



XVII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
5-9 Eylül 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ

KATMANLI KOMPOZİT KİRİŞLERİN GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYONU

Fatih Karaçam* ve Taner Timarcı†

Trakya Üniversitesi, MMF, Makine Müh. Bl. Edirne

ÖZET

Bu çalışmada katmanlı kompozit malzemeden yapılmış kiriş gibi taşıyıcı elemanların tasarımının, minimum çökme ve/veya maksimum doğal frekans gibi belirlenmiş bir hedefi sağlayacak optimizasyonunda (eniyeleştirilmesi) genetik algoritma (GA) gibi evrimsel bir yöntemin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle kayma deformasyon etkilerini göz önüne alan, farklı kiriş teorilerinin elde edilebildiği birleşik bir kiriş teorisi çerçevesinde, dikdörtgen kesitli, katmanlı kompozit kirişlerin dinamik ve statik davranışını yöneten denklemler verilmiştir. Bu denklemlerin analitik çözümleri, Genetik Algoritma da oluşturulan her yeni nesilin bireylerini temsil eden, farklı elyaf açılına sahip katman sıralanışlarında ki kirişlerin çökme ve serbest frekansların hesabında kullanılmıştır. Optimizasyon da, çökme değerlerinin minimize, frekans değerlerinin maksimize edilmesi hem aynı anda hem de ayrı ayrı denenmiştir. Algoritmada çaprazlama genetik işlemcisi uygulanmış ve nesil sayısının optimizasyona etkisi de araştırılmıştır.

ABSTRACT

In this study, in the design optimization of load carrying elements like the beam made of laminated composite materials in order to satisfy certain target parameters like minimum deflection and/or maximum natural frequency, the applicability of an evolutionary method, genetic algorithm, is investigated. In the study, firstly, the equations governing the static and dynamic behavior of laminated composite beams with rectangular cross-section are presented in the frame of a unified beam theory taking into account of the shear deformation effects, also providing with the different beam theories as special cases. The analytical solutions of these equations are used in the calculation of the deflection and the frequency values of the beams having stacking sequencies with different fiber orientations, representing the individuals of the each new generation formed in genetic algorithm. In the optimization, the minimization of the deflections and the maximization of the frequencies were tried both simultaneously and seperately. In the algorithm the crossover genetic operator is applied and the effect of the number of generations on the optimization is also investigated.

* Araştırma Görevlisi, Mak. Müh. Böl fatihkar@gmail.com

† Prof.Dr. Mak.Müh Böl. tanert@trakya.edu.tr

GİRİŞ

Katmanlı kompozit malzeme olarak üretilmiş kiriş, plak gibi yapı elemanlarının birçok mühendislik ve mimarlık alanında kullanımı önemini korumaktadır. Bunun nedeni kompozit malzemelerin özgül modül (modül/yoğunluk) ve dayanımlarının (dayanım/yoğunluk) yüksek, ayrıca, katmanların sıralanışının, katmanlardaki elyaf yönlenmesinin ve matris ve/veya elyaf malzemesinin değiştirilerek, kullanılış amacına uygun olarak, istenen mekanik özelliklerde çok değişik biçimlerde tasarlanabilme olanağının olmasıdır. Bu açıdan kompozit yapılarda, yapının ağırlığı, geometrisi, doğal frekans, çökme, rijitlik, dayanım, burkulma yükü gibi seçilecek hedef parametrelerine bağlı olarak, katmanların sıralanış biçimi, elyaf doğrultuları, katman kalınlıkları gibi tasarım değişkenleri ile tasarımın optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Genetik algoritmaların katmanlı kompozit yapıların optimizasyonunda kullanılmasının oldukça yaygınlaşmasının nedeni ayrıntı tasarım değişkenli ve amaç fonksiyonlu problemlere uygulanabilmesidir. Örneğin, Di Sciuva ve ark. nın [1] gerçekleştirdikleri çalışmada olduğu gibi, yapının ağırlığında bir kısıtlama getirerek burkulma yükü maksimize veya burkulma yükünde bir kısıtlama getirilerek ağırlık minimize edilebilir. Bu çalışmada, yazarlar [1] amaçlanan parametreleri sağlayan en uygun katman istiflenme sırasını GA kullanarak araştırdılar ve başka bir evrimsel yöntem olan "benzeşimli tavlama" yöntemiyle elde ettikleri sonuçları karşılaştırdılar. Literatürde, çok amaç parametrelili ve kısıtlı optimizasyon problemlerini ele alan birçok çalışma vardır. Walker ve Smith [2] simetrik sekiz-katmanlı plakların optimizasyonunda hem ağırlık hem de çökme parametrelerinden oluşan ağırlıklı bir toplam fonksiyonu "uygunluk fonksiyonu" olarak tanımladılar, bu fonksiyonu minimize etmek için GA'yı kullandılar ve plakların eğilme analizini ise sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirdiler.

