

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK BOYUTSAL KARARLILIK İÇİN GA/GPSA
ALGORİTMASI KULLANILARAK HİBRİT VE HİBRİT
OLMAYAN TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
OPTİMUM TASARIMI

Hacer GEÇMEZ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hamza Arda DEVECİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN

2021

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK BOYUTSAL KARARLILIK İÇİN GA/GPSA ALGORİTMASI KULLANILARAK HİBRİT VE HİBRİT OLMAYAN TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN OPTİMUM TASARIMI

Hacer GEÇMEZ

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hamza Arda DEVECİ

Son birkaç on yılda dünya çapında kompozit malzemeler; havacılık, uzay, savunma, otomotiv gibi sanayi uygulamalarında artan bir şekilde geleneksel malzemelerin yerine kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında ani sıcaklık değişimlerine karşı koyabilecek boyutsal kararlı kompozit malzemelere ihtiyaç vardır. Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, uyarlanabilirlik özellikleri sayesinde uzay yapılarının boyutsal kararlılık ihtiyacını karşılamak için iyi bir potansiyele sahiptir. Bu tezde fiber takviyeli tabakalı kompozit plakalarda sıcaklık değişimlerine karşı en yüksek boyutsal kararlılığı elde etmek hedeflenmektedir. Bu amaçla, ilk olarak, simetrik ve dengeli karbon/epoksi kompozit plakaların yüksek elastisite modülü kısıtları altında en düşük termal genleşme katsayılarını elde etmek için hem sürekli hem de geleneksel açılar kullanılarak fiber açısı dizilimi optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve seçilen optimum tasarımların termal dayanımı test edilmiştir. İkinci olarak, sekiz farklı kompozit malzeme (Aramid/Epoksi, AS4/Epoksi, Boron/Epoksi, E-Cam/Epoksi, IM6/Epoksi, GY70/Epoksi, Kevlar49/Epoksi ve Spektra/Epoksi) kullanılarak iki malzeme içeren iki farklı simetrik dizilimde en düşük termal genleşme katsayılarını veren optimum sürekli ve geleneksel fiber açısı dizilimlerine sahip hibrit kompozit plakalar araştırılmış ve seçilen hibrit tasarımların termal dayanımı test edilmiştir. Her iki oluşturulan çalışma için de optimizasyon algoritması olarak MATLAB programı içerisindeki optimizasyon aracı ile oluşturulan GA/GPSA hibrit algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar, kullanılan kompozit malzemelerin hibrit olmayan optimizasyon çalışması sonuçları ile birlikte değerlendirilerek sunulmuştur. Sonuçlar, kompozit malzemelerin hibritlenerek hibrit olmayan malzemelere göre daha iyi boyutsal kararlılık elde edilebildiğini ortaya koymaktadır.

2021, 104 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Boyutsal kararlılık, Hibrit algoritma, Hibrit tabakalı kompozit, Optimizasyon, Tabakalı kompozit plaka

ABSTRACT

MSc Thesis

OPTIMUM DESIGN OF HYBRID AND NON-HYBRID LAMINATED COMPOSITE MATERIALS USING GA/GPSA ALGORITHM FOR HIGH DIMENSIONAL STABILITY

Hacer GEÇMEZ

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr.Hamza Arda DEVECI

In the last few decades, composite materials are increasingly used worldwide in place of traditional materials in industrial applications such as aerospace, defense and automotive. Dimensionally stable composite materials that can resist sudden temperature changes are needed, especially in aerospace applications. Fiber-reinforced laminated composite materials have a good potential to meet the dimensional stability needs of space structures thanks to their tailorability properties. In this thesis, it is aimed to obtain the highest dimensional stability against temperature changes in fiber reinforced laminated composite plates. For this purpose, firstly, stacking sequence optimization was performed using both continuous and conventional angles to obtain the lowest thermal expansion coefficients of symmetrical and balanced carbon/epoxy composite plates under high modulus of elasticity constraints, and the thermal resistance of the selected optimum designs was tested. Secondly, using eight different composite materials (Aramid/Epoxy, AS4/Epoxy, Boron/Epoxy, E-Glass/Epoxy, IM6/Epoxy, GY70/Epoxy, Kevlar49/Epoxy and Spectra/Epoxy) hybrid composite plates with optimum continuous and conventional stacking sequences giving the lowest coefficients of thermal expansion were investigated in two different sequences including two materials and the thermal resistance of the selected hybrid designs was tested. The GA/GPSA hybrid algorithm constituted with the optimization toolbox in the MATLAB program was used as the optimization algorithm for both studies. The results are presented together with the results of non-hybrid optimization study of the composite materials used. The results reveal that better dimensional stability can be obtained by hybridizing composite materials than non-hybrid materials.

2021, 104 Pages

Keywords: Dimensional stability, Hybrid algorithm, Hybrid laminated composite, Laminated composite plate, Optimization

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde engin bilgilerini benimle paylaşan, kıymetli zamanını bana ayıran, desteğini, güler yüzünü ve samimiyetini benden hiç esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hamza Arda DEVECİ 'ye teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarım sırasında benden hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve bu hayattaki en büyük şansım olan annem Aysel GEÇMEZ'e ve beni her zaman sabırla dinleyen, ümit veren kız kardeşim Hilal Şebnem GEÇMEZ'e teşekkür ederim.

