

# SİMETRİK KATMANLI KOMPOZİT KİRİŞLERDE ELYAF YÖNLENME AÇILARININ ÇOK-AMAÇLI OPTİMİZASYONU

Fatih KARAÇAM<sup>1\*</sup>, Taner TİMARCI<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, TÜRKİYE

**Makale Künye Bilgisi:** Karaçam, F., Timarci, T. (2022). Simetrik Katmanlı Kompozit Kirişlerde Elyaf Yönlenme Açılarının Çok-Amaçlı Optimizasyonu, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 85-96.

## Öne Çıkanlar

- Kompozit yapılar farklı mekanik özelliklerde tasarlanabildiklerinden geniş bir uygulama alanına sahiptirler.
- Kompozit yapıların optimizasyonunda elyaf sıralanışları, katman kalınlıkları, farklı geometri ve malzeme özellikleri gibi çok sayıda tasarım parametreleri hesaba katılmaktadır.
- Yapısal optimizasyon problemlerinde çok fazla değişken parametre yer aldığından, bu problemlerin çözümünde matematiksel programlama ve çok-amaçlı optimizasyon yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi:</b> Geliş: 7 Ekim 2022 Kabul: 2 Kasım 2022	Bu çalışmada, farklı sınır koşulları altında simetrik katmanlı kompozit bir kirişte elyaf yönlenme açılarının çok-amaçlı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elyaf yönlenme açıları tasarım parametreleri olarak seçilmiş olup, optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi her nesilde elde edilen minimum çökme, normal ve kayma gerilmesi parametrelerine bağlı olarak önceden tanımlanan bir uygunluk fonksiyonunun maksimize edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Maksimum uygunluk fonksiyon değerlerini ve bu değerlere karşılık gelen çökme, normal ve kayma gerilmelerini veren elyaf sıralanışları tablolarda sunulmuş, farklı ağırlık katsayıları ve sınır koşulları için uygunluk fonksiyonlarının nesil sayısına bağlı olarak değişimleri grafiklerle gösterilmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Katmanlı Kompozit Kirişler; Elyaf Sıralanışı; Genetik Algoritma; Çok-Amaçlı Optimizasyon.	

## MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF FIBER ORIENTATION ANGLES IN SYMMETRICALLY LAMINATED COMPOSITE BEAMS

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: October 7, 2022 Accepted: November 2, 2022	In this study, multi-objective optimization of fiber orientation angles in a symmetrically laminated composite beam is carried out under various boundary conditions. The fiber orientation angles are chosen as the design parameters and genetic algorithm (GA) is used as the optimization method. The optimization process is performed by maximizing a predefined fitness function depending on the minimum deflection, normal and shear stress parameters in each generation. The stacking sequences giving the maximum fitness function values and corresponding deflection, normal and shear stresses are presented in the tables, the variation of the fitness functions with respect to the number of generations are illustrated in graphics for different weight coefficients and boundary conditions.
<b>Keywords:</b> Laminated Composite Beams; Stacking Sequence; Genetic Algorithm; Multi-Objective Optimization.	

## 1. Giriş

Son yıllarda kiriş, levha ve kabuk gibi yapısal elemanlarda kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek özgül modül ve dayanım özellikleri yüzünden bu malzemeler geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Kompozit yapılar için optimizasyon kavramı, belirli bir tasarımda istenen bir katman veya katmanlardaki elyaf yönelme açılarınının, diğer bir deyişle elyaf sıralanışlarının ve/veya katman kalınlıklarının elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte optimizasyon süreci boyunca malzemenin mekanik ve geometrik özellikleri, üretim yöntemleri ve maliyeti gibi birçok kısıtlayıcı parametre de hesaba katılır. Problemlerinin optimum çözümlerinin elde edilmesinde farklı optimizasyon teknikleri, modelleme ve simülasyon programları kullanılabilir. Optimum çözüm tasarım parametrelerine bağlı olarak değişebilmekte, bu nedenle tasarım parametrelerinin optimizasyon problemlerinde açık bir şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon problemlerinde birden fazla uygunluk fonksiyonu, başka bir deyişle birden fazla tasarım parametresi aynı anda minimize veya maksimize edilmek istenebilir. Bu problemlere çok-amaçlı optimizasyon problemleri adı verilir. Çok-amaçlı optimizasyon, eş zamanlı olarak optimize edilecek birden fazla amaç fonksiyonu içermektedir. Bu yöntem optimum çözüm ihtiyacının kaçınılmaz olduğu birçok mühendislik alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünde matematiksel programlama teknikleri ve evrimsel çok-amaçlı optimizasyon yaklaşımı yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir.

Jacob ve Senthil (2006) optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritmayı kullanarak katmanlı kompozit malzemelerin çok-amaçlı optimizasyonu için bir yöntem sunmuşlar, birincil tasarım değişkenleri olarak katmanların elyaf yönelmelerini ve elyaf hacim oranlarını seçmişlerdir. Basitleştirilmiş mikromekanik

