



M91/IM10 tek yönlü prepreg plakanın yüksek burkulma mukavemetine sahip olacak şekilde genetik algoritma yöntemi ile açı dizilimi optimizasyonu

Stacking sequence optimization of M91/IM10 unidirectional prepreg plate with high buckling strength by genetic algorithm method

İzzet Kaya^{1,*} , Serhat Yılmaz² 

^{1,2} Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Havacılık ve Uzay Ana Bilim Dalı, 34344, İstanbul Türkiye

Öz

Bu makalede, havacılık alanında kullanılan malzemeler ile karşılaştırıldığı zaman dayanımı oldukça yüksek olan M91/IM10 tek yönlü prepreg malzemesinden üretilmiş bir plakanın burkulma yük faktörünün maksimum olduğu optimum katman dizilimi genetik algoritma yöntemi ile elde edilmiştir. Söz konusu kompozit plaka 4 tarafından basit destekli ve çift eksenli düzlem içi basınç yüklerine maruz kalan bir plakadır. Genetik algoritma yöntemi kullanılarak geliştirilen bilgisayar kodu ile çeşitli yük durumu ve çeşitli plaka en boy oranı kombinasyonları için belirli fiber açısı aralıklarında ve belirli katman sayısında maksimum burkulma dayanımını sağlayan katman dizilimleri elde edilir. Laminatın simetrik ve dengeli olduğu kabul edilir. Bulunan sonuçlar literatürde çalışmaları bulunan grafit/epoksi kompozit malzemesinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda M91/IM10 prepreg malzemesinden imal edilmiş bir plakanın aynı burkulma performansını grafit epoksi'den daha hafif yapılarla sağlayabildiğini ortaya çıkmaktadır.

Anahtar kelimeler: Burkulma, Genetik algoritma, Katman dizilimi, Kompozit

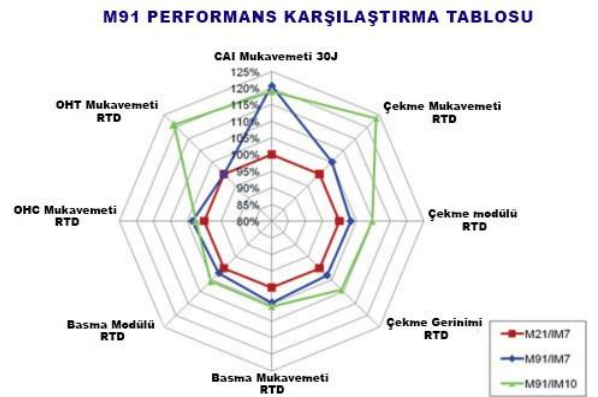
1 Giriş

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, mühendislik için uygun özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve denizcilik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiber takviyeli lamine kompozitler, kalınlık yönünde laminasyon düzleminden daha zayıf oldukları için düzlem dışı yüklemeye karşı hassastır. Bu nedenle, ara katman ve elyaf/matris arayüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, düzlem dışı yük taşıma performansını dolaylı olarak etkiler [1]. Kullanımı giderek yaygınlaşan kompozit malzemeler genellikle sertlik-ağırlık veya mukavemet-ağırlık oranlarının önemli olduğu durumlarda tercih edilirler. Diğer kompozit malzemelerde karşılaştırıldığı zaman havacılık alanında oldukça öne çıkan M91 yeni nesil prepreg malzemesi gövde ana yapıları ve motorlar için performans sınırlarını genişleterek, havacılık ve uzay ekipman üreticilerinin daha hafif, daha hızlı ve daha verimli uçaklar üretmeye yönelik artan ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

Abstract

In this article, the optimum stacking sequence with maximum buckling load factor of a plate made of M91/IM10 unidirectional prepreg material, which has a very high strength compared to the materials used in the aerospace industry, is obtained by genetic algorithm method. The composite plate in question is simply supported at 4 edges and subjected to biaxial in-plane compressive loads. With the computer code developed using the genetic algorithm method, stacking sequences that provide maximum buckling strength at certain fiber angle ranges and certain number of layers for various load cases and various plate aspect ratio combinations are obtained. The laminate is assumed to be symmetrical and balanced. The results are compared with the results obtained from graphite/epoxy composite material, which has been studied in the literature. The comparison reveals that a plate made of M91/IM10 prepreg material can provide the same buckling performance with lighter structures than graphite epoxy.