En uyumlu olanın yaşaması ilkesine dayanan genetik algoritmalarda klasik gradyan-temelli optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, özellikle başlangıçtaki çözüm popülasyonu yeterli ise, yerel optimuma takılma riski yoktur. Geleneksel GA'larda önemli bir sınırlama, özellikle çok büyük topluluklarda "uygunluk fonksiyonunun" belirlenmesinde gereken zamandan dolayıdır. Yakınsama hızını arttırmak için Yapay Sinir Ağları (YSA) [3,4], gibi bazı ek yöntemlerin kullanılması da denenmiştir. Ayrıca, GA'da ki yeni neslin oluşturulmasında klasik genetik işlemcilerine ek olarak "elitist" yaklaşımlar da [5] kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin optimum katman sıralaması tasarımında kullanılan evrimsel ve diğer buluşsal teknikler Ghisai ve ark.[6] tarafından kapsamlı olarak gözden geçirilmiştir.

Bu çalışmada öncelikle kayma deformasyon etkilerini göz önüne alan, farklı kiriş teorilerinin elde edilebildiği birleşik bir kiriş teorisi çerçevesinde dikdörtgen kesitli kirişin dinamik ve statik davranışını yöneten denklemler elde edilmiştir. Daha önce kompozit kirişin eğilme analizi aynı teori çerçevesinde gerçekleştirilmişti [7,8]. Bu teoriye, Soldatos ve Timarcı [9] tarafından kabuk yapılar için geliştirilmiş "birleşik kayma deformasyon teorisinin" (BKDT) kompozit kirişler için uyarlanmış özel bir durumu olarak bakılabilir. Bu kiriş teorisi kullanılarak, ilkönce düzgün yayılı düşey yükleme etkisinde, farklı sınır koşullarına sahip kompozit katmanlı kirişin çökme değerleri ve basit desteklenmiş kirişin doğal frekansları hesaplanmış ve daha önceki yayınlarda elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada ilk aşamada sadece minimum çökme ve maksimum temel frekans değerleri için optimizasyon yapılmış, daha sonra iki parametreyi de göz önüne alan ağırlıklı bir "uygunluk fonksiyonunun" maksimize edilmesi yoluna gidilmiştir. Genetik Algoritmada ilkönce belli bir katman sayısı ve katmanlardaki elyaf doğrultu açısı artımına bağlı olarak istenen sayıda ratgele başlangıç popülasyonu oluşturulmuştur. Sonra bu popülasyondan seçilen farklı istiflenme sıralamalarına sahip her bir kiriş (birey) için frekans ve çökme değerleri yukarıda bahsedilen analiz ile elde edilmiştir. Bunların arasından seçilen en iyi değerlere sahip (minimum çökme ve maksimum frekans) sıralamalar için kendi aralarında çaprazlama genetik

işlemcisi uygulanarak yeni nesil oluşturulmuştur. Bu süreç, yalnızca statik ya da dinamik analiz uygulanıyorsa istenen nesil sayısına erişilene veya iki-hedefli optimizasyon için "uygunluk fonksiyonu" belli bir değere yakınsayana kadar tekrar edilmiştir. Elde edilen katman sıralınırları ve bunlara karşılık gelen sayısal sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