denklemler aracılığıyla, matris ve elyafların hacim oranları ve malzeme özelliklerini kullanarak her bir katmanın sertlik ve mukavemet değerlerini tahmin etmişlerdir. Rahul ve ark. (2006) darbe yüküne maruz kalan elyaf takviyeli plastik katmanlı plakaların optimizasyonunu incelemişlerdir. Grafit/epoksi ve aramid/epoksi'den üretilen hibrit katmanların maliyetini, ağırlığını veya hem maliyetini hem de ağırlığını minimize ederken, mukavemetini en üst düzeye çıkarabilecek optimum katmanı elde edebilmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ve genetik algoritmayı kullanmışlardır. Minimum ağırlık ve maliyeti elde edebilecek şekilde bir katmanın optimum tasarımında çok-amaçlı optimizasyon yaklaşımını kullanmışlardır. Karaçam ve Timarcı (2014) basit mesnetlenmiş katmanlı kompozit bir kirişte çok-amaçlı optimizasyon kullanarak optimum elyaf sıralanışlarını araştırmışlardır. Analitik çözüm ve optimizasyon için sırasıyla birleştirilmiş üç-serbestlik-dereceli kayma deformasyon kiriş teorisini ve genetik algoritmayı kullanmışlardır. Çalışmalarında, eş zamanlı olarak çökme parametresini minimize, frekans parametresini ise maksimize ederek, önceden tanımlanmış oldukları bir uygunluk fonksiyonunun maksimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Talic ve ark. (2015) Euler-Bernoulli kirişlerinde bilinmeyen bir eksenel yük ve bilinen bir enine uyarı altında enine kiriş titreşimlerinin fiziksel parametrelerini belirleyebilmek amacıyla çok-amaçlı bir formülasyon önermişlerdir. Çok-amaçlı optimizasyon probleminin çözümünde genetik algoritmayı kullanmışlardır. Ikeya ve ark. (2016) ortotropik malzemelerden üretilen kabuk yapıların şekil ve kalınlık tasarımında kullanılan iki-aşamalı bir optimizasyon yöntemi sunmuşlardır. İlk olarak, kabuk dış yüzeyinin şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiş, sonrasında ise yakınsamayı daha fazla arttırabilmek amacıyla kalınlık optimizasyonu uygulanmıştır. Farklı sınır koşulları altında çok-amaçlı bir uygunluk fonksiyonu kullanılmış, hacim ve geometrik denklemler gibi kısıtlayıcı parametreler kullanılarak

uygunluk fonksiyonu minimize edilmiştir. Ho-Huu ve ark. (2018) kafes yapıların tasarım optimizasyonunda kullanılan çok-amaçlı evrimsel optimizasyon ve güvenilirlik analizine yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Optimizasyon iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, tasarım optimizasyon problemi çok-amaçlı bir evrimsel optimizasyon algoritması ile formüle edilmiş ve çözülmüştür. İkinci adımda ise ilk adımda elde edilen çözümlerin güvenilirliğini hesaplayabilmek için bir güvenilirlik analiz yöntemi kullanılmıştır. Nikbakt ve ark. (2018) kompozit, sandviç ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden inşa edilen yapıların optimizasyonunu incelemişlerdir. Uygunluk fonksiyonları, tasarım değişkenleri, kısıtlayıcı parametreler ve farklı algoritmalar gibi parametrelerini farklı sınır koşulları, elyaf sıralanışları ve malzemeler için kullanıp, çeşitli tasarımlar için geliştirilen bu algoritmaların performanslarını karşılaştırmışlardır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda özellikle çökme, dayanım, frekans, maliyet ve ağırlık gibi tasarım parametrelerinin çok-amaçlı optimizasyonuna ağırlık verilmektedir. Belirli bir hedefi karşılayabilmek amacıyla optimizasyon süreci boyunca farklı katman sayısı, elyaf sıralanışı, katman kalınlığı, sınır koşulları ve yükleme tipi gibi çeşitli tasarım değişkenleri dikkate alınmaktadır.

Saravanos ve Chamis (1992) tasarım değişkenleri olarak sönümlü rezonans genliklerinin, ağırlık ve malzeme maliyetinin minimizasyonunu içeren, hafif ve düşük maliyetli kompozit yapılar için çok-amaçlı bir optimum tasarım yöntemi geliştirmişlerdir. Walker ve ark. (1997) katmanlı kompozit plakalar için minimum çökme ve ağırlık parametrelerini veren optimum tasarımların elde edilmesinde sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Farklı sınır koşullarını göz önünde bulundurarak, farklı en-boy oranları ve yükleme tipleri için sonuçlar elde etmişlerdir. Omark ve ark. (2008) evrimsel bir algoritma kullanarak

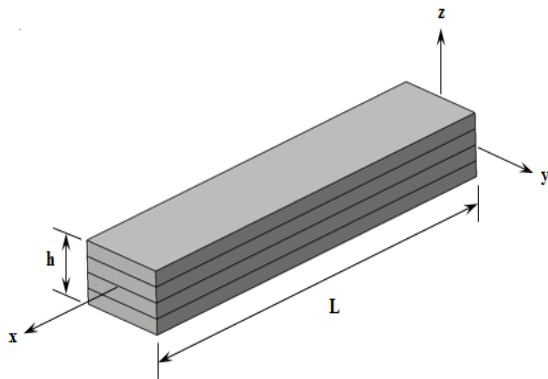
katmanlı kompozit yapı elemanlarının çok-amaçlı tasarım optimizasyonu için yeni bir model sunmuşlardır. Optimizasyon probleminde belirli bir dayanımı sağlayacak şekilde ağırlığı ve toplam maliyeti minimize etmişlerdir. Katman sayısı, katman kalınlığı ve elyaf sıralanışı gibi parametreler öncelikli tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir. Optimizasyon süreci boyunca tek eksenli, çift eksenli ve eğilme yükleri gibi farklı yükleme konfigürasyonları uygulanmıştır. Senouci ve Al-Ansari (2009) yük ve direnç faktörü gibi parametreleri dikkate alarak, kompozit kirişlerin maliyet optimizasyonu için bir genetik algoritma modeli sunmuşlardır. Tasarım parametreleri olarak farklı malzeme ve yapı elemanlarına ait maliyet seçilerek, önerilen modelin güvenilirliğini sağlayabilmek amacıyla literatürdeki bazı tasarımlarla karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Gurugubelli ve Kallepalli (2014) maksimum gerilme ve çökme gibi kısıtlayıcı parametreleri hesaba katarak, modifiye edilmiş bir sıralama genetik algoritması kullanarak ankastre bir kirişin eşzamanlı olarak ağırlık ve çökme optimizasyonunu araştırmışlardır. De Munck ve ark. (2015) iki-amaçlı bir boyutsal optimizasyon yöntemi kullanarak, hem maliyetin hem de kütlemin minimize edildiği çok-amaçlı bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Vo-Duy ve ark. (2017) katmanlı kompozit kirişlerin çok-amaçlı optimizasyonunu incelemişlerdir. Amaç fonksiyonu kirişin tüm ağırlığını minimize, doğal frekansını da maksimize edecek şekilde seçilmiştir. Sırasıyla, serbest titreşim analizi için Bernoulli-Euler kiriş elemanı, çok-amaçlı optimizasyon için ise baskın olmayan bir sıralama genetik algoritması kullanılmıştır. Fagan ve ark. (2018) kompozit bir rüzgar türbini kanadının yapısal optimizasyonunu araştırmışlardır. Optimizasyon işleminde çok-amaçlı bir genetik algoritma kullanılmış ve optimum yapısal tasarım da sonlu elemanlar modeli ile elde edilmiştir. Optimum tasarım kütle, ağırlık merkezinin konumu, çökme, genleme ve doğal frekans gibi birçok yapısal parametre için test edilmiştir.