Hacer GEÇMEZ

Aralık, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa	
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Literatür Araştırması	2
1.2.Çalışmanın Amacı	6
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	7
2.1. Giriş	7
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	9
2.3.Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	13
3. KOMPOZİT MALZEME MEKANIĞI.....	16
3.1. Klasik Laminasyon Teorisi	16
3.2. Higrotermal Etkiler Altında Kompozit Plakaların Mekaniği	21
4. KOMPOZİT PLAKALARDA HASAR TEORİLERİ	23
4.1. Tsai-Wu Hasar Teorisi	24
4.2. Hashin-Rotem Hasar Teorisi	25
5. OPTİMİZASYON	27
5.1. Optimizasyon Probleminin Tanımı	28
5.2 Optimizasyon Yöntemleri	30
5.3. Genetik Algoritma (GA)	31
5.3.1. Genetik algoritmanın (GA) kullanım alanları.....	32
5.3.2. Genetik algoritma terminolojisi.....	33
5.3.3. Genetik operatörler	34
5.4. Genelleştirilmiş Model Arama Algoritması (GPSA)	38
5.5. Genetik Algoritma (GA)/ Genelleştirilmiş Model Algoritması (GPSA) Hibrit Algoritması.....	38
5.6. Matlab Optimizasyon Araç Kutusu	40
5.7. Hibrit Algoritmanın Performansı	43

6. HİBRİT ALGORİTMA KULLANILARAK KARBON/EPOKSİ KOMPOZİT PLAKALARIN BOYUTSAL KARARLILIK TASARIMI	44
6.1. Problem Tanımı	44
6.2. Bulgular ve Tartışma	47
6.3. Optimum Tasarımların Sıcaklık Değişimi Altındaki Performansı	50
7. HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELER İLE BOYUTSAL KARARLILIK OPTİMİZASYONU	54
7.1. Problem Tanımı	54
7.2. Bulgular ve Tartışma	57
7.3. Optimum Hibrit Kompozit Tasarımların Sıcaklık Değişimi Altındaki Performansı	84
8.SONUÇLAR	90
KAYNAKLAR	92
EKLER.....	95
Ek-1. Matlab Bilgisayar programı (Tek malzeme için)	95
Ek-2. Matlab Bilgisayar programı (Hibrit malzeme için)	99

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Eski çağlarda kullanılan kompozit malzemeler	7
Şekil 2.2. Takviye formuna dayalı kompozit türleri	10
Şekil 2.3. Dünya Geneline Kompozit Malzemelerin 2019 yılı sevkiyat dağılımı	14
Şekil 2.4. Boeing 787’de çeşitli malzemelerin kullanımı	14
Şekil 2.5. Orta Sınıf Bir Araçta Doğal, Cam, Karbon Elyaftan Yapılmış Parçalara Örnekler ...	15
Şekil 3.1. Tabakalı Kompozitlerin Analiz Şeması.....	16
Şekil 3.2. Global ve lokal koordinatları gösterilen tabakalı kompozit plaka.....	17
Şekil 3.3. Bir laminatta ait tabakaların koordinatları	18
Şekil 3.4. Kompozit laminat üzerindeki kuvvet bileşenleri.....	21
Şekil 4.1. Kompozit Lamina Malzemelerin Sınıflandırılmış Hasar Kriterleri.....	23
Şekil 5.1. Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması	28
Şekil 5.2. Amaç fonksiyonunun $f(x)$ minimum ve maksimumu.....	29
Şekil 5.3. Algoritmaların sınıflandırılması.....	30
Şekil 5.4. Bir kromozomun temsili	33
Şekil 5.5. Bir kromozomdaki genlerin temsili.....	33
Şekil 5.6. Çaprazlama işlemi	35
Şekil 5.7. Mutasyon işlemi	35
Şekil 5.8. Seçim işlemi	36
Şekil 5.9. Genetik Algoritmanın Akış Şeması.....	37
Şekil 5.10. Hibrit bir algoritmanın akış seması	39
Şekil 5.11. MATLAB Toolbox içerisinde bulunan genetik algoritma çözücü ara yüzü.....	39
Şekil 6.1. Termal yüklemelere maruz kalan, global ve lokal koordinatları ifade eden tabakalı kompozit plaka modeli.....	44
Şekil 6.2. 12 tabakalı kompozit malzemenin istifleme dizini $[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3]_s$	46
Şekil 6.3. 16 tabakalı kompozit malzemenin istifleme dizini $[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3 / \pm\theta_4]_s$	47
Şekil 6.4. Optimum $\min \alpha_x [\pm 82 / \pm 3 / \pm 58.5]_s$, $\min \alpha_y [\pm 31 / \pm 88.9 / \pm 9.1]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin farklı hasar teorilerine göre termal performansı	51
Şekil 6.5. Optimum $\min \alpha_x [0_2 / \pm 45 / 90_2]_s$, $\min \alpha_y [90_2 / \pm 45 / 0_2]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin farklı hasar teorilerine göre termal performansı	51
Şekil 6.6. Optimum $\min \alpha_x [\pm 4 / \pm 85.4 / \pm 82 / 34.2]_s$, $\min \alpha_y [\pm 4 / \pm 34.2 / \pm 85.4 / 82]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin farklı hasar teorilerine göre termal performansı.....	52

Şekil 6.7. Optimum $\min \alpha_x [0_2/\pm 45/90_2]_S$, $\min \alpha_y [90_2/\pm 45/0_2]_S$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin farklı hasar teorilerine göre termal performansı	52
Şekil 7.1. Tabakalar arası hibrit kompozit plaka	55
Şekil 7.2. 16 tabakalı hibrit kompozit plakaların $[A / B]_{45}$ dizilimi	56
Şekil 7.3. 16 tabakalı hibrit kompozit plakaların $[4A / 4B]_S$ dizilimi.....	56
Şekil 7.4. Optimum $[A / B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [68/29/55/82/44/27/65/11]_S$, $\min \alpha_y [69/60/5/20/27/56/8/75]_S$ E-cam-Kevlar/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı.....	85
Şekil 7.5. Optimum $[A / B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [84/26/74/32/59/21/75/28]_S$, $\min \alpha_y [11/60/7/47/39/59/5/55]_S$,E-cam-IM6/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı.....	85
Şekil 7.6. Optimum $[A / B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [39/89/42/83/42/84/39/83]_S$, $\min \alpha_y [50/4/53/4/50/4/50/4]_S$, AS4-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı	86
Şekil 7.7. Optimum $[A / B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [45_7/90]_S$, $\min \alpha_y [45/0/45/0/45/0/90/0]_S$, Aramid-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı	86
Şekil 7.8. Optimum $[4A / 4B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [42/84/33/64/33/82/10/80]_S$, $\min \alpha_y [51/1/59/7/79/11/60/42]_S$,As4-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı	88
Şekil 7.9. Optimum $[4A / 4B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [-35/35/27/-7/74/76/78/83]_S$, $\min \alpha_y [69/-38/57/56/18/25/20/31]_S$, Boron-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı	88
Şekil 7.10. Optimum $[4A / 4B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [61/ 56/ 88/ 88/ 7/ 36/ 88/ 34]_S$, $\min \alpha_y [1/ 28/ 0/ 0/ 1/ 21/ 1/ 0]_S$, AS4-Spektra /Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı.....	89
Şekil 7.11. Optimum $[4A / 4B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [45/90/45/90/45/90/45/90]_S$, $\min \alpha_y [45/0/45/0/45/0/45/0]_S$, As4-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı.....	89

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Kompozit malzemelerin kullanıldığı mühendislik uygulamalarının farklı tasarım amaçları.....	2
Tablo 2.1. Fiberlerin, epoksi matrisli kompozitlerin ve dökme metallerin young modülü ve özgül mukavemet değerleri.....	8
Tablo 2.2. Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri	11
Tablo 2.3. Metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri.....	12
Tablo 2.4. Seramik matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri.....	12
Tablo 2.5. Karbon-karbon matris kompozitlerin mekanik özellikleri.....	13
Tablo 4.1. Tek Yönlü Laminaya ait Mekanik Özellikler	25
Tablo 5.1. Karbon/epoksi kompozit malzeme özellikleri	43
Tablo 5.2. Test sorunu için yükleme durumları	43
Tablo 6.1. GA-GPSA hibrit algoritmasının performans sonuçları.....	45
Tablo 6.2. Malzeme parametrelerine ait model problemler	46
Tablo 6.3. Sürekli açı değerleri için 12 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları	48
Tablo 6.4. Sürekli açı değerleri için 16 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3/\pm\theta_4]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları.....	48
Tablo 6.5. Geleneksel açılı 12 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları.....	49
Tablo 6.6. Geleneksel açılı 16 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3/\pm\theta_4]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları	50
Tablo 7.1. Tabakalı kompozit tasarımlarında kullanılan malzeme özellikler	54
Tablo 7.2. Sürekli açılı hibrit olmayan kompozit plakaların optimizasyon sonuçları.....	57
Tablo 7.3. Geleneksel açılı hibrit olmayan kompozit plakaların optimizasyon sonuçları.....	58
Tablo 7.4. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	59
Tablo 7.5. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar 49/Epoksi) optimizasyon sonuçları..	60
Tablo 7.6. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Aramid /Epoksi) optimizasyon sonuçları	61
Tablo 7.7. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) optimizasyon sonuçları	62
Tablo 7.8. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-AS4/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	63
Tablo 7.9. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-IM6/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	64

Tablo 7.10. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Boron/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	65
Tablo 7.11. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Spektra/Epoksi) optimizasyon sonuçları ...	66
Tablo 7.12. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları.....	67
Tablo 7.13. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar 49/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları	68
Tablo 7.14. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Aramid/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları.....	69
Tablo 7.15. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları.....	70
Tablo 7.16. $[A / B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-AS4/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları.....	71
Tablo 7.17. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) optimizasyon sonuçları ..	72
Tablo 