EĞİLME VE TİTREŞİM ANALİZİ

Çalışmada, h kalınlığında, birim genişlikte ve L uzunluğunda dikdörtgen kesitli, keyfi sayıda katmandan oluşan kompozit kirişler göz önüne alınmıştır. Koordinat sistemi kirişin orta düzlemine, $0 \leq x \leq L$ ve $-h/2 \leq z \leq h/2$ şeklinde konulmuştur. Kullanılan kiriş teorisinde, laminatın alt ve üst yüzeylerinde kayma gerilmesinin sıfır olması ve katmanlar arasındaki süreklilik koşulları yer değiştirme alanına eklenen, kalınlık koordinatına bağlı, bir şekil fonksiyonu yardımı ile hesaba katılabilmekte, klasik ve farklı kayma deformasyon teorileri elde edilebilmektedir [8]. Kullanılan kiriş yerdeğiştirme alanı aşağıda verilmiştir :

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

Şekil fonksiyonu $\varphi(z)$, burada, kirişin üst ve alt yüzlerinde kayma gerilmesinin sıfır olma koşulunu sağlayan "parabolik kayma deformasyon teorisine" karşılık gelecek şekilde, kalınlık koordinatının kübik bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi seçilmiştir:

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

Burada U, W değerleri katmana ait her bir noktanın sırasıyla x, z eksenleri doğrultusundaki yer değiştirmeleri, u, w ise orta düzlemdeki bir noktanın yer değiştirmelerini temsil etmektedir. u_1 kayma deformasyonundan dolayı yeni bilinmeyen fonksiyondur. " x " ise x 'e göre türevidir. Bu yerdeğiştirme alanı aşağıdaki kinematik ilişkileri verir:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= u_{,x} - zw_{,xx} + z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) u_{1,x} \\ \gamma_{xz} &= \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right) u_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Her k'nci katman için gerilme hali Hooke Yasası'na göre aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^{(k)} \\ \tau_{xz}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^{(k)} & 0 \\ 0 & Q_{55}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu ilişkiler kuvvet ve moment tanımlarında kullanılırsa bünye deklemleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ M_x \\ M_x^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} & B_{111} \\ B_{11} & D_{11} & D_{111} \\ B_{111} & D_{111} & D_{1111} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ -w_{,xx} \\ u_{1,x} \end{bmatrix} \quad Q_x^a = A_{55} u_1 \quad (5)$$

"a" üst indisi ek kayma deformasyon etkisini göstermektedir. A, B ve D harfleri

sırasıyla uzama, bağlanım ve eğilme rijitliklerine karşılık gelir [8,9]. İki den fazla indisli rijitlikler kayma deformasyon etkisinden dolayı ortaya çıkanlardır. Q_x^a bileşke kayma kuvvetidir.

Katmanlı kirişlerin eğilme ve titreşimini yöneten denklemler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} A_{11}u_{,xx} - B_{11}w_{,xxx} + B_{111}u_{1,xx} &= I_1 \\ B_{11}u_{,xxx} - D_{11}w_{,xxxx} + D_{111}u_{1,xxx} &= q(x) + I_2 \\ B_{111}u_{,xx} - D_{111}w_{,xxx} + D_{1111}u_{1,xx} - A_{55}u_1 &= I_3 \end{aligned} \quad (6)$$

Burada $q(x)$ statik analizde yayılı yükü göstermektedir. Denklemlerin sağındaki atalet terimleri titreşim analizinde ortaya çıkar ve aşağıdaki gibi verilir [9]:

$$\begin{aligned} I_1 &= (\rho_0 u - \rho_1 w_{,x} + \bar{\rho}_0^{11} u_1)_{,tt}, \\ I_2 &= [\rho_0 w - \rho_2 (w_{,yy} + w_{,xx}) + \bar{\rho}_1^{11} u_{1,x} + \rho_1 u_{,x}]_{,tt}, \\ I_3 &= (\bar{\rho}_0^{11} u - \bar{\rho}_1^{11} w_{,x} + \bar{\rho}_0^{12} u_1)_{,tt}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho_i &= \int_{-h/2}^{h/2} \rho z^i dz, (i = 0,1,2) \\ \bar{\rho}_i^{lm} &= \int_{-h/2}^{h/2} \rho z^i \phi_l^m dz, (i = 0,1; l = m = 1,2), \end{aligned}$$