Shrivastava ve ark. (2018) klasik bir genetik algoritma yöntemi kullanarak havacılık endüstrisinde kullanılan çok katmanlı yapılarının ağırlığını minimize etmeyi amaçlamışlardır. Ağırlık minimizasyonu, istenen mukavemet ve sertlik tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde çok-amaçlı bir optimizasyon problemi olarak kabul edilmiştir.

Bu çalışmada, çok-amaçlı optimizasyon kullanılarak katmanlı kompozit kirişe ait elyaf sıralanışları simetrik dizilimi verecek şekilde optimize edilmiştir. Farklı sınır koşulları altında, her nesilde minimum çökme, normal ve kayma gerilmesi parametrelerine bağlı olarak seçilmiş olan bir uygunluk fonksiyonunu maksimize edebilecek elyaf sıralanışları araştırılmıştır.

## 2. Analitik Yöntem

Çalışmada, üst yüzeyinden üniform bir “ $q(x)$ ” yayılı yükü etki eden, dikdörtgen kesitli, birim genişlikte, “ $L$ ” uzunluğunda ve “ $h$ ” yüksekliğinde olan katmanlı bir kiriş ele alınmıştır (Şekil 1). Koordinat sistemi,  $0 \leq x \leq L$  ve  $-h/2 \leq z \leq h/2$  olacak şekilde kirişin orta düzlemine yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Kiriş geometrisi ve koordinat sistemi

Analitik çözüm için üniform kayma deformasyon kiriş teorisi kullanılmıştır. Bu teoride, bir şekil fonksiyonu yardımıyla klasik ve kayma deformasyon teorileri özel bir durum olarak elde edilebilmektedir. Kullanılan yer değiştirme alanları, genel kayma deformasyon teorisine

paralel olacak şekilde ilk olarak kompozit kabuk yapılara uygulanmıştır (Soldatos ve Timarcı, 1993).

$$\begin{aligned} U(x, z) &= u(x) - z w_{,x} + \phi(z) u_1(x) \\ W(x, z) &= w(x) \end{aligned} \quad (1)$$

“ $U$ ” ve “ $W$ ” terimleri  $x$  – ve  $z$  – eksenini boyunca yer değiştirme alanlarını temsil ederken, “ $u$ ”, “ $u_1$ ” ve “ $w$ ” orta düzlemin yer değiştirme alanlarını, alt indis ile verilen kesme işareti ise karşılık gelen eksene göre türevi belirlemektedir. Çalışmada, katman yüksekliğinin kübik fonksiyonu olan parabolik bir şekil fonksiyonu ( $\phi(z)$ ) seçilmiş ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\phi(z) = z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (2)$$

Kinematik ilişkiler, Hooke Yasası (Jones, 1975) ve gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin kuvvet ve moment denklemlerinde kullanılmasıyla bünye denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ M_x \\ M_x^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & B_{111} \\ B_{11} & D_{11} & D_{111} \\ B_{111} & D_{111} & D_{1111} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{,x} \\ -w_{,xx} \\ u_{1,x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Q_x^a = A_{55} u_1 \quad (4)$$

“ $A_{ij}$ ”, “ $B_{ij}$ ” ve “ $D_{ij}$ ” sırasıyla uzama, birleşme ve eğilme rijitliklerini, “ $a$ ” üst simgesi kayma deformasyon etkilerini, “ $Q_x^a$ ” ise bileşke kesme kuvvetini ifade etmektedir. İkienden fazla alt indise sahip rijitlikler kayma deformasyon teorilerine karşılık gelirken, iki indisli olanlar klasik teorilere karşılık gelmektedir. Üniform yayılı bir yük altında katmanlı kompozit kirişlerin eğilme davranışlarını ifade eden ana denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} N_{x,x} &= 0 \\ M_{x,xx} &= q(x) \\ M_{x,x}^a - Q_x^a &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Basit, ankastre ve serbest sınır koşulları sırasıyla aşağıdaki gibi verilmiş olup,  $x = 0$  ve  $x = L$  olacak şekilde kirişin her iki kenarından uygulanmıştır.