Keywords: Buckling, Genetic algorithm, Stacking sequence, Composite



Şekil 1. M21/IM7, M91/IM7 ve M91/IM10 prepreg malzemelerin performans karşılaştırması [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: izzet9696@hotmail.com (İ. Kaya)

Geliş / Received: 13.07.2023 Kabul / Accepted: 21.08.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1327137

HexPly M91, darbe sonrası çok yüksek artık sıkıştırma mukavemeti (CAI) ile mükemmel tokluk özelliği ve Hexcel'in yeni HexTow IM10 fiberiyle birlikte geliştirilmiş çekme performansı sağlar. M21/IM7, M91/IM7 ve M91/IM10 prepreg malzemelerinin oda sıcaklığı/kuru (RTD) şartlarda open hole basma (OHC) mukavemeti, open hole çekme (OHT) mukavemeti, CAI mukavemeti ve basma/çekme mukavemeti/gerinimi/modülü **Şekil 1**'de gösterilmektedir.

120°C'ye (250°F) kadar iyi sıcaklık ve nem özellikleri elde edilir. HexPly M91, özellikle otomatik işleme için tasarlanmıştır ve hem otomatik bant döşeme (ATL) hem de gelişmiş fiber yerleştirme (AFP) için uygundur. İyi yapışma ömrü ve kullanım ömrü, atölyede işleme sırasında esneklik sağlar ve düşük ekzoterm davranışı, 70 mm'ye (2.76") kadar kalın monolitik yapıların basit kürlenme döngülerine olanak tanır [3].

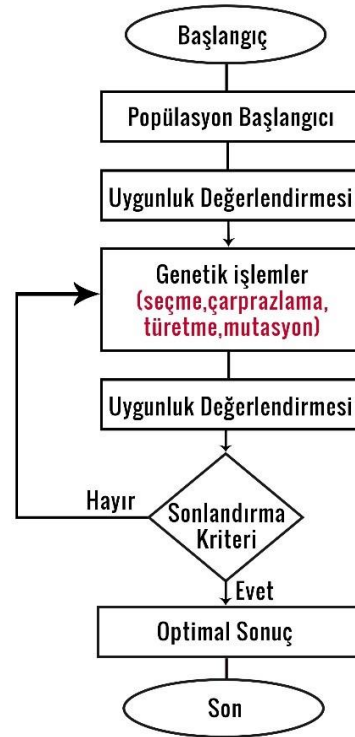
Kompozit malzemelerde yapılan tercih konfigürasyonları sayesinde ağırlık sabit tutularak performans veya isterlere göre ağırlık optimize edilebilir. Sadece katman dizilim sırasını değiştirerek yapılan optimizasyon en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Optimizasyon, sayısız dizilim arasından aynı ağırlığa sahip en iyi dizilimi bulmamızı veya aynı yükleri karşılayan en düşük ağırlığı bulmamızı sağlar. Kompozit katman dizilimi problemleri, türev hesaplamaları gibi analitik yöntemler ile çözülmesi neredeyse imkânsız olduğundan ve büyük hesaplamalar gerektirdiğinden dolayı geleneksel optimizasyon teknikleri ile çözülmesi araştırmacılar tarafından tercih edilmez.

Modern optimizasyon tekniklerinde kompozit katman dizilimi problemleri çözülürken seçilen ilk dizilimden başlayarak iteratif olarak oluşturulan dizilimler ile optimum dizilim bulunmaya çalışılır. Bu nedenle seçilen başlangıç noktasının optimum dizilime yakınlığı oldukça önemlidir. Optimizasyonun başarısı ilk dizilimin başarısına bağlıdır. Bazı optimizasyon teknikleri yerel optimum noktalarda takılı kaldığından dolayı farklı başlangıç noktalarından başlayarak algoritmayı birden çok defa kullanmak gerekir. Bu nedenle başlangıç noktasına duyarlı olmayan ve geniş bir çözüm uzayında arama yapabilen stokastik optimizasyon tekniklerinden birini kullanmak en doğrusudur. Genetik algoritma (GA) en çok tercih edilen stokastik optimizasyon tekniklerindedir. Yerel optimumlara takılı kalmaya da başlangıç noktasının sonuca uzaklığına göre genetik algoritmanın hızı değişebilir.

Bu çalışmada sonuca daha yakın başlangıç noktasından başlayarak algoritmanın hızını arttırmak için rastgele oluşturulan noktalardan elde edilen değerler büyükten küçüğe sıralanmış ve en büyük değer elde edildiği nokta başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Bu işlem ile en iyi bireylerden en iyi çözümler üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu işleme ise elitizm adı verilir [4].