Kirişin $x=0$ ve L uçlarında aşağıdaki sınır koşulları uygulanacaktır [9].

$$\begin{aligned} \text{Basit (B): } N_x = w = M_x = M_x^a &= 0 \\ \text{Ankastre (A): } u = w = w_{,x} = u_1 &= 0 \\ \text{Serbest (S): } N_x = M_x = M_{x,x} = M_x^a &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Analitik çözüm

Eğilme problemi: Uçlarından, basit destekli (B), ankastre (A) ve serbest (S) sınır koşullarının farklı kombinasyonlarının etkisindeki katmanlı kompozit kirişler göz önüne alınmıştır. Bu durumda kirişin düzgün yayılı yük etkisinde olduğu kabul edilmiştir. Bu amaçla kiriş denge denklemleri, yapılan integrasyon ve birlikte çözümler ile, toplam sekiz bilinmeyen sabitli, üç adet yer değiştirme bileşenine indirgenmiştir. Bilinmeyen sabitler, kirişin iki ucundaki kabul edilen sınır koşullarında yer değiştirme bileşenlerinin kullanılmasıyla bulunur [7,8].

Titreşim problemi: Sadece basit destekli kirişler göz önüne alınmıştır. Bu durumda aşağıda verilen yer değiştirme bileşenlerinin çözüm varsımları bu koşulları sağlar:

$$\begin{aligned} (u, Lu_1) &= (A, C) \cos \frac{m\pi x}{L} \sin \omega t, \\ w &= B \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

Burada m dalga sayısı, ω doğal frekanstır. Bu çözümler hareket denklemlerinde yerine konduğunda problem, frekans parametrelerinin özdeğerlere karşılık geleceği bir özdeğer problemine dönüşür.

GENETİK ALGORİTMA

GA'lar deterministik olmayan, doğal genetiğin kurallarının mekanik sistemlere uyarlanması ile kullanılan ve tasarım değişkenlerini ikili sistemde kodlayarak çalışan, global optimuma erişilmesini amaçlayan araştırma teknikleridir. Katmanlı kompozit yapılarda katman sıralanışı optimizasyonunda bir veya birkaç tasarım hedef parametrelerine ulaşılması ve istenen kısıtların sağlanması için gereken katmanların sıralanış biçiminin, katmanlardaki elyaf yönlenme açısının, katmanların kalınlığının saptanmasıdır. Burada örneğin elyaf açılarını birer kod verilerek genlerden oluşan kromozomlara karşılık gelen laminasyon konfigürasyonları temsil edilir. Her kromozom "ya da bireyin" genleri katman elyaf yönlenme açısı, katman kalınlığı, malzeme gibi tasarım değişkenlerine karşılık gelebilir. Böyle bir kodlamayla rastgele seçilen kromozomlar başlangıç topluluğunu (popülasyonu) oluştururlar. Bu popülasyondan istenen hedeflere en uygun olan ebeveynler bir sonraki nesli "çocukları" oluşturmak üzere seçilirler. Bu seçim işlemi bir "uygunluk fonksiyonu" tanımlanarak yapılabilir. Yeni nesli oluşturma değişik genetik işlemciler uygulanarak gerçekleştirilir. Çaprazlama işlemcisi, seçilmiş ebeveynlerin aynı noktadan belirli bir olasılıkla ikiye ayrılıp, 1. ve 2. ebeveynin sol parçası ile sırasıyla 2. ve 1. ebeveynin sağ parçasının bir araya getirilmesiyle yeni bir çift bireyin (çocuk) oluşmasını gerçekleştirir. Mutasyon işlemcisi, çaprazlamada oluşan yeni bireyin (kromozomun) bir parametresinde (geninde) uygun fakat rastgele bir değişiklik yapar. Ayrıca, yeni nesle, eski neslin en iyi "uygun" bireylerinin katılarak bir popülasyon oluşturulmasını gerçekleştiren "elitizm" işlemcisi de uygulanabilir. Amaç parametreleri sağlanıncaya, uygunluk fonksiyonu belli bir değere ulaşıncaya ya da hedeflenen nesil sayısı tamamlanana kadar döngü tekrar edilir.