$$\begin{aligned} N_x = w = M_x = M_x^a &= 0 \\ u = w = w_{,x} = u_1 &= 0 \\ N_x = M_x = M_{x,x} = M_x^a &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Bünye denklemlerinin ana denklemler içerisinde kullanılması ve eş zamanlı olarak çözülmesiyle içerisinde toplamda sekiz integral sabiti bulunan ( $C_k$ ,  $k = 1, \dots, 8$ ) ve bu integral sabitlerinin her iki kenarda sınır koşullarının uygulanmasıyla hesaplanabildiği, orta düzleme ait üç yer değiştirme fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
 u_1(x) &= C_1 e^{-px} + C_2 e^{px} - (qx \\
 &\quad + C_3) \frac{D_{111}}{A_{55} D_{11}} = 0 \\
 u(x) &= -\frac{B_{111}}{A_{11}} u_1(x) + C_7 x + C_8 = 0 \\
 w(x) &= \frac{D_{111}}{p D_{11}} \left[ -C_1 e^{-px} + C_2 e^{px} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{p}{A_{55}} \left( \frac{qx^2}{2} + C_3 x \right) \right] \\
 &\quad + \frac{1}{D_{11}} \left( \frac{qx^4}{24} + C_3 \frac{x^3}{6} \right) \\
 &\quad + C_4 \frac{x^2}{2} + C_5 x + C_6
 \end{aligned} \tag{7}$$

“ $p$ ”, malzeme rijitliklerine bağlı olarak tanımlanmış olan bir katsayıdır ve aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$p = \sqrt{\frac{-A_{55} A_{11} D_{11}}{D_{111}^2 A_{11} - D_{1111} A_{11} D_{11}}} \tag{8}$$

### 3. Optimizasyon Yöntemi

Kompozit yapıların optimizasyonu, genellikle katman kalınlığının, katman sayısının ve elyaf yönlenme açılarının tasarım değişkenleri olarak kabul edildiği sürekli bir optimizasyon problemi olarak düşünülmüştür. Bununla birlikte, birçok problemin pratik çözümleri için katman kalınlıkları sabit tutulmuş ve elyaf yönlenme açıları  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $\pm 45^\circ$  gibi açı değerleri ile sınırlandırılmıştır (Lin ve Lee, 2004). İstenen katmanın veya katmanların tasarımı bir elyaf sıralanış optimizasyon problemi haline dönüşeceği için, belirli bir evrimsel optimizasyon tekniğinin kullanılması kaçınılmaz bir hal alacaktır. Çalışmada optimizasyon tekniği olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Yöntem optimizasyon problemlerinde ilk kez Holland tarafından önerilen

evrimsel bir optimizasyon yöntemidir (Holland, 1995). Bu yöntemde, tek bir çözüm üretmek yerine, farklı çözümler içeren bir dizi çözüm üretilir ve bu süreçte üretilen çözüm kümesindeki tüm parametreler birbirinden bağımsızdır (Coello ve ark., 2007). Algoritma içerisinde yakınsama oranını arttırabilmek amacıyla durdurma kriterlerine ulaşıncaya kadar üreme, çaprazlama ve mutasyon adı verilen genetik operatörler kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonunu maksimize edebilmek amacıyla tasarım parametreleri olarak elyaf sıralanışları seçilmiştir. Uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ), her nesil için minimum çökme ve gerilme parametrelerini içerecek şekilde tanımlanmış ve aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$(UF)_i = \alpha (CF)_i + \beta (1 - GF(j))_i \tag{9}$$

$$\beta = 1 - \alpha \tag{10}$$

$$(CF)_i = \frac{(\delta_i - \delta_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})} \tag{11}$$

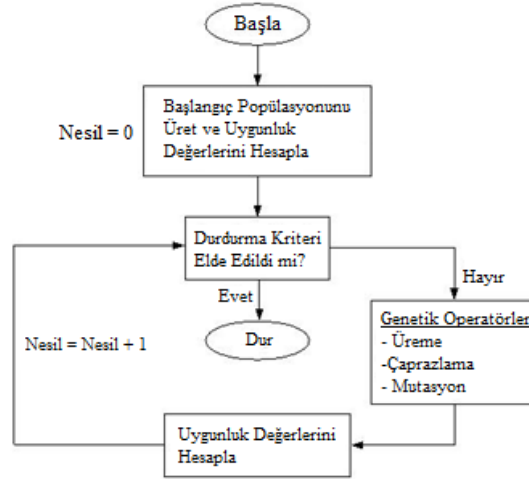
$$(GF(1))_i = \frac{(\sigma_i - \sigma_{min})}{(\sigma_{max} - \sigma_{min})} \tag{12}$$

$$(GF(2))_i = \frac{(\tau_i - \tau_{min})}{(\tau_{max} - \tau_{min})} \tag{13}$$

“ $\alpha$ ” uygunluk fonksiyonunun içerisinde belirli bir parametreye diğerlerinden daha fazla ağırlık veya etki verebilmek için kullanılan bir ağırlık katsayısıdır ve optimizasyon probleminde genellikle 0 ile 1 arasında değişmektedir. “ $(CF)_i$ ”, “ $(GF(j))_i$ ” ( $j = 1, 2$ ) terimleri sırasıyla her nesildeki  $i$ . birey için çökme, normal ve kayma gerilmesi parametrelerinin uygunluk fonksiyonlarını temsil etmektedir. “ $\delta_i$ ”, “ $\sigma_i$ ” ve “ $\tau_i$ ” nesil içerisinde ait oldukları bireylere ait çökme, normal ve kayma gerilmesi değerlerini temsil ederken “ $max$ ” ve “ $min$ ” alt indisleri nesil içerisindeki maksimum ve minimum değerleri ifade etmektedir. Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra her bir bireye ait uygunluk değeri hesaplanmaktadır. Her nesilde, uygunluk değerleri ve bu değerlere karşılık gelen elyaf sıralanışları maksimum değerden minimuma gidecek şekilde sıralanır, en iyi uygunluk değerlerine sahip ilk iki bireyden başlayarak, ardışık bireylere çaprazlama uygulanarak yeni popülasyon

oluşturulur. Genetik çeşitliliği koruyabilmek amacıyla her iki bireye ait belirli elyaf yönlenme açıları çaprazlama ile değiştirilmiş ve mutasyon oranı 0.01 olarak seçilmiştir. Belirli bir nesil sayısı için durdurma

kriterine ulaşılan kadar genetik operatörlerin kullanımına devam edilmiştir. Şekil 2’de çalışmada kullanılan GA akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2. Genetik algoritma akış şeması

Optimizasyon probleminin amacı, belirli bir elyaf yönlenme açısı aralığında, seçilmiş olan uygunluk fonksiyonunu maksimize edecek şekilde optimum elyaf sıralanışının elde edilmesidir.