Genetik algoritmalar (GA) rastgele yapıları nedeniyle, tekrarlanan çalışmalarda alternatif optimumlar üretebilirler. Bu nedenle dizilim optimizasyonu için oldukça uygundurlar. Genetik algoritma fonksiyonunun süresiz, türevlenemez, stokastik veya yüksek oranda doğrusal olmadığı sorunları çözmek için kullanılabilir. GA küresel bir arama algoritması

kullanır ve tasarım uzayında tek nokta yerine bir tasarım popülasyonu kullanır. GA'da, genellikle popülasyon olarak adlandırılan bir dizi tasarım rastgele oluşturulur ve yinelemeler yoluyla (genellikle nesiller olarak adlandırılır) geliştirilir. Her nesilde, popülasyon, seçme, çaprazlama, mutasyon ve türetme gibi genetik operatörler kullanılarak dönüştürülür. Sonlandırma kriteri sağlandığında en iyi fonksiyon değerine sahip olan nesil çözüm olarak döndürülür. GA'lar, basit dikdörtgen plakalar, sandviç paneller, I-kesit kiriş, kutu kiriş, vb. gibi çeşitli kompozit yapılarda en uygun istifleme sırasını bulmak için birçok çalışmada kullanılmaktadır. GA'lar lamine kompozitlerin açılı dizilimi optimizasyonu için en popüler tekniklerden biridir. GA'ların performansı büyük ölçüde popülasyon büyüklüğüne ve genetik operatörleri kontrol eden parametrelere bağlıdır. GA'nın performansı ve güvenilirliği, genetik operatörler için dikkatli parametre seçmekle ve bellek tekniği kullanmakla geliştirilebilir.



Şekil 2. Genetik algoritma şeması [5].

Küresel enerji krizi ve çevre kirliliği, ulaşım endüstrisini ulaşım uygulamalarında daha hafif ve daha sağlam yapıları benimsemeye yönlendirmektedir [6]. Özellikle havacılık ve uzay sektöründe daha hafif malzemelerin kullanılması maliyetleri ciddi anlamda düşürmektedir. Fakat malzemelerde aranan tek özellik hafif olması değildir. Bunun yanında malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde istenilen düzeyde olması gereklidir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle kullanımı yaygınlaşan kompozit malzemelerin burkulma yükü kapasitesinin bilinmesi malzemelerin tasarımı için de çok önemlidir [7].

Burkulma, düzlem içi basınç yüklerine maruz kalan ince ve büyük kompozit plakalar için kritik bir hasar modudur.

Kompozit levhaların burkulma yükü maksimizasyonu problemi yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmiştir [8].

Araştırmacıların bu alanda yaptığı çalışmalar 70'li yıllarda başlamış olup günümüze kadar gelişerek devam etmiştir. 70'li yıllarda Chao ve Koh [9] ve Hirano'da [10], sabit katman sayısına yani sabit ağırlığa sahip basit destekli kompozit levhanın farklı yük durumlarında ve uzunluk- genişlik oranında burkulma optimizasyonunun araştırmasını yapmışlardır.

Genetik algoritma yöntemi kullanılarak bu araştırmaların yapılması ise 90'lı yıllarda başlamıştır. Le Riche ve Haftka [11, 12] dikdörtgen bir kompozit laminatın katman tasarımı için daha önce tasarlanan bir genetik algoritmayı geliştirmiş ve böylece burkulmaya ve gerilmelere dayanan ince simetrik ve dengeli laminatlar elde etmişlerdir. Farklı genetik operatörlerin bir arada kullanılmasının algoritmayı iyileştirdiğini ileri sürmüşlerdir.

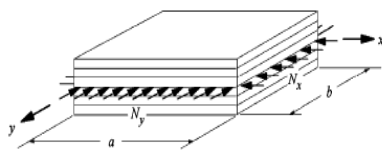
Karakaya ve Soykasap [13], düzlem içi sıkıştırma yüklerine sahip bir grafit/epoksi kompozit panelin katman dizilimi optimizasyonu genetik algoritma ve geliştirilmiş örüntü arama algoritması kullanarak çeşitli yük durumları ve en boy oranları için yapmışlardır. İncelenen kompozit plaka, dört taraftan basit bir şekilde desteklenen 64 katmanlı bir grafit/epoksi laminattır. Farklı küresel optimum dizilimleri bulmak için genetik algoritmanın geliştirilmiş örüntü arama algoritmasından daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmanın temel amacı, M91/IM10 prepreg plakasının burkulma optimizasyonunu genetik algoritma yöntemiyle yapmakla birlikte mekanik özellikleri bilinen çeşitli kompozit malzemeler için daha doğru sonuçları verecek ihtiyaca göre özelleştirilebilir optimizasyon algoritması geliştirmektir. Yapılan çalışma Karakaya ve Soykasap'ın [13] grafit epoksi malzemesi için yaptığı çalışmanın sonuçları ile de karşılaştırılarak aynı yüklemeye ve aynı geometrik yapıya sahip grafit/epoksi ve M91 kompozit malzemelerinin kritik burkulma yük faktörlerindeki değişimler incelenecektir.