SAYISAL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Verilen yerdeğiştirme alanı temelinde, katmanlı kompozit kirişlerin eğilme ve serbest titreşimini yöneten denklemlerle farklı yükleme ve sınır koşulları, ayrıca değişik laminasyon konfigürasyonları için çökmeler ve doğal frekanslar analitik olarak elde edilmiştir. Farklı, sınır koşullarındaki (B-B, A-S ve A-A) kirişlerin belli noktalarındaki çökme değerleri farklı kiriş malzeme ve boyutlarına bağlı olarak elde edilmiştir. İlk önce elde edilen çökme ve frekans değerlerinin doğrulanması amacıyla sonuçlar, Karama ve ark.[10] elde ettiği sonuçları ile karşılaştırılmış ve Tablo 1'de sunulmuştur. Karama ve ark.nın [10] kullandığı aşağıda verilen malzeme "boron-epoksi" özellikleri tüm sonuçların elde edilmesinde kullanılmıştır.

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

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

$$G_{23} = 3.45 \text{ GPa}, G_{12} = G_{13} = 5.18 \text{ GPa}$$

$$\nu_{23} = 0.25, \nu_{12} = \nu_{13} = 0.24, \rho = 2015 \text{ kg/m}^3$$

| | Çökme Değeri (m) (AS) | Frekans Değeri (Hz) (BB) |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Şimdiki Çalışma | $-4,25513 \cdot 10^{-6}$ | 14,935 |
| Karama ve ark.[10] | $-4,40057 \cdot 10^{-6}$ | 14,958 |

Tablo1. Çökme ve frekans değerlerinin karşılaştırılması, BB, [90°/0°/0°/90°], L=6.35 m., h=0.2794 m.

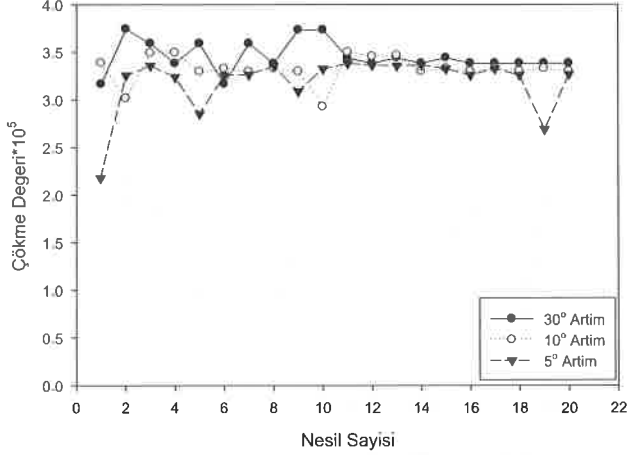
Genetik algoritma ilkönce ayrı ayrı çökme değerlerinin minimizasyonu ve temel frekansların maksimizasyonu için uygulanmıştır. Tüm analizler için kirişin katman sayısı, geometrisi, katman kalınlıkları, malzeme ve sınır koşullarının aynı kaldığı durum göz önüne alınmış, algoritmadaki başlangıç popülasyonundaki birey sayısı da sabit (50) tutulmuştur. İlk popülasyon oluşturulurken her durum için sadece katmanlardaki elyaf doğrultuları 0° ve 90° arasında 30°, 10° ve 5° artımlarla değiştirilmiştir. Popülasyonu oluşturan her bir konfigürasyonun yukarıda bahsedilen çözüm yöntemine göre çökme ve temel frekansları hesaplanmış ve "uygunluklarına" göre sıralanmıştır. Bunların arasından en iyi bireyler bir araya getirilerek çaprazlama yapılmış ve aynı sayıda yeni ikinci bir nesil üretilmiştir.

