyıcı sistem tasarımında bir optimizasyon yöntemi kullanımının maliyete etkisi ve elde edilen maliyet değişiminin değer mühendisliği açısından irdelenmesiyle değere olan katkısı belirlenecektir.

Anahtar Kelimeler: *Maliyet Optimizasyonu, Genetik Algoritma, Değer Mühendisliği, Değer.*

Giriş

Mühendisler tarafından bir yapı sistemi tasarlanırken genellikle şöyle bir yol izlenir: Projelendirilmesi istenen yapının taşıyıcı sistem elemanlarına tasarımcı tarafından mühendislik tecrübelerine dayanılarak ön boyutlar verilir. Sistemin hesabı yapıldıktan sonra, hesap sonuçlarının, geçerli olan şartnamenin koşullarını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Kontroller sonucunda, yetersiz olduğu görülen boyutlar varsa değiştirilerek yeterli hale getirilir. Ancak, yapılan bu değişiklik genellikle daha önce verilmiş olan ön boyutlar esas alınarak yapılır. Sonuç olarak, elde edilen sistem, şartnamenin bütün koşullarını sağlayan, güvenilir bir taşıyıcı sistem olabilir. Ancak, bu yöntemle sonsuz sayıda sistem oluşturmak mümkündür ve bu sistemlerin her birinin maliyeti birbirinden farklıdır. En ideal sistem ise güvenilirliği ve ekonomiyi bir arada sağlayan sistemdir. Bu da, taşıyıcı sistem tasarımı esnasında maliyet optimizasyonunu gerekli hatta zorunlu kılmaktadır.

Genetik Algoritma ile Maliyet Optimizasyonu

Yapı optimizasyonu ile ilgili çalışmalar, sonlu eleman yönteminin de geliştirilmesi ile birlikte 1959 yılından itibaren inşaat mühendisliği problemlerine uygulamaya başlanmıştır **(**Şuhubi, 1959). Ancak ilk çalışmalarda, bilgisayar kapasitelerinin kısıtlı olması nedeniyle güçlükler yaşanmış, mevcut optimizasyon yöntemleri çok bilinmeyenli sistemlere uygulanamadığı için yöntemler de fazla geliştirilememiştir. 1980'li yıllardan sonra ise yaşantımızın neredeyse her alanına girmiş olan bilgisayar, optimizasyon yöntemlerinin uygulanabilmesi için de kullanılmaya başlanmış ve böylece, sonsuz sayıda iterasyonun yapılabildiği yeni optimizasyon yöntemleri geliştirilmiş, çok daha karmaşık problemler sınırsız sayıda tasarım değişkenleri ve kısıtlamalar alınarak çözülebilmiştir (Adamu ve diğerleri, 1994), (Guerra ve Kiousis, 2006), (Gare ve Angalekar, 2016).

Günümüzde, mühendisliğin bir çok dalında optimizasyondan yararlanılmakta ve optimum çözümler için çeşitli matematiksel programlama teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin çoğunda, tasarım değişkenlerinin "sürekli" olduğu kabul edilmektedir, ancak, bu özellik her mühendislik problemine uygulanamaz. Özellikle inşaat mühendisliğinde, matematiksel programlama tekniklerinin yanı sıra "ayrık" tasarım değişkenlerinin kullanılması gerekliliği ile çok sık karşılaşılmaktadır. Genetik Algoritma yöntemi, ayrık tasarım değişkenlerini kullanan yöntemlerden biridir.