#### 4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Optimizasyon sürecinde kompozit kirişin  $q(x) = 1000 N/m$ 'lik üniform bir yayılı yükün etkisi altında olduğu varsayılmıştır. Kiriş malzemesi olarak grafit/epoksi kullanılmış olup, bu malzemeye ait mekanik özellikler aşağıdaki gibi verilmiştir (Karama et al, 2003):

$$E_{11} = 241.5 \text{ GPa},$$

$$E_{22} = E_{33} = 18.89 \text{ GPa}$$

$$G_{23} = 3.45 \text{ GPa},$$

$$G_{12} = G_{13} = 5.18 \text{ GPa}$$

$$\nu_{23} = 0.25,$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.24$$

Kiriş uzunluğunun  $L = 1 m$ , yüksekliğinin  $h = 0.02 m$  olduğu ve sekiz katmandan oluştuğu kabul

edilmiştir. Optimizasyon işlemi 20 nesil boyunca, her nesilde 100 bireylik bir popülasyon olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.  $30^\circ$  veya  $45^\circ$  ile kıyaslandığında,  $10^\circ$ 'lik bir artım için daha fazla olası elyaf sıralanışı söz konusu olacağından, elyaf yönlenme açıları  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  aralığında  $10^\circ$ 'lik bir artımla sürekli olarak değiştirilmiştir. Çökme ve gerilme parametrelerine bağlı olarak uygunluk fonksiyonunun maksimizasyonu, normal gerilmeler için  $x = L/4$  ve  $z = -h/2$ , kayma gerilmeleri için ise  $x = L/4$  ve  $z = 0$  olacak şekilde kirişin belirli noktalarında seçilmiştir. Optimizasyon süresince üç farklı ağırlık katsayısı kullanılmıştır. Böylece, maksimum uygunluk fonksiyonu değerini veren optimum ağırlık katsayısı elde edilmiş, çeşitli sınır koşulları altında farklı ağırlık katsayılarının çökme ve gerilme parametrelerine etkileri araştırılmıştır. Tablo 1’de, farklı sınır koşulları ve ağırlık katsayıları için maksimum uygunluk fonksiyonları, çökme ve normal gerilme değerleri ve karşılık gelen elyaf sıralanışları verilmiştir. Elde edilen değerler karşılaştırıldığında, ağırlık katsayısıyla

birlikte uygunluk fonksiyon değerinin de arttığı, her durumda maksimum uygunluk değerinin  $\alpha = 0.75$  ağırlık katsayısı için elde edildiği görülmüştür.

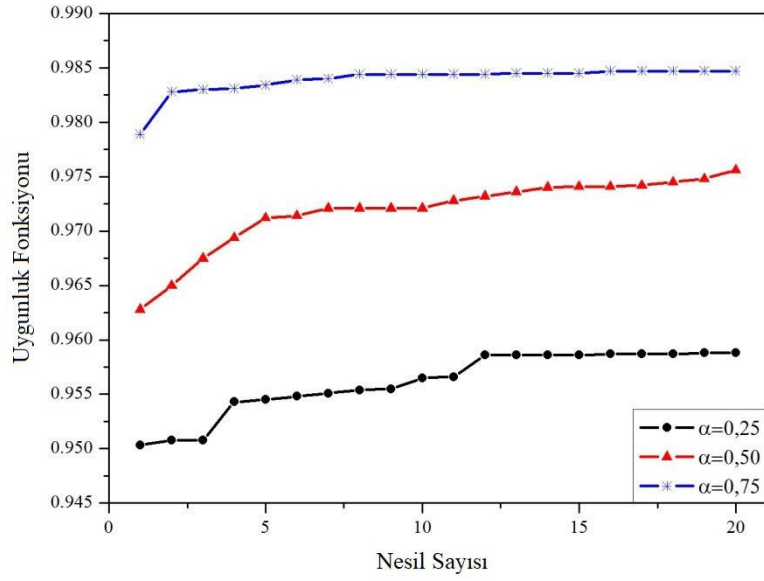
**Tablo 1**

Farklı sınır koşulları ve ağırlık katsayıları için maksimum uygunluk fonksiyonları, çökme ve normal gerilme değerleri ve karşılık gelen elyaf sıralanışları