Minimum çökme için optimizasyon: Bu amaçla ilk olarak B-B, A-A, A-S katman sayısı 3,4,5 olan farklı L/h oranlarına sahip Grafit/Epoksi malzemesinden yapılmış kompozit kirişler, elyafın yönelme açıları 30° ve 10° değiştirilerek her bir durum için başlangıç popülasyonları oluşturulmuştur. GA kullanmadan farklı katman sayılarına karşılık gelen, farklı elyaf yönelmelerine sahip minimum çökme değerleri bir program geliştirilerek hesaplanmıştır. Bu durumda örneğin üç-katmanlı bir kirişte popülasyon oluşturma ve minimum çökmeyi bulma, 10° lik açı artımları için 4 dak. 53 sn. iken, beş-katmanlı kirişte süre 14 saat 37 dak 13 sn.'ye çıktığı görülmüştür. Tablo 2'de GA kullanıldığında 20 nesil sonucunda elde edilen çökme değerleri verilmiştir. Tablodan aynı sınır koşullarında küçük açı artımlarında çökme değerlerinin daha az olduğu gözlenmiştir. Çökme değerleri AS için kirişin serbest ucu (x=L), AA ve BB için orta noktası (x=L/2) için bulunmuştur.

| Sınır Şartı | Elyaf açısı Artımı | Katman Sıralanması | Çökme (m) |
|-------------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| AA | 30° | 0°/30°/0°/0°/0° | $3,382665 \cdot 10^{-5}$ |
| | 10° | 10°/0°/10°/0°/10° | $3,298263 \cdot 10^{-5}$ |
| | 5° | 10°/5°/20°/10°/5° | $3,264503 \cdot 10^{-5}$ |
| AS | 30° | 60°/90°/30°/30°/0° | $0,561318 \cdot 10^{-3}$ |
| | 10° | 50°/40°/70°/20°/30° | $0,549340 \cdot 10^{-3}$ |
| | 5° | 10°/0°/60°/50°/15° | $0,526775 \cdot 10^{-3}$ |
| BB | 30° | 0°/30°/0°/60°/0° | $1,337399 \cdot 10^{-4}$ |
| | 10° | 10°/0°/70°/0°/0° | $1,201753 \cdot 10^{-4}$ |
| | 5° | 0°/20°/10°/15°/10° | $1,182391 \cdot 10^{-4}$ |

Tablo2. Farklı sınır şartları ve elyaf açısı artımı için minimum çökme değerini veren katman sıralanmaları, (Birey sayısı=50, L/h=20, Nesil Sayısı=20)

Şekil 1'de nesil sayısına bağlı olarak minimum çökme değerlerinin değişimi farklı açı artımları için grafiksel olarak verilmiştir. Burada 12. nesilden sonra çökme değerlerinin belli bir değere ulaştığı söylenebilir.



Şekil 1. AA sınır şartlarında, 5 katmanlı kompozit kiriş için çökme değerlerinin nesil sayısına ve farklı açı artımlarına göre değişimi.

Maksimum frekans için optimizasyon: Çalışmanın bu kısmında ilk önce 3-katmanlı basit desteklenmiş GA kullanmadan 30° ve 10° lik artımlar için olası tüm sıralanmalar için maksimum frekanslar hesaplanmış, elde edilen değerler ve sıralanmalar, gerekli hesaplama zamanları, 50 popülasyon ve 20 nesil sayısı için GA kullanarak elde edilenlerle Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. GA ile beklenen tam maksimum değer elde edilmediği görülmektedir. Birey ve nesil sayısı arttırıldığında bu değere ulaşılacağı düşünülmektedir.