Katman dizilimi değiştirilerek yapılacak optimizasyonda kompozit malzemenin üretim maliyetinin düşürülmesi için katman açıları sınırlandırılmıştır. Optimizasyon uygulaması MATLAB kullanılarak yapılmıştır. Plakanın maksimum burkulma yük faktörü, farklı yük durumları ve farklı en boy oranları için elde edilmiştir.

2 Problem tanımı

Söz konusu kompozit panel, a uzunluğunda ve b genişliğindedir ve dört tarafından basitçe desteklenmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. İki eksenli basınç yükleri altında simetrik bir laminat [14].

Panel, sırasıyla x ve y yönlerinde verilen düzlem içi N_x ve N_y basma yüklerine tabidir. $N_x/N_y=k$ yük oranıdır. Laminat simetriktir, orta düzlemde dengelidir ve her biri t kalınlığında katmanlardan yapılmıştır. Yükler $\lambda b N_x$ ve $\lambda b N_y$ değerlerine ulaştığında laminat sırasıyla x ve y yönünde m ve n yarım dalgalar halinde bükülür. λb , eğilme sertlikleri D_{ij} cinsinden tanımlanan yük genliğidir ve burada r, uzunluğun genişliğe oranı, a/b olarak tanımlanan plaka en-boy oranıdır. Yük genliğini veren formülasyon Denklem (1)'de gösterilmiştir.

$$\lambda_b(m, n) = \pi^2 \left[\frac{m^4 D_{11} + 2(D_{12} + 2D_{66})(rmn)^2 + (rn)^4 D_{22}}{(am)^2 N_x + (ran)^2 N_y} \right] \quad (1)$$

Laminatın burkulmadan dayanabileceği maksimum yükü sınırlayan kritik burkulma yükü faktörü λ_{cb} 'nin, herhangi bir çift (m,n) altında λ_b 'nin en küçük değeri olduğu Denklem (2)'de gösterilmiştir. Burkulmayı önlemek için kritik yük faktörü en az birden büyük olmalıdır.

$$\lambda_{cb} = \min \lambda_b(m, n) \quad (2)$$

(m,n) = 2 almanın, burkulma yük kapasitesinin iyi bir tahminiyle sonuçlandığı gösterilmiştir. Buna göre $\lambda(1, 1)$, $\lambda(1, 2)$, $\lambda(2, 1)$ ve $\lambda(2, 2)$ 'nin en küçüğü kritik burkulma yükü olarak alınmıştır [14].

Optimizasyon problemi, M91/IM10 prepreg malzemesinden imal edilmiş panelin maksimum kritik burkulma yük faktörünün (λ_{cb}) optimum konfigürasyonunu bulmaktır. Tablo 1'de mekanik özellikleri verilen her katmanı 0,184 mm kalınlığındaki M91/IM10 tek yönlü prepreg kompozit malzemesi kullanılarak a=50,8 cm genişliğinde $N_x=1000$ N/mm yüklemesine sahip kompozit panelin Tablo 2'deki en boy oranı ve yük oranı koşullarına göre belirli açı diziliminde ve katman sayısında en yüksek burkulma yük faktörünü sağlayan optimum katman dizilimi ve kritik burkulma faktörü değerleri bulunacaktır.

Tablo 1. M91/IM10 tek yönlü prepreg kompozit malzemesinin mekanik özellikleri [15].

Özellik	Birim	Değer
Elastisite modülü - E1	GPa	176
Elastisite modülü - E2	GPa	15
Kesme modülü - G12	GPa	5.6
Poisson oranı - ν_{12}	-	0.27
Katman kalınlığı - t	mm	0.184

Tablo 2. Kompozit plaka koşulları

Koşullar	En Boy Oranı (r)	Yük Faktörü (k)
Koşul 1	2	1
Koşul 2	1	1
Koşul 3	1/2	1
Koşul 4	2	2
Koşul 5	1	2
Koşul 6	1/2	2
Koşul 7	2	1/2
Koşul 8	1	1/2
Koşul 9	1/2	1/2