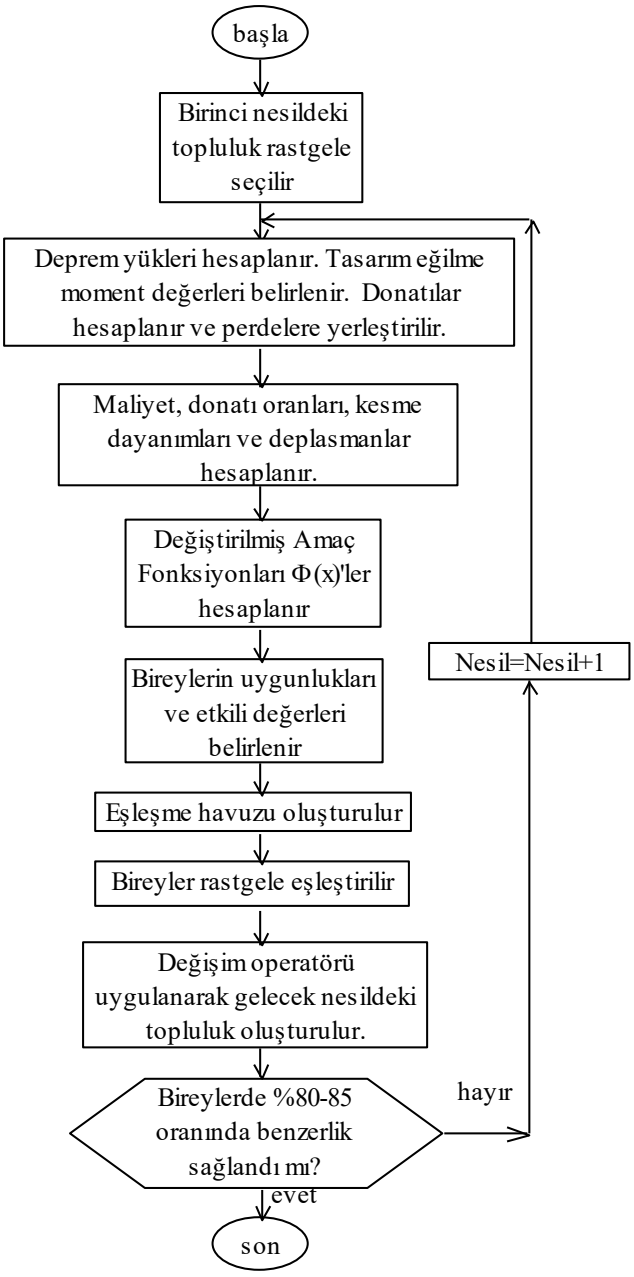
Bu çalışmada, optimum yapı tasarımı probleminin çözümü için ilk olarak Goldberg tarafından önerilen Genetik Algoritma" kullanılacaktır (Goldberg, 1989). Genetik Algoritmalar, doğal seçim ve doğal genetik mekaniğine dayanan arama algoritmalarıdır. Bunlar, insan araştırmacılığının yenilikçi anlayışı sayesinde, rastgele bilgi değişimiyle yapılandırılmış bir arama algoritması ile Darwin'in "*doğada güçlü olan hayatta kalır, zayıf olan ölür*" prensibinin birleştirilmesiyle oluşmuşlardır. Genetik algoritmanın, ilk ismi ile biyoloji, ikinci ismi ile ise bilgisayar biliminden faydalandığı görülmektedir. Bu yöntem, bütün canlılarda yaşanan evrim sürecinden etkilenerek geliştirilen, kopyalama, çoğalma ve çaprazlama operatörleri kullanılarak araştırma uzayındaki yeni noktaların belirlendiği doğal seçme ve doğal gen mekaniğine dayanan bir araştırma yöntemidir. Genetik Algoritmalar, optimizasyon probleminin çözümünde, doğadaki genetik yasalara benzer kurallar aracılığıyla en iyiye yaklaşma olanağı sağlamaktadır.

Genetik Algoritmalar'ın temel prensibi, her adımda bir önceki nesilden yeni bireyler oluşturarak amaç fonksiyonunun uygunluğunu artırmak ve sonuç olarak belli kısıtlamalar altında amaç fonksiyonunu sağlayan en uygun değeri elde etmektir. Genetik algoritmada öncelikle bir başlangıç nesli belirlenerek işleme başlanır. Bu, nesli oluşturan her bir bireyin ikilik sayı sisteminde kodlanıp bir araya getirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu bireyler, yapay kromozomlar olarak adlandırılırlar ve sonlu sayıda dizilerden oluşturulurlar. Dizilerdeki her bir sayı yapay bir geni temsil eder ki bu, ya '0' ya da '1' dir. Her bir tasarım değişkeni için ikilik kodlama set, yani araştırma uzayı içindeki sıra numarasını temsil eder.

Yeni bir nesil oluşturmak amacıyla, var olan nesildeki bireyler eşleşmekte, anne ve babalarından aldıkları genlerle, eski nesilden tamamen farklı yeni bireyler oluşmaktadır. Her adımda, o neslin en zayıf bireyleri öldüğünden, genellikle, güçlü anne ve babadan meydana gelen çocukların oluşturduğu yeni nesil bir öncekinden çok daha güçlü

olmaktadır. Birçok nesil yaşatıldıktan sonra, en iyi, yani, en güçlü bireyler toplulukta artmakta ve nesil, benzer bireyler tarafından oluşturulmaktadır. Bir nesilde, başlangıçta belirlenen oranda, benzer sayıda birey oluşması durumunda işleme son verilmekte ve bu birey başlangıç neslinden itibaren yaşayan bireyler arasında, önceden belirlenmiş olan hayat standardını yakalayan, yaşam şartlarına en iyi göğüs gerebilen, en güçlü ve en uygun birey olmaktadır. Bu birey optimizasyon probleminde optimum çözümü temsil etmektedir (Rajeev ve Krishnamoorthy, 1992).