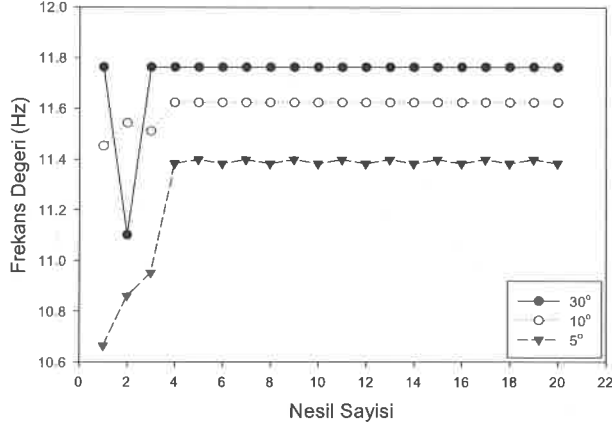
| Yöntem | Elyaf açısı Artımı | Katman Sıralanışı | Frekans (Hz) | Zaman |
|----------------------|--------------------|-------------------|--------------|-----------|
| GA ile | 30° | 0°/30°/0° | 11,51368 | 22 s |
| | 10° | 0°/20°/0° | 11,64205 | 4 dak 14s |
| 64 olasılık, (30°) | 30° | 0°/0°/0° | 12,30059 | 47 s |
| 1000 olasılık, (10°) | 10° | 0°/0°/0° | 12,30059 | 8 dak 35s |

Tablo 3. İki farklı elyaf açısı artımı için BB sınır şartlarına sahip kirişte, GA kullanarak ve kullanmadan maksimum frekanslara karşılık gelen katman sıralanışları (Birey sayısı =50, Nesil Sayısı=20).

Tablo 4'te frekans değerlerinin 3 ve 5 katmanlı, BB destekli kirişlerin 20 nesil sonunda elde edilen maksimum frekans değerlerine karşılık gelen katman sıralanışları verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi [0°/0°/90°/0°/0°] sıralanışı için en büyük frekans değeri elde edilmiştir. Şekil 2'de BB desteklenmiş 5-katmanlı kompozit kiriş doğal frekansları için hesaplanan uygunluk fonksiyonlarının nesil sayısına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu şekilden 10° ve 30° lik artımlarla elde edilen ilk popülasyonun bireylerinde, 5° lik artımlara göre en büyük frekans yakalama olasılığının daha fazla olduğu ve 4. nesilden sonra tüm artımlar için frekans değerlerinin belli bir en büyük değere ulaştığı görülmektedir.

| Katman Sayısı | Elyaf açısı Artımı | Katman Sıralanması | Frekans (Hz) |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 3 | 30° | 0°/30°/0° | 11,51368 |
| | 10° | 0°/20°/0° | 11,64205 |
| | 5° | 0°/15°/5° | 11,65468 |
| 5 | 30° | 0°/0°/90°/0°/0° | 11,76412 |
| | 10° | 10°/0°/20°/10°/0° | 11,62607 |
| | 5° | 0°/50°/70°/0°/15° | 11,38553 |

Tablo 4. Farklı katman sayısı ve elyaf açısı artımı için BB sınır şartlarında kirişte maksimum frekans değerlerini veren katman sıralanmaları (L/h=20, Nesil Sayısı=20).



Şekil 2. Basit destekli sınır şartına sahip 5-katmanlı kompozit kiriş için hesaplanan maksimum frekans değerlerinin nesil sayısına bağlı olarak değişimi.

İki-amaçlı optimizasyon: Bu kısımda belli oranlarda aynı anda frekansların maksimize ve çökmelerin minimize edilmesi için aşağıdaki "ağırlıklı uygunluk fonksiyonu" bağıntısı kullanılmıştır:

$$UF_i = (1 - \alpha)[1 - (ÇUF)_i] + \alpha(FUF)_i$$

$$(ÇUF)_i = \left(\frac{\delta_i - \delta_{min}}{\delta_{maks} - \delta_{min}} \right) \quad (10)$$

$$(FUF)_i = \left(\frac{f_i - f_{min}}{f_{maks} - f_{min}} \right)$$

Burada $(ÇUF)_i$ ve $(FUF)_i$ i'inci katman sıralanmasının sırasıyla çökme ve frekans uygunluk fonksiyonlarıdır ve tek başlarına 0 ile 1 arasında değerler alırlar. İki parametre bir arada kullanıldıklarında, α 'ya bağlı olarak, istenen hedef parametresinin önem derecesi artırılabilir. Uygunluk fonksiyonun aldığı maksimum değerlere karşılık gelen

sıralanımlar maksimum frekans ve minimum çökme değerlerini verecektir. Tablo 5'te $\alpha=0.5$ için basit desteklenmiş 3 ve 5 katmanlı farklı açısal artımlarında frekans, çökme ve uygunluk fonksiyonları değerleri verilmiştir. 3 katmanlı durum için uygunluk fonksiyonunun maksimumuna karşılık gelen sıralanmanın minimum çökme ve maksimum frekans değerleri verildiği görülmektedir.