Bulunan sonuçlar **Tablo 3**'te özellikleri verilen grafit epoksi kompozit malzemesinin kritik burkulma faktörü değerleri ile karşılaştırılacaktır. Epoksiler, gelişmiş yük taşıma kabiliyetleri ile açık deniz, ulaşım ve sivil altyapılarda en çok tercih edilen termoset yapıştırıcılar arasındadır [6]. Karbon fiberler ile epoksi reçinenin birleştirilmesi ile yüksek mekanik özelliklere sahip grafit/epoksi malzemesi ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3. Grafit/epoksi kompozit malzemesinin mekanik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Elastisite modülü - E1	GPa	127.59
Elastisite modülü - E2	GPa	13.03
Kesme modülü - G12	GPa	6.41
Poisson oranı - ν_{12}	-	0.28
Katman kalınlığı - t	mm	0.127

3 Problem analizi

Karakaya ve Soykasap'ın [13] **Tablo 3**'te özellikleri verilen epoksi reçinesi ve karbon takviyesinden oluşan grafit/epoksi kompozit malzemesi için 64 katman ve (0)₂, (± 45), (90)₂ fiber açıları ile yaptığı çalışma M91/IM10 prepreg malzemesi için aynı açı dizilimi ve katman sayısı kullanılarak ve Matlab ile yazılan GA kodu çalıştırılarak yapılmıştır. Çalışmaların karşılaştırmaları **Tablo 4**'te gösterilmiştir. Karakaya ve Soykasap'ın [13] yaptığı çalışma incelendiğinde açıların tekli [(0) (45) (90)] veya çiftli [(0)₂ (± 45) (90)₂] kullanılmasının hemen hemen aynı maksimum burkulma yük faktörü değerini verdiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle üretim kolaylığı nedeniyle açılarının çiftli kullanımını tercih etmenin daha doğru olduğu değerlendirilmektedir.

Çalışmanın amacı sadece daha önce yapılan çalışmalarını yeni nesil M91/IM10 prepreg malzemesi için tekrar etmek değildir aynı zamanda bu çalışmayla birlikte mekanik özellikleri bilinen çeşitli kompozit malzemelerde kullanılacak, daha doğru sonuçları verecek ve açı çeşidi, nesil sayısı, burkulma yük faktörü sınırı gibi parametreleri değiştirerek ihtiyaca göre özelleştirilebilir algoritma geliştirmektir. Algoritmayı oluştururken genetik algoritmadan yararlanılmıştır. Algoritmanın küresel optimum noktaları tek seferde bulabilmesi için algoritmaya elitizm eklenmiştir. Elitizm ile rastgele nesiller sıralanır ve en iyi sonucu veren nesilden algoritma devam ettirilir. Elitizm için seçilen rastgele nesil sayısı önemlidir. Az nesil seçildiği zaman küresel optimumu bulmak için daha fazla yineleme yapılması gerekebilir. Fazla nesil sayısı seçildiği zaman ise algoritma yavaşlayacaktır. Katman sayısı da nesil sayısının seçiminde önemli bir parametredir. Katman sayısı arttıkça elitizmde sıralanacak nesil sayısının artırılması daha hızlı sonuca ulaşmayı sağlar. Elitizm sonrasında seçilen nesile çarpazlama ve mutasyon operatörleri uygulanarak küresel optimumlar bulunmaya çalışılır. Algoritma bir süre sonra parametre olarak girilen açı değerleriyle değil onların arasından seçilen küresel optimum noktayı bulmayı sağlayacak açı değerleri ile devam eder. Algoritma işine yaramayacak açı değerlerini mutasyon ve çarpazlama operatörü olarak uygulamayacak şekilde programlanmıştır.

Algoritmaya aynı zamanda burkulma yük faktörü sınırı da değiştirilebilir olarak eklenmiştir. Algoritmadan çıkan burkulma yük faktörü değerleri algoritmaya girilen burkulma yük faktörü sınırı parametresinden büyük olana kadar algoritma çalışır. Program yineleme sayısı sonunda istenen sonucu bulamamışsa istenen sonucu bulana kadar katman sayısını 4 arttırarak çalışmaya devam eder. Daha fazla küresel optimum nokta bulabilmek için algoritmada parametre olarak 64 katman için 10000 yineleme sayısı ile 300 nesil sayısı, 44 katman için 1000 yineleme sayısı ile 150 nesil sayısı girilmiştir. Algoritma genellikle 64 katman için 600 yinelemenin altında, 44 katman için 300 yinelemenin altında küresel optimum noktalardan birisine ulaşmıştır.