Bu çalışmada sunulan sayısal uygulamanın çözümü için, üç boyutlu perdeli betonarme sistemlerin genetik algoritma yöntemi yardımıyla maliyet optimizasyonunun yapılması amacıyla hazırlanan GENOPT bilgisayar programının genel akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. GENOPT Programı Akış Şeması

Amaç Fonksiyonu

Optimizasyon, problemin çözümünde, en iyiyi, en ideali bulma süreci olarak tanımlanabilir. Amaç fonksiyonu ise, bir optimizasyon probleminde ulaşılmak istenen hedefin matematiksel ifadesidir. Ancak "iyi" veya "ideal" kavramı problemin türüne göre değişir. Bazen amaç fonksiyonunun minimum değerde olması en iyi iken, bir başka problemde maksimum olması ideal bir çözüm olabilir. Bu, tamamen optimize edilmek istenen problemde neyin amaçlandığına bağlıdır.

Optimize edilecek problem, bir maliyet problemi ise, tabii ki, en düşük maliyetle en ideal çözüme ulaşılmak istenir. Böyle bir durumda amaç fonksiyonunun minimize edilmesi, yani, en düşük değerinin bulunması gereklidir. İnşaat mühendisliğindeki optimum tasarım problemlerinin hemen hemen hepsinde minimizasyon problemi ortaya çıkmaktadır. Uçak yapımında "en iyi" çözüm zati ağırlığının minimum olması, ticari bir işletmede ise "en iyi" çözüm net kârın ya da kâr/masraf oranının maksimum olmasıdır. Kolayca ölçülebilir ve formüle edilebilir olması nedeniyle, ağırlığın minimizasyonu, literatürde en yaygın olarak kullanılan amaç fonksiyonudur. Yapının ağırlığı, önemli kriterlerden biridir, ancak, ağırlığın minimum olması her zaman en ekonomik çözümü sağlamaz. Maliyet, çoğu zaman ağırlıktan daha fazla önem kazanır. Gerçek maliyet fonksiyonunu oluşturmak için yeterli veri oluşturmak çoğu zaman oldukça zordur. Genel bir maliyet fonksiyonunda, malzeme, işçilik ve nakliye gibi birçok değişken bulunur. Buna ek olarak, maliyet fonksiyonu, tasarım ve yapımda gerekli olan işletme, bakım, onarım ve sigorta gibi diğer maliyet faktörlerini de içerebilir. Bununla beraber, yapı maliyetinin önemli bir kısmı malzeme ağırlığı ile orantılı olduğu için çoğu zaman yapı ağırlığının minimizasyonu yapı optimizasyonu için oldukça uygun bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada amaç fonksiyonu, üç boyutlu, perdeli bir yapı sisteminin maliyetidir. Maliyet hesabının genel formülasyonu denklem (1)'de verilmiştir.

$$f(x) = C_{bc}\, W_{çl} + C_{bb}\, V_{bt} \qquad (1)$$

Burada,
$f(x)$: Maliyet fonksiyonu
V_{bt} : Yapıda kullanılan toplam beton miktarı (m^3)
$W_{çl}$: Yapıda kullanılan toplam çelik miktarı (kN)
C_{bb} : Betonun 1 m^3'ünün fiyatı
C_{bc} : Çeliğin 1 kN'unun fiyatı

Sayısal uygulamada, sadece kullanılan beton ve çeliğin maliyetleri dikkate alınmış, nakliye, işçilik, kalıp, vb. maliyetlerin pratikte çok değişmeyeceği varsayılmıştır.

Tasarım Değişkenleri

Optimizasyon işlemi yapılırken, yapı sistemini meydana getiren bazı parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler, sistem düzenlenirken, "önceden belirlenen parametreler" olarak adlandırılırlar ve optimizasyon algoritmasıyla değişmezler. Önceden belirlenemeyen parametrelere ise, "tasarım değişkenleri" denir. Tasarım değişkenleri ile önceden belirlenen parametreler, birlikte bir tasarımı tanımlayacaklardır.

Tasarımcı, belirli parametrelerin seçiminde, özgür olmayabilir veya iyi bir sonuç meydana getirecek olan belirli parametreler ancak tecrübe ile bulunabilir. Bazı etkenlerin sabit kabul edilmesiyle, yani optimizasyon probleminin çözümü sırasında bunların sabit alınmasıyla, problem, büyük bir oranda basitleştirilebilir. Bu çalışmada tasarım değişkenleri, yapı sisteminde yer alan perdelerin enkesit boyları olarak alınacaktır.

Kısıtlamalar

Bir optimizasyon probleminde, amaç fonksiyonunun içerdiği tasarım değişkenlerinin veya tasarım değişkenlerini dolaylı olarak etkileyen parametrelerin sağlaması gereken koşullar olabilir. Bu koşullar "kısıtlama" olarak isimlendirilir ve kısıtlamaların yer aldığı problemlere de "kısıtlamalı optimizasyon problemleri" denir. Genetik Algoritma, kısıtlamasız optimizasyon problemleri için son derece uygundur. Bu nedenle, kısıtlamalı optimizasyon problemleri kısıtlamasız problemlere dönüştürülerek kullanılabilir. Dönüştürme işlemi genellikle normalize edilen kısıtlamaların ihlal edilmesi esasına dayanan bir formülasyon kullanılmaktadır.