| Katman Sayısı | Elyaf Açısı Artımı | Katman Sıralanışı | Çökme (m) | Frekans (Hz) | Uygunluk Fonksiyonu |
|---------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------|---------------------|
| 3 | 30° | 30°/0°/0° | -1,415357.10 ⁻⁴ | 10,40748 | 0,918395 |
| | 10° | 0°/0°/10° | -1,176688.10 ⁻⁴ | 11,60854 | 0,990657 |
| | 5° | 15°/10°/5° | -1,230056.10 ⁻⁴ | 11,34610 | 0,976606 |
| 5 | 30° | 0°/30°/90°/0°/0° | -1,232148.10 ⁻⁴ | 11,32125 | 0,989951 |
| | 10° | 0°/40°/10°/10°/10° | -1,274595.10 ⁻⁴ | 11,32882 | 0,985660 |
| | 5° | 5°/45°/70°/0°/15° | -1,359930.10 ⁻⁴ | 10,76072 | 0,953783 |

Tablo 5. Farklı elyaf açısı artımı için maksimum uygunluk fonksiyonuna karşılık gelen minimum çökme ve maksimum frekans değerlerini veren katman sıralanışları (Birey sayısı=50, L/h=20, Nesil Sayısı=20, $\alpha=0.5$).

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, popülasyon birey ve nesil sayısının artırılarak hedef çökme ve frekans değerlerinin daha iyileşmesini sağlayacak katman sıralanmaları araştırılacaktır. Ayrıca genetik algoritmada mutasyon gibi genetik işlemcilerin etkisi göz önüne alınacak, hesaplama zamanının azaltılması için yeni yöntemlerin uygulanabilirliği de denenecektir.

Kaynaklar

- [1] Di Sciua M., Gherlone M., Lomario D. "Multiconstrained optimization of laminated and sandwich plates using evolutionary algorithms and higher-order plate theories." *Composite Structures* 59, 149–154, 2003.
- [2] Abouhamze M, Shakeri M. "Multi-objective stacking sequence optimization of laminated cylindrical panels using a genetic algorithm and neural Networks". *Composite Structures* 81, 253–263, 2007.
- [3] Walker M, Smith R.E. "A technique for the multiobjective optimisation of laminated composite structures using genetic algorithms and finite element analysis." *Composite Structures* 62, 123–128, 2003.
- [4] Apalak M. K., Yıldırım M, Ekici R. "Layer optimisation for maximum fundamental frequency of laminated composite plates for different edge conditions." *Composites Science and Technology* 68, 537–550, 2008.
- [5] Almedia FS, Awruch AM. "Design optimization for composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis" *Composites Structures* 88, 443–454, 2009.

[6] Ghiasi H, Pasini D, Lessard L. "Optimum Stacking Sequence Design of Composite Materials, Part I: Constant Stiffness Design." *Composite Structures* doi: 10.1016/j.compstruct.2009.01.006,2009.

[7] Karaçam F, Tımarcı T. "Bending of cross-ply composite beams with different boundary conditions." *Proceedings of UNITECH-05 Int .Sci. Conf.. Gabrovo, Bulgaristan.* 137-142, 2005

[8] Karaçam F. Katmanlı kompozit kirişlerin eğilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, FBE, Edirne. 2005.

[9] Soldatos, K.,P., Tımarcı, T. "A Unified Formulation of Laminated Composite, Shear Deformable, Five-Degrees-of Freedom Cylindrical Shell Theories". *Composite Structures*, 25, 165-171. 1993.

[10] Karama M, Afaq KS, Mistou S. "Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multilayered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity" *Int.J. Of Solids and Structures*, 40, 1525-1546, 2003.