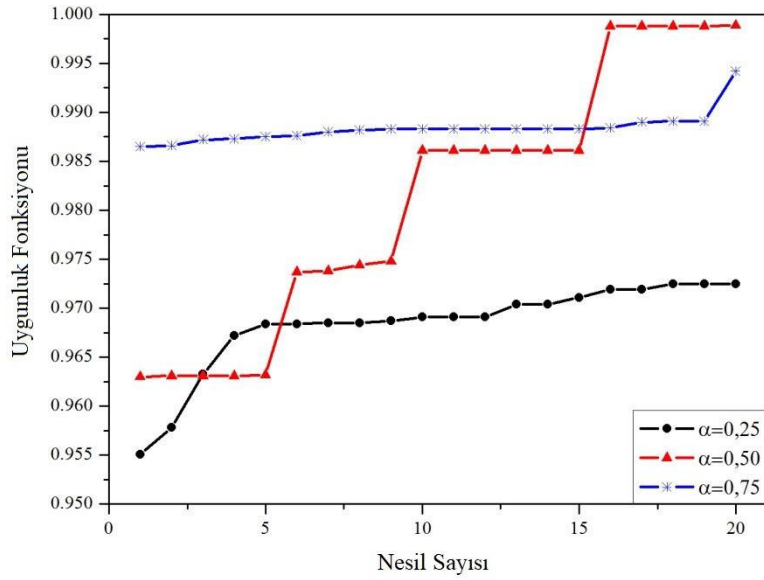
Sınır Koşulları	$\alpha$	$UF$	$w (\times 10^{-5})$ [m]	$\sigma_{xx}$ [MPa]	Elyaf Sıralanışı
A-A	0.25	0.9588	1.6502	2.7713	$[0^\circ/80^\circ/80^\circ/50^\circ]_s$
	0.50	0.9756	1.6612	2.7894	$[0^\circ/80^\circ/70^\circ/80^\circ]_s$
	0.75	0.9847	1.6424	2.7533	$[0^\circ/90^\circ/60^\circ/70^\circ]_s$
A-S	0.25	0.9726	9.7880	9.8349	$[0^\circ/30^\circ/0^\circ/70^\circ]_s$
	0.50	0.9891	13.7201	13.7420	$[0^\circ/90^\circ/70^\circ/60^\circ]_s$
	0.75	0.9942	13.7334	13.7590	$[0^\circ/80^\circ/70^\circ/60^\circ]_s$
B-B	0.25	1	8.3360	1.9090	$[30^\circ/50^\circ/10^\circ/50^\circ]_s$
	0.50	1	10.9652	2.5077	$[0^\circ/40^\circ/10^\circ/90^\circ]_s$
	0.75	1	17.5708	1.5411	$[30^\circ/40^\circ/10^\circ/30^\circ]_s$

Şekil 3-4-5'te sırasıyla A-A, A-S ve B-B sınır koşulları ve farklı ağırlık katsayıları için minimum çökme ve normal gerilme değerlerine bağlı olarak elde edilen uygunluk fonksiyonu değerlerinin nesil sayısına göre değişimi sunulmuştur. Ağırlık katsayısındaki değişime bağlı olarak A-A sınır koşulu için uygunluk fonksiyonu

değerlerinde de bir artış gözlenmiştir. A-S ve B-B sınır koşullarında ise yine ağırlık katsayısı değerlerinin artmasıyla birlikte uygunluk fonksiyonu değerlerinde de keskin bir artış meydana gelmiş, B-B sınır koşulunda ise tüm ağırlık katsayıları için uygunluk fonksiyonları maksimum değere yakınsamışlardır.

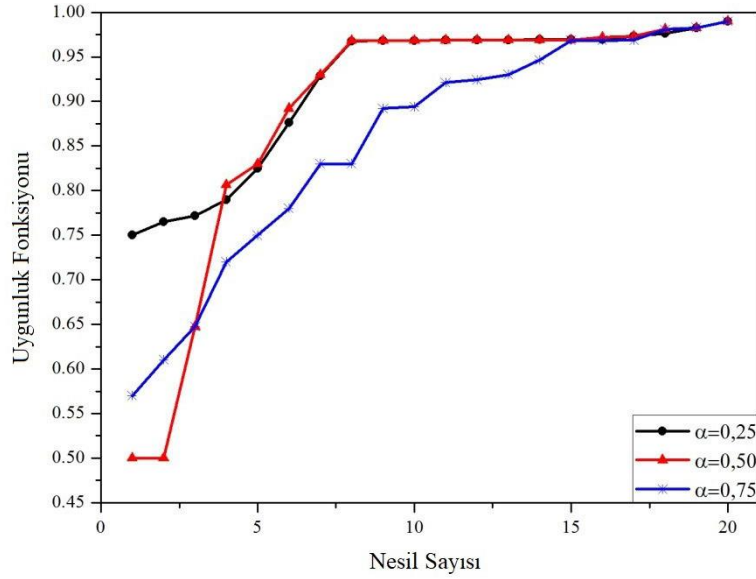


Şekil 3. A-A sınır koşulu için uygunluk fonksiyonun nesil sayısına bağlı olarak değişimi.



Şekil 4. A-S sınır koşulu için uygunluk fonksiyonun nesil sayısına bağlı olarak değişimi.





Şekil 5. B-B sınır koşulu için uygunluk fonksiyonunun nesil sayısına bağlı olarak değişimi.

Tablo 2’de, farklı sınır koşulları ve ağırlık katsayıları için maksimum uygunluk fonksiyonları, çökme ve kayma gerilmesi değerleri ve karşılık gelen elyaf sıralanışları verilmiştir. Ağırlık katsayısıyla birlikte

uygunluk fonksiyon değerinin de arttığı, her durumda maksimum uygunluk değerinin  $\alpha = 0.75$  ağırlık katsayısı için elde edildiği görülmüştür.