Tablo 4. Grafit/epoksi ve M91/IM10 kompozit malzemelerinin 64 katmandaki kritik burkulma yükleri

Koşullar	Grafit/epoksi λ_{cb}	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	695 781	2 809 364
Koşul 2	242 823	1 000 287
Koşul 3	173 945	702 341
Koşul 4	1 057 948	4 289 822
Koşul 5	323 764	1 333 716
Koşul 6	206 493	825 323
Koşul 7	412 986	1 662 095
Koşul 8	161 882	666 858
Koşul 9	132 244	536 229

M91/IM10 kompozit malzemesinin 64 katmanda, farklı yük ve en boy oranlarına göre maksimum burkulma yük faktörleri bazen birkaç farklı açı dizilimi ile sağlanmıştır. Çok sayıda küresel optimum olduğunda kat dizisinde minimum değişiklik ve dolayısıyla üretim kolaylığı sunan açı dizilimi tercih edilmiştir. Farklı koşullara göre aynı maksimum yük faktörü değerini veren küresel optimum noktalardan bir tanesi seçilerek **Tablo 5** oluşturulmuştur.

Tablo 5. M91/IM10 prepreg malzemesinin 64 katmandaki optimum katman dizilimi tablosu

Koşullar	Açı Dizilimi	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	$[\pm 45_1/90_{14}/\pm 45_4/90_2/\pm 45_2/90_2]_s$	2 809 364
Koşul 2	$[\pm 45_{16}]_s$	1 000 287
Koşul 3	$[\pm 45_1/0_{14}/\pm 45_4/0_2/\pm 45_2/0_2]_s$	702 341
Koşul 4	$[\pm 45_3/90_6/\pm 45_1/90_{12}/\pm 45_1/90_4]_s$	4 289 822
Koşul 5	$[\pm 45_{16}]_s$	1 333 716
Koşul 6	$[0_{14}/\pm 45_1/0_4/\pm 45_4/0_4]_s$	831 048
Koşul 7	$[90_{14}/\pm 45_1/90_4/\pm 45_4/90_4]_s$	1 662 095
Koşul 8	$[\pm 45_{16}]_s$	666 858
Koşul 9	$[\pm 45_1/0_2/\pm 45_2/0_8/\pm 45_3/0_2/\pm 45_4]_s$	536 229

Grafit/epoksi kompozit malzemesinin bir katmanı 0,127 mm, M91/IM10 prepreg malzemesinin bir katmanı 0,184 mm kalınlığındadır. Aradaki kalınlık farkından dolayı aynı katman sayılarında değil aynı kalınlıklarda karşılaştırılması daha doğru karşılaştırma yapılmasını sağlar.

Grafit/epoksi kompozit malzemesi 64 katmanla 8,128 mm kalınlığında iken M91/IM10 prepreg malzemesi 44 katmanla 8,096 mm kalınlığındadır. Bu sebeple burkulma analizi 44 dizilime göre tekrar yapılarak karşılaştırmalı sonuçları **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Yaklaşık kalınlıklardaki grafit/epoksi ve M91/IM10 prepreg malzemelerinin kritik burkulma yükleri

Koşullar	Grafit/epoksi λ_{cb}	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	695 781	912 809
Koşul 2	242 823	325 044
Koşul 3	173 945	228 202
Koşul 4	1 057 948	1 393 713
Koşul 5	323 764	433 393
Koşul 6	206 493	269 764
Koşul 7	412 986	539 528
Koşul 8	161 882	216 696
Koşul 9	132 244	174 214

M91/IM10 prepreg malzemesinin 44 katmanda, farklı yük ve en boy oranlarına göre maksimum burkulma yük faktörleri bazen birkaç farklı açı dizilimi ile sağlanmıştır. Çok sayıda küresel optimum olduğunda kat dizisinde minimum değişiklik ve dolayısıyla üretim kolaylığı sunan açı dizilimi tercih edilmiştir. Farklı koşullara göre aynı maksimum yük faktörü değerini veren küresel optimum noktalardan bir tanesi seçilerek **Tablo 7** oluşturulmuştur.