$$g_{i,j}(x) = \frac{M_{i,j}}{M_{i,ju}} - 1 \leq 0 \qquad i = 1,.....,p \qquad j = 1,.....,nm \tag{2}$$

Buradaki;
p : kısıtlama sayısı
nm : eleman sayısı
$M_{i,j}$: j. elemandaki i. kısıtlamanın aldığı değer
$M_{i,ju}$: j. elemandaki i. kısıtlamanın üst sınır değeri

$$g_{i,j}(x) > 0 \text{ ise } c_{i,j} = g_{i,j}(x) \tag{3}$$

$$g_{i,j}(x) \leq 0 \text{ ise } c_{i,j} = 0 \tag{4}$$

$$C = \sum_{i,j=1}^{p,nm} c_{i,j} \tag{5}$$

Buradaki C, zorlanma katsayısıdır. Böylece, kısıtlamalar probleme bir C katsayısı olarak katılmış olurlar.

Genetik Algoritmada Tablo İşlemleri

Genetik algoritma işlemleri tablolar yardımıyla yapılmaktadır. Optimizasyon probleminin tasarım değişkenleri, daha önce belirlenmiş olan araştırma uzayından rastgele seçildikten sonra, amaç fonksiyonu bu tasarım değişkenleri ile çözülür. Elde edilen amaç fonksiyonu değeri tabloda yerine yazıldıktan sonra bu amaç fonksiyonunun sağlaması gereken kısıtlamalar da bir önceki kısımda anlatıldığı şekilde normalize edilerek bir C katsayısı olarak tabloda gösterilir. Bütün bu işlemler, bir tabloyu oluşturan bir neslin rastgele seçilen birey sayısı kadar tekrarlanır.

Genetik algoritma tarafından gerekli olan uygunluk kriterini elde etmek için kısıtlamalı amaç fonksiyonunun kısıtlamasız probleme dönüştürülmesi gerektiği daha önce belirtilmiştir. Böylece, kısıtlamasız amaç fonksiyonu, her bir birey için, C zorlanma katsayısı da hesaba katılarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Phi(x) = f(x)(1+KC) \quad (6)$$

Buradaki;
f(x) : Amaç fonksiyonu
K : Bir sonraki nesilde tek bir zorlamanın etkisine bağlı olarak seçilen katsayı
C : Zorlanma katsayısı

Φ(x), bir kısıtlamasız fonksiyondur ve minimumu Genetik Algoritma tarafından belirlenir. Bu yöntem, bireyler arasında seçim yapabilmek için bir kriterin kullanımını gerektirir. Kısıtlamasız amaç fonksiyonu Φ(x), her bir birey için hesaplandıktan sonra uygun değerlerle değiştirilmesi gerekir. Bu, şöyle yapılmalıdır ki en iyi birey en fazla uygunluğa sahip olsun. Goldberg (1989) önermiştir ki, minimizasyon problemleri için, Φ(x), büyük bir sabit değerden çıkarılmalıdır, böylece bütün uygun değerler nonnegatif olur ve etkili değerlerine göre bireylerin uygun değerleri elde edilir. Bu sabit değer, Φ(x)'in bir tablodaki maksimum ve minimum değerlerinin toplanmasıyla bulunmaktadır. Uyum derecesi için hesap şu şekilde yapılır:

$$F_{udi} = [\Phi i(x)_{max} + \Phi_i(x)_{min}] - \Phi_i(x) \quad (7)$$

Buradaki $F_{ud(i)}$, i bireyinin uyum derecesi, i indisi bir nesildeki bireyi gösterir. $\Phi i(x)_{max}$ ve $\Phi_i(x)_{min}$, bütün bireylerden oluşan topluluk içinde kısıtlamasız (6) ifadesinin alacağı maksimum ve minimum değerdir. Her bir bireyin uyum faktörü ise;

$$F_{udi} / F_{ort} \quad (8)$$

ile hesaplanır. Buradaki n topluluktaki toplam birey sayısı olmak üzere,

$$F_{ort} = \Sigma F_{udi} /n \quad (9)$$

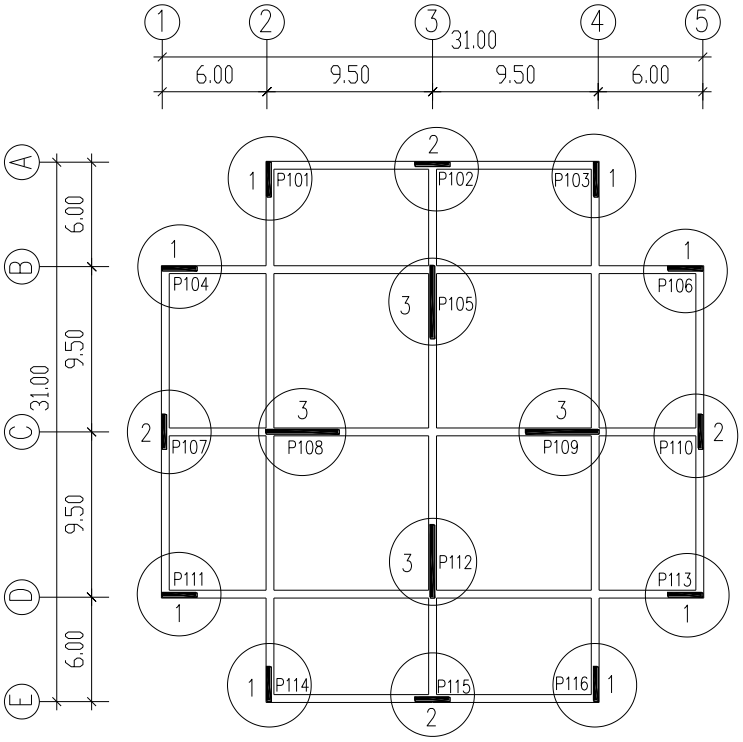
dir. Bu orana bakılarak her bir bireyin yok edilmesine veya bir sonraki nesil için eşleşme havuzuna kopyalanmasına karar verilmektedir.

Bir sonraki adım, bir sonraki nesil için yeni bir topluluk oluşturmaktır. Oluşturulan bu topluluk bir önceki neslin çocukları olacaktır. Eşleşme havuzu oluşturulduktan sonra bireyler burada rastgele eşleşmekte ve çaprazlama ve değişim operatörleri uygulanmaktadır. Böylece bir sonraki nesil meydana gelmektedir. Bu üreme yöntemi Darwin'in güçlü olanın hayatta kalması, zayıf olanın ise yaşamının sona ermesi prensibidir.

Sayısal Uygulama

Şekil 2'de kat planı görülen örnek yapı sisteminde, düşey taşıyıcı elemanlar olarak enkesitte boyutları değişken üç tip perde bulunmaktadır. Simetrik düzendeki yapının her katında toplam 16 adet perde vardır. Bina yüksekliği boyunca perde boyutlarının değişmediği, yani zemin katta seçilen perde boyutlarının bina yüksekliği boyunca sabit devam ettiği kabul edilmiştir. Perdelerin b_w enkesit genişlikleri sabit, l_w enkesit boyları

ise değişkendir. Bu durumda optimizasyon probleminde perdelerin üç tipte olması nedeniyle tasarım değişkenlerinin sayısı üç olacaktır (Atabay, 2004).



Şekil 2. Örnek Uygulama için Kat Planı

Sistem kirişli olup mimari nedenlerle kiriş boyutlarının değişmediği kabul edilmiştir. Bunun için söz konusu yapı sistemi, araştırma uzayındaki minimum ve maksimum perde boyutları ele alınarak çözülmüş ve en olumsuz durum için gerekli olan kiriş boyutları belirlenerek sisteme uygulanmıştır. Ancak, her sistem için kiriş iç kuvvetlerinin, dolayısıyla kiriş donatılarının değişiminin sistemin toplam malzeme maliyetine etkisi dikkate alınmıştır. Problemde amaç, minimum maliyete sahip sistemi oluşturan perde enkesit boylarını yani l_{w1}, l_{w2}, l_{w3} boyutlarını bulmaktır.

Yapının Malzeme ve Geometrik Özellikleri:

Malzeme	: C25/S420
Kat sayısı	: 20
Toplam bina yüksekliği	: 60 m
Perdelerin plandaki genişlikleri	: $b_w = 0.25$ m
Kiriş boyutları	: 0.25×0.85 m
Döşeme kalınlığı	: $h_f = 0.12$ m
Deprem bölgesi	: 1

Genetik Algoritma Yöntemi Yardımıyla Çözülen Sistemin Maliyet Hesabı

Genetik Algoritma ile İlgili Kabuller:

Genler (İkili sayı sistemi elemanları) : 1, 0
Dizi uzunluğu (bir dizideki toplam gen sayısı) : 5
Tasarım değişkeni sayısı : 3
Popülasyon sayısı (bir nesildeki birey sayısı) : 16

Araştırma Uzayının Belirlenmesi:

Araştırma uzayı, sistemin optimum maliyetinin elde edildiği muhtemel perde boylarının listesidir. Bu listenin eleman sayısı, dizi uzunluğu ile belirlenir. 5 uzunluğundaki bir dizinin ifade ettiği onluk taban değeri; $(11111)_2 \rightarrow (31)_{10}$'dir. $(00000)_2$, onluk sayı sistemine göre "0"a eşit olmasına rağmen sonuç olarak bir sayıyı ifade ettiği için araştırma uzayındaki eleman sayısı; $S_e = 31 + 1 = 32$ olacaktır. Araştırma uzayının seçilen 32 adet elemanı aşağıdaki gibidir:

Se : (180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440, 450, 460, 470, 480, 490)

Bireylerin Oluşturulması:

Bir nesli oluşturan toplam birey sayısı önceden 16 olarak belirlenmiştir. Bireylerin uzunlukları, yani, bir bireyi oluşturan toplam gen sayısı ise şöyle belirlenir: Bu problemde üç adet tasarım değişkeni olduğuna göre üç tane tasarım değişkeninin, yani üç tane dizinin yan yana yazılması gerekir. Böylece bir birey oluşacaktır.

5(dizi uzunluğu) × 3(tasarım değişkeni sayısı) = 15 (gen sayısı)

$F = Z(l_{w1}, l_{w2}, l_{w3})$'dür. Buradan Genetik Algoritma kodlamasına geçilecek olursa, gen haritası şu şekilde olur: F = Z(11111,11111,11111). Birey, (00000,00000,00000) ile (11111,11111,11111) değerleri arasında değişmektedir. Bireyin uzunluğu 15'dir.

Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlamalar:

Amaç fonksiyonu, çeliğin birim maliyeti ile betonun birim maliyeti arasındaki oran $C_{bc}/C_{bb} = 1.5$ alınarak hesaplanmıştır. Kısıtlama olarak ise; Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY, 2007)'de yer alan kesme kuvveti, donatı yüzdesi ve yerdeğiştirme koşulları denklem (2)'ye göre kısıtlamasız probleme dönüştürülerek kullanılmıştır.

34. nesilde optimum çözüme ulaşılmıştır ve elde edilen optimum çözümü temsil eden perde enkesit boyları $(l_{w1}, l_{w2}, l_{w3}) = (200, 200, 370)$'dir. Tablo 1'de 34. nesil, Şekil 3'de ise her nesil için hesaplanan minimum maliyetler grafik halinde gösterilmiştir.

Optimum çözüme ait yapıda kullanılan toplam beton ve donatı miktarları ise şöyledir:

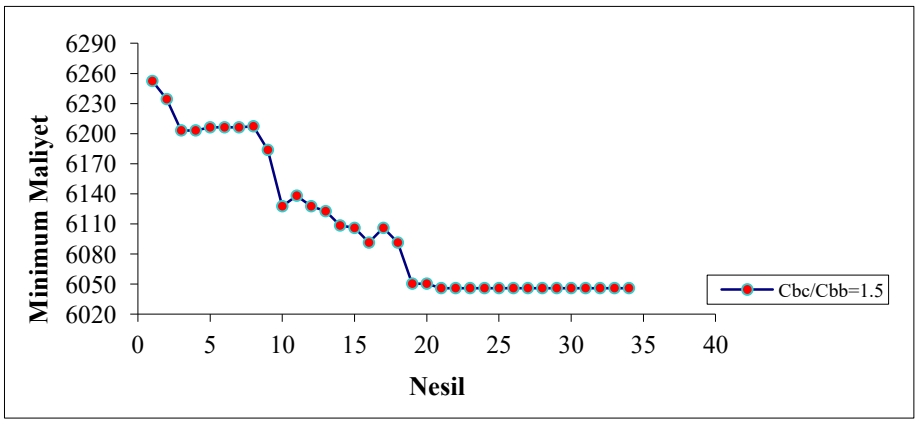
$V_{bt} = 2467.42\ m^3$
$W_{çl} = 2386.810$ kN

Optimum çözüme ait amaç fonksiyonu değeri;

f(x) = 2467.42 + 1.5 × 2386.810 = 6047.6350 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. 34. Nesil – Optimum Çözüm

Birey No	Topluluk	l_{w1} (cm)	l_{w2} (cm)	l_{w3} (cm)	f(x)	C	Φ(x)	F_i	$F_{udi}/F_{udi(ort}$	Etkili değer	Eşleşme havuzu	Eş	$ça_1$	$ça_2$	Gelecek nesil
1	0000100010010001	190	200	350	6050,3328	0,0000	6050,3328	6047,6350	0,9996	0	0001000**10**10011	10	7	11	000100001010011
2	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	2	0001000010100**11**	9	13	15	000100001010011
3	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000010**10**011	6	11	13	000100001010011
4	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	**000**10000101001**1**	12	1	14	000100001010011
5	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000010100**11**	7	13	14	000100001010011
6	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000010**10**011	3	11	13	000100001010011
7	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000010100**11**	5	13	14	000100001010011
8	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	**00**0100001010011	14	1	2	000100001010011
9	0000100010010111	190	200	410	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0000100010101**11**	2	13	15	000010001010111
10	0000100001010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000**10**10011	1	7	11	000100001010011
11	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000010100**11**	15	12	15	000100001010011
12	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	**00**0100001010011	4	1	14	000100001010011
13	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	**000**10000101**0**011	16	3	11	000100001010011
14	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	**00**0100001010011	8	1	2	000100001010011
15	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	0001000010100**11**	11	12	15	000100001010011
16	0001000010010011	200	200	370	6047,6350	0,0000	6047,6350	6050,3328	1,0000	1	**000**10000101**0**011	13	3	11	000100001010011



Şekil 3. Nesil – Minimum Maliyet Grafiği

Geleneksel Yöntemle Çözülen Sistemin Maliyet Hesabı

Yapısal bir sistemin tasarımını yaparken, optimizasyon yöntemlerinden birini kullanmayan bir mühendis, genellikle şöyle bir yol izler:

Yapının taşıyıcı elemanlarını, yönetmeliklerin ve tecrübesinin gerektirdiği minimum ölçülerde boyutlandırır ve çözümünü yapar. Yetersiz elemanların boyutlarını bir miktar artırır ve sistemi tekrar çözer. Bu işlemi, bütün taşıyıcı sistem eleman boyutları yeterli oluncaya kadar tekrarlar. Sonuçta, şartname koşullarını sağlayan yeterli boyutlara sahip sistemi oluşturur.

Şekil 2'deki sistem böyle bir yaklaşımla çözüldüğünde elde edilen perde enkesit boyları l_{w1}=180 cm, l_{w2}=180 cm ve l_{w3}=240 cm bulunmuştur. Bu perde boyutları sisteme uygulandığında elde edilen malzeme miktarları:

V_{bt} = 2382.32 m^3
$W_{çl}$ = 2566.085 kN olarak hesaplanmıştır.

Maliyet oranı C_{bc}/C_{bb}=1.5 alınarak elde edilen amaç fonksiyonu değeri ise;
$f(x) = 2382.32 + 1.5 \times 2566.085 = 6231.4475$ 'dir.

Çözümlerin Karşılaştırılması

Sayısal uygulama C_{bc}/C_{bb}=1.5 alınarak çözüldüğünde amaç fonksiyonu $f(x) = 6047.6350$ olarak hesaplanmıştı. Şartnamenin gerektirdiği ve sisteme etki eden yükleri güvenli bir şekilde taşıyan minimum perde boyutları kullanılarak hesaplanan amaç fonksiyonu değeri ile optimum perde boyutlarının sisteme uygulanmasıyla elde edilen amaç fonksiyonu değeri arasındaki fark 6231.4475 – 6047.6350 = 183.8125'dir. Yani, optimizasyon yöntemi kullanıldığında, bu örnek için %3.04 gibi bir ekonomi sağlanmıştır.

Sağlanan bu ekonomi, her zaman sabit bir değer değildir. Ele alınan her sistem için farklı olabileceği gibi, aynı sistemde, yapıya etki eden yüklerin değişmesi durumu için de değişkendir.

Maliyet Optimizasyonunun Değer Mühendisliği Açısından İrdelenmesi

Bugünkü ekonomik koşullar maliyet denetiminin tasarımın ilk aşamalarından başlayarak projenin tamamlanmasına kadar geçen süre içerisinde yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Tasarım tamamlandıktan sonra yapım aşamasında yapılan herhangi bir değişiklik proje maliyetini ve süresini büyük ölçüde etkileyecektir. Bu nedenle tasarım aşamasında projenin iyi irdelenmesi ve mümkün olan bütün alternatiflerin düşünülmesi optimum maliyeti elde etmek açısından önemlidir. Değer Mühendisliği, disiplin gerektiren bir grup çalışması olup bina elemanlarının fonksiyonları üzerinde yoğunlaşarak maliyeti kaliteyi etkilemeden azaltmayı amaçlar (Ergönül, 1996).

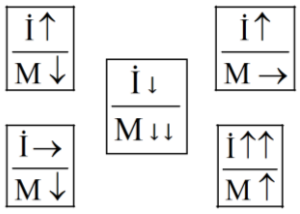
Değer mühendisliği; "var olan ürünleri geliştirmek, yeni ürünler ortaya koymak, karmaşık çevresel projeler gerçekleştirmek, faaliyet analizi yapmak, kalite ve güvenirlik sistemlerini iyileştirmek, gereksiz maliyetlerden kaçınmak, riski azaltmak ve başarıyı arttırmak amaçlarıyla yaklaşık yarım yüzyıldır uygulanan, fonksiyon, ürün, süreç ve sistem odaklı bir teknik"tir (Örnek, 2003). Bir başta yaklaşıma göre Değer Mühendisliği, "belirli bir kalite, güvenilirlik ve hedef maliyetle, belirli bir amaca ulaşabilmek için belirli bir mamulün maliyetlerini etkileyen faktörlerin sistematik ve disiplinler arası incelenme sürecidir (Acar ve Alkan, 2003).

Değer Mühendisliği'ndeki değer kavramı kabaca şu şekilde ifade edilebilir;

$$\text{Değer} = \frac{\text{İşlev}}{\text{Maliyet}} \tag{10}$$

Buradaki işlev; malzeme, tasarım, sistem ve hizmet kalitesi, kullanım ve bakım - onarım kolaylığı ve maliyeti, çevresel uyum, enerji verimliliği vs. olarak değerlendirilebilir. Bir başka ifadeyle amaçlanan fayda olarak da düşünülebilir.

Bu durumda uygulanabilecek değer artırma yaklaşımları için aşağıdaki yaklaşımlar söz konusu olacaktır:



Bu çalışmada sunulan sayısal uygulamada, bir optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen toplam yapı maliyet değeri ile geleneksel yöntemle elde edilen toplam yapı maliyet değeri arasında %3.04 kadar bir maliyet azalması söz konusu olmakla birlikte, yapının kalitesinde, güvenilirliğinde, yani, işlevinde veya faydasında herhangi bir değişim olmamış, ancak, maliyetinde azalma meydana gelmiştir. Yani değer artırma yöntemlerinden;

$$\text{Değer} = \boxed{\frac{\text{İ}\rightarrow}{\text{M}\downarrow}}$$

durumu gerçekleşmiş, böylece bir değer artışı söz konusu olmuştur.

Sonuçlar

Maliyet optimizasyonu, ekonomik çözümler sağlanması açısından oldukça önemlidir. Çelik yapılarda boyutların minimum seçilmesi, ağırlığı ve dolayısıyla maliyeti minimum yapar. Ancak betonarme için aynı şey söylenemez. Betonarme, davranışları, yönetmelik koşulları, fiyatları birbirinden farklı malzemelerden meydana gelmektedir. Minimum boyutların seçilmesi her zaman maliyetin minimum olacağı anlamına gelmez. Beton kesitinin minimum olması durumunda kesite etki eden yüklerin karşılanması için donatılar çok fazla çıkabilir. Donatının betondan daha pahalı olması nedeniyle bu durumda, maliyet artar. Beton kesiti büyüdükçe gerekli donatı miktarı azalmakta, ancak, bu azalma belli bir noktaya kadar devam etmektedir. Beton kesitindeki artma, yönetmelikteki minimum donatı koşulu nedeniyle bir süre sonra donatıyı da artırmaktadır. Böyle bir davranış gösteren betonarmede hem beton hem de donatının belirli kısıtlamalar altında en az kullanıldığı çözümün, yani optimumun bulunması gerekir. Böyle bir çözümün bütün sistemde kullanılan her bir eleman için deneme yanılma yoluyla bulunması oldukça güç olduğundan bir optimizasyon yönteminin kullanılması gerekli olmaktadır.

Optimizasyon yönteminin kullanılması ile ne kadar ekonomi sağlandığı yapıda kullanılan taşıyıcı sistem elemanlarının zorlanma düzeyleri ile doğru orantılıdır. Eğer taşıyıcı sistem elemanları minimum boyutlar seçildiğinde bile minimum donatı kullanımını gerektirecek kadar az etkilere maruz kalıyorlarsa, minimum boyutların seçimi ekonomik çözüm olabilir. Kesit zorları, yani, kesite etki eden dış yükler arttıkça kullanılması gereken donatı ve beton miktarı artacağından bu durumda maliyet optimizasyonu gerekir.

Yapılan bu çalışmanın ideal aşaması sadece perdelerin değil, bütün taşıyıcı sistem elemanlarının tasarım değişkeni olarak alınmasıdır. Her bir elemanın yönetmelik ve davranış kısıtlamaları probleme zorlanma katsayısı olarak katılabilir; perde, kolon, kiriş ve döşemeler için hazırlanan tasarım değişkenleri ayrı ayrı araştırma uzaylarına yerleştirilebilir ve böylece bütün sistem için aynı anda optimizasyon işlemi yapılabilir. Bu durumda elde edilecek değer, çok daha fazla olacaktır.

Kaynaklar

ABYYHY. (1997). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Adamu, A. Karihaloo, B.L. ve Rozvany, G.I.N. (1994). "Minimum cost design of reinforced concrete beams using continuum-type optimality criteria", Structural Optimization, Vol.7, 91-102.

Acar, D. ve Alkan, H. (2003). "Mamul Maliyetlerinin Yönetiminde Etkin Bir Araç: Değer Mühendisliği", Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Cilt 8, Sayı 1, 59-77.

Atabay, Ş. (2004). "Perdeli Betonarme Yapı Sistemlerinin Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ergönül, S. (1996). "İnşaat Sektöründe Değer Mühendisliği Uygulaması", 1. Yapı İşletmesi Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İzmir, 245-258.

Gare, P. ve Angalekar, S.S. (2016). "Design of Structural Element Employing Optimization Approach", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol.5, Issue 7, 13808-13816.

Goldberg, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Redwood City, ABD

Guerra, A. ve Kiousis, P.D. (2006). "Design optimization of reinforced concrete structures", Computers and Concrete, Vol. 3, No. 5, 313-334.

Örnek, A.Ş. (2003). "Bir Yönetim Tekniği Olarak Değer Mühendisliği", Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Cilt 5, Sayı 2, 213-230.

Rajeev, S. ve Krishnamoorty, C.S. (1992). Discrete optimization of structures using genetic algorithm, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.118, 1233-1250.

Şuhubi, E. (1959). "Minimum Ağırlıklı Plaklar", Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.