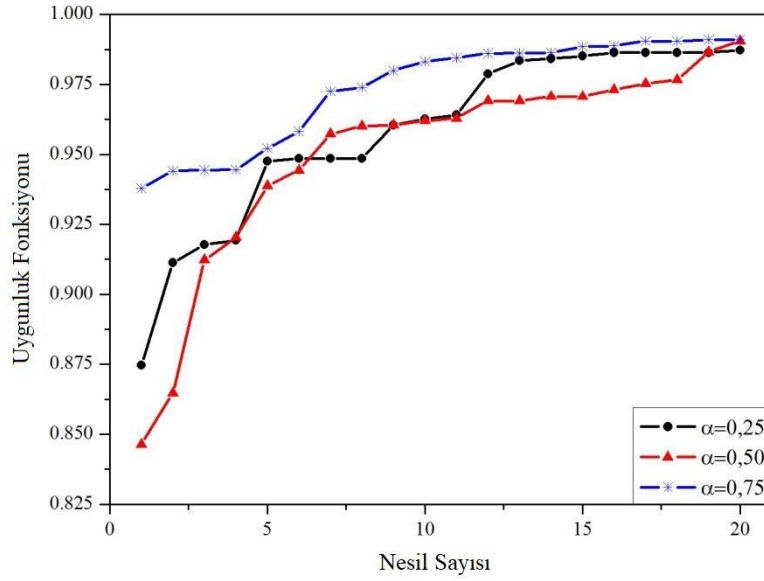
**Tablo 2**

Farklı sınır koşulları ve ağırlık katsayıları için maksimum uygunluk fonksiyonları, çökme ve kayma gerilmesi değerleri ve karşılık gelen elyaf sıralanışları

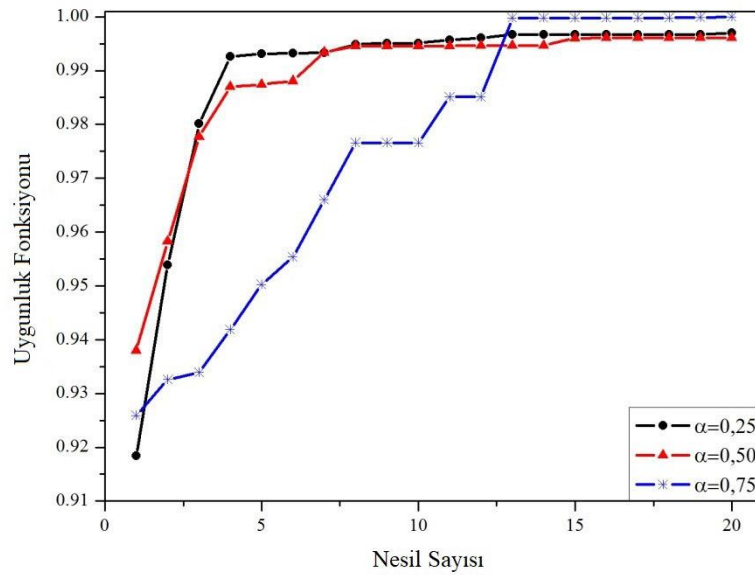
Sınır Koşulları	$\alpha$	$UF$	$w (\times 10^{-5})$ [m]	$\tau_{xz}$ [MPa]	Elyaf Sıralanışı
C-C	0.25	0.9873	1.2549	0.0245	$[0^\circ/30^\circ/40^\circ/0^\circ]_s$
	0.50	0.9906	1.1234	0.0218	$[10^\circ/10^\circ/30^\circ/0^\circ]_s$
	0.75	0.9910	1.5341	0.0260	$[10^\circ/50^\circ/50^\circ/0^\circ]_s$
C-F	0.25	0.9970	9.2150	0.0696	$[0^\circ/0^\circ/50^\circ/0^\circ]_s$
	0.50	0.9961	11.517	0.0755	$[0^\circ/0^\circ/50^\circ/50^\circ]_s$
	0.75	1	18.531	0.0767	$[40^\circ/30^\circ/40^\circ/10^\circ]_s$
S-S	0.25	1	4.4753	0.0570	$[80^\circ/20^\circ/0^\circ/20^\circ]_s$
	0.50	1	5.8390	0.0311	$[10^\circ/60^\circ/20^\circ/0^\circ]_s$
	0.75	1	9.1448	0.0406	$[10^\circ/10^\circ/30^\circ/20^\circ]_s$

Şekil 6-7-8’de sırasıyla A-A, A-S ve B-B sınır koşulları için simetrik katmanlı kompozit bir kirişte minimum çökme ve kayma gerilmesi değerlerine bağlı olarak elde edilen uygunluk fonksiyonu değerlerinin değişimi sunulmuştur. A-A ve B-B sınır koşullarında ağırlık katsayısındaki artışa bağlı olarak uygunluk fonksiyonu

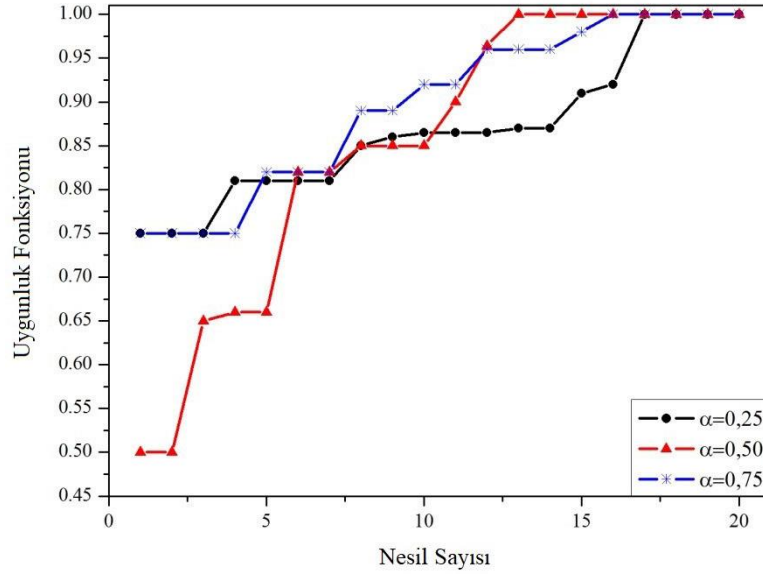
değerlerinde de artış gerçekleşmiştir. Genellikle 5. ve 10. nesil aralığında uygunluk fonksiyonu değerlerinde keskin bir artış gerçeklemiştir. Tüm sınır koşullarında özellikle son beş nesil içerisinde maksimum uygunluk fonksiyonu değerlerine yakınsama gerçekleşmiştir.