Tablo 7. M91/IM10 prepreg malzemesinin 44 katmandaki optimum katman dizilimi tablosu

Koşullar	Açı Dizilimi	M91/IM10 λ_{cb}
Koşul 1	$[90_6/\pm 45_3/90_8/\pm 45_1]_s$	912 809
Koşul 2	$[\pm 45_{11}]_s$	325 044
Koşul 3	$[0_6/\pm 45_3/0_8/\pm 45_1]_s$	228 202
Koşul 4	$[\pm 45_1/90_2/\pm 45_1/90_2/\pm 45_1/90_4/\pm 45_1/90_6]_s$	1 393 713
Koşul 5	$[\pm 45_{11}]_s$	433 393
Koşul 6	$[0_{10}/\pm 45_1/0_2/\pm 45_1/0_2/\pm 45_2]_s$	269 764
Koşul 7	$[90_{10}/\pm 45_1/90_2/\pm 45_1/90_2/\pm 45_2]_s$	539 528
Koşul 8	$[\pm 45_{11}]_s$	216 696
Koşul 9	$[\pm 45_2/0_6/\pm 45_1/0_4/\pm 45_1/0_4]_s$	174 214

Maksimum burkulma yük faktörünü veren açı dizilimleri incelendiğinde en boy oranı değerlerine göre popülasyonu oluşturan $(0)_2$, (± 45) , $(90)_2$ açılarından hepsinin maksimum burkulma yük faktörünü veren sonuçlar arasında yer almadığı gözlemlenmiştir. Yani oluşturulan algoritma en boy oranı koşuluna göre en iyi sonucu verecek açıları kullanarak diğer açı veya açıları elimine etmiştir. Bu çalışmada kullanılan en boy oranları için maksimum burkulma yük faktörü değerine ulaştıran optimum açılar ve elimine edilen açılar **Tablo 8**'de gösterilmiştir.

Tablo 8. En boy oranına göre optimumu sağlayan açılar ve elimine edilen açılar

En Boy Oranı	Optimumu Sağlayan Açılar	Elimine Edilen Açılar
2	$[(\pm 45) (90)_2]$	0
1	$[(\pm 45)]$	0-90
1/2	$[(0)_2 (\pm 45)]$	90

Plakanın x ve y eksenlerindeki düzlem içi yükler dengeli olduğu zaman en boy oranının a/b'den b/a dönüşmesi plakanın koordinat düzleminde döndürülmesi ile aynı şeyi ifade eder. Bu nedenle yük oranı 1 iken en boy oranı 2'ye göre yapılan analizlerdeki 90 açılarının 0 ile

değiştirilmesinin en boy oranı $\frac{1}{2}$ deki maksimum burkulma dizilimini vermektedir.

4 Sonuçlar ve tartışma

M91/IM10 tek yönlü prepreg malzemesinden üretilmiş bir panelin farklı açı dizilimlerine sahip konfigürasyonlarından maksimum burkulma kapasitesinin elde edildiği konfigürasyonu bulmak için Matlab yazılımı aracılığıyla genetik algoritma yöntemi kullanılarak oluşturulan Matlab kodu kullanılmıştır. 64 ve 44 katmanları için çalışma yapılan M91/IM10 panelin simetrik ve dengeli olduğu kabul edilmiştir. Genetik algoritma küresel (global) bir arama algoritmasıdır. Başlangıç noktasının daha iyi seçilmesine yardımcı olan elitizm sayesinde daha doğru sonuçlar algoritma tek sefer çalıştırılarak alınmıştır. Sonuçların küresel optimum (en iyi değer) olduğunun kontrolü için algoritma birden fazla defa çalıştırılarak aynı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Küresel optimumlar, farklı yük durumları ve farklı panel en boy oranları için başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Literatürde yer alan burkulma yükü optimizasyon problemi için yapılan çalışma literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Üretim kolaylığı açısından düşünülerek sınırlı açılar çift dizimli olacak şekilde algoritmanın çalıştırılması uygun bulunmuştur. Bu nedenle $(0)_2$, (± 45) , $(90)_2$ fiber açıları kullanılarak 0.5, 1, 2 düzlem içi yük oranlarında ve 0.5, 1, 2 en boy oranlarında sayısal incelemeler yapılmıştır. Bazı koşullarda yalnızca bir küresel optimum bulunurken bazı koşullarda birçok küresel optimum bulunmuştur. Çok sayıda küresel optimum olduğunda kat dizisinde minimum değişiklik ve dolayısıyla üretim kolaylığı sunan açı dizilimi tercih edilmiştir. Algoritmaların etkinliği parametrelerin seçimine bağlıdır. Üretim kolaylığını düşünerek seçimler yapmak algoritmanın daha iyi sonuçları daha kısa sürede bulmasını sağlar. M91/IM10 prepreg malzemesinin grafit/epoksi malzemesi ile aynı katman sayısında karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda M91/IM10'un daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. M91/IM10 ve grafit/epoksi'nin bir katmanının kalınlıkları birbirinden farklı olduğu için grafit epoksinin 64 katmanıya yaklaşık olarak aynı kalınlıkta olan M91/IM10'un 44 katmanı karşılaştırılmıştır. M91/IM10'un 44 katman ile 64 katmanla oluşturulan grafit/epoksi'den daha iyi performans gösterdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Az katman sayısı M91/IM10'un üretim kolaylığı açısından da daha iyi olduğunu göstermektedir. Algoritma ile grafit/epoksi ile aynı kalınlığa sahip M91/IM10'un daha büyük burkulma yükü kapasitesine sahip tasarımları bulunabilmiştir. En boy oranlarına göre en iyi sonucu veren açı kümelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Örneğin en boy oranı 1 iken popülasyonda $(0)_2$, (± 45) , $(90)_2$ açıları yer almasına rağmen en iyi sonuç sadece (± 45) açılarından oluşmaktadır. 0 ve 90 açıları en iyi sonuçta yer almamaktadır. Farklı en boy oranlarında farklı açı kümelerinin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucu M91/IM10 prepreg malzemesinin burkulma dayanımı ve üretim kolaylığından dolayı havacılık ve otomotiv alanında tercih edilebilir bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] M. Özer, H. Ulus ve H.B. Kaybal, Enhanced out-of-plane loading performance of multi-scale glass/epoxy composites doped with HNT. IJPTTE Vol. 02, No.01, pp. 99-102, 2023. <https://doi.org/10.56158/ijpte.2023.2.2.01>
- [2] M91 Composite Trend, HexPly M91 Prepreg Performans Grafiği. https://www.hexcel.com/user_area/uploads/HexPly_M91_Composite_Trend.pdf, Erişim 15 Haziran 2023.
- [3] M91 Prepreg, HexPly M91 Prepreg Hakkında Bilgi. <https://www.hexcel.com/About/Technology-Breakthroughs/HEXPLY-M91-Prepreg?showmodal=1>, Erişim 15 Haziran 2023.
- [4] E.U. Ergül, Çok amaçlı genetik algoritmalar: temelleri ve uygulamaları. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2010.
- [5] A. Bhujbal, Optimization of composite stacking sequence using mesh adaptive direct search. Yüksek Lisans Tezi, Department of Mechanical Engineering McGill University, Montréal, Kanada 2017.
- [6] H. Ulus, H.B. Kaybal, F. Cacık, V. Eskizeybek and A. Avcı, Fracture and dynamic mechanical analysis of seawater aged aluminum-BFRP hybrid adhesive joints. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 268, 2022, Article 108507. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108507>.
- [7] G. Adabaşı, Stacking sequences optimization of laminated composites for maximum buckling strength by stochastic search methods. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Institute of Technology, Urla, İzmir, 2020.
- [8] H.A. Deveci, L. Aydın and H.S. Artem, Buckling Optimization of Composite Laminates Using a Hybrid Algorithm Under Puck Failure Criterion Constraint. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 0(0), 1–15, 2016. <https://doi.org/10.1177/0731684416646860>.
- [9] C. C. Chao, S. L. Koh and C. T. Sun, Optimization of Buckling and Yield Strengths of Laminated Composites. AIAA Journal, Vol. 13, No. 9, pp. 1131-1132, 1975. <https://doi.org/10.2514/3.60515>.
- [10] Y. Hirano, Optimum Design of Laminated Plates under Axial Compression. AIAA Journal, Vol. 17, No. 9, pp. 1017-1019, 1979. <https://doi.org/10.2514/3.61269>.
- [11] R. T. Haftka and R. Le Riche, Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm. AIAA J. 31(5): p. 951-956, 1993. <https://doi.org/10.2514/3.11710>.
- [12] R. Le Riche and R. T. Haftka, Improved Genetic Algorithm For Minimum Thickness Composite Laminate Design. Composites Engineering, 5(2): p. 143- 161, 1995. [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(95\)90710-S](https://doi.org/10.1016/0961-9526(95)90710-S).
- [13] Ş. Karakaya and Ö. Soykasap, Buckling optimization of laminated composite plates using genetic algorithm and generalized pattern search algorithm. Struct Multidisc Optim, 39, 477–486, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00158-008-0344-2>.
- [14] Ö. Erdal and F.O. Sönmez, Optimum Design Of Composite Laminates For Maximum Buckling Load Capacity Using Simulated Annealing. Composite Structures, 71, 45–52, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.09.008>.
- [15] S. Gup, J. E. Monteros and Y. Liu, Gust Alleviation of a Large Aircraft with a Passive Twist Wingtip. Aerospace, 2, 135-154, 2015. <https://doi.org/10.3390/aerospace2020135>.