Şekil 6. A-A sınır koşulu için uygunluk fonksiyonunun nesil sayısına bağlı olarak değişimi.



Şekil 7. A-S sınır koşulu için uygunluk fonksiyonunun nesil sayısına bağlı olarak değişimi.



Şekil 8. B-B sınır koşulu için uygunluk fonksiyonunun nesil sayısına bağlı olarak değişimi.

Çalışmada, farklı sınır koşulları altında simetrik katmanlı kompozit kirişlerin elyaf sıralanışları optimize edilmiştir. Optimizasyon tekniği olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Belirli bir nesil sayısı boyunca her nesilde minimum çökme, normal ve kayma gerilmesi parametrelerini içeren bir uygunluk fonksiyonunu maksimize eden elyaf sıralanışlarını verecek şekilde optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çökme ve normal gerilme, çökme ve kayma gerilmesi değerlerinin dahil edildiği her iki durumda da uygunluk fonksiyonu değerlerinin maksimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Maksimum değerlere yakınsamanın genellikle üç farklı sınır koşulu için de son beş nesilde gerçekleştiği görülmüştür. İleriye dönük olarak doğal frekans, burkulma yükleri, katman sayıları gibi farklı tasarım parametrelerinin dahil edilmesiyle; farklı malzeme ve geometrik özellikler, katman kalınlıkları, optimizasyon teknikleri ve sınır koşulları altında çok-amaçlı optimizasyon kullanılarak katmanlı kompozit kirişlere ait dinamik analiz gerçekleştirilebilir.

## Referanslar

- Coello, C. A. C., Lamont, G. B., Van Veldhuizen, D. A., (2007). Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. ISBN 978-0-387-33254-3, Springer, Second Edition, New York, USA.
- De Munck, M., De Sutter, S., Verbruggen, S., Tysmans, T., Coelho, R. F., (2015). Multi-objective weight and cost optimization of hybrid composite-concrete beams. *Composite Structures*, 134, 369-377.
- Fagan, E. M., De La Torre, O., Leen, S. B., Goggins, J., (2018). Validation of the multi-objective structural optimisation of a composite wind turbine blade. *Composite Structures*, 204, 567-577.
- Gurugubelli, S., Kallepalli, D., (2014). Weight and deflection optimization of cantilever beam using a modified non-dominated sorting genetic algorithm. *IOSR Journal of Engineering*, 4 (3), 19-23.

- Ho-Huu, V., Duong-Gia, D., Vo-Duy, T., Le-Duc, T., Nguyen-Thoi, T., (2018). An efficient combination of multi-objective evolutionary optimization and reliability analysis for reliability-based design optimization of truss structures, *Expert Systems With Applications*, 102, 262-272.
- Holland, J. H., (1995). Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. *MIT Press*, Cambridge, MA, USA.
- Ikeya, K., Shimoda, M., Shi, J. X., (2016). Multi-objective free-form optimization for shape and thickness of shell structures with composite materials. *Composite Structures*, 135, 262-275.
- Jacob, L. P., Senthil, S. V., (2006). Multi-objective optimization of fiber reinforced composite laminates for strength, stiffness and minimal mass. *Computers and Structures*, 84, 2065-2080.
- Jones, R. M., (1975). Mechanics of composite materials. *McGraw-Hill*, New York, USA.
- Karaçam, F., Timarcı, T., (2014). Multi-objective optimization of stacking sequences for laminated composite beams by genetic algorithm. *Applied Mechanics & Materials*, 729, 89-94.
- Karama, M., Afaq, K. S., Mistou, S., (2003). Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity. *International Journal of Solids and Structures*, 40, 1525-1546.
- Lin, C. C., Lee, Y. J., (2004). Stacking sequence optimization of laminated composite structures using genetic algorithm with local improvement. *Composite Structures*, 63, 339-345.
- Nikbakt, S., Kamarian, S., Shakeri, M., (2018). A review on optimization of composite structures part I: Laminated composites. *Composite Structures*, 195, 158-185.
- Omkar, S. N., Khandelwal, R., Yathindra, S., Naik, G. N., Gopalakrishnan, S., (2008). Artificial immune system for multi-objective design optimization of composite structures. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 1416-1429.
- Rahul, S. G., Chakraborty, D., Dutta, A., (2006). Multi-objective optimization of hybrid laminates subjected to transverse impact. *Composite Structures*, 73 (3), 360-369.
- Saravanos, D. A., Chamis, C., (1992). Multiobjective shape and material optimization of composite structures including damping. *AIAA Journal*, 30 (3), 805-813.
- Senouci, A. B., Al-Ansari, M. S., (2009). Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40, 1112-1118.
- Shrivastava, S., Mohite, P. M., Yadav, T., Malagaudanavar, A., (2018). Multi-objective multi-laminate design and optimization of a carbon fibre composite wing torsion box using evolutionary algorithm. *Composite Structures*, 185, 132-147.
- Soldatos, K.P., Timarcı, T., (1993). A unified formulation of laminated composite, shear deformable, five-degrees-of-freedom cylindrical shell theories. *Composite Structures*, 25, 165-171.
- Talic, E., Schirrer, A., Kozek, M., Jakubek, S., (2015). Multi-objective parameter identification of Euler–Bernoulli beams under axial load. *Journal of Sound and Vibration*, 341, 86-99.
- Vo-Duy, T., Duong-Gia, D., Ho-Huu, V., Vu-Do, H.C., Nguyen-Thoi, T., (2017). Multi-objective optimization of laminated composite beam structures using NSGA-II algorithm. *Composite Structures*, 168, 498-509.
- Walker, M., Reiss, T., Adali, S., (1997). Optimal design of symmetrically laminated plates for minimum deflection and weight. *Composite Structures*, 3 (3-4), 337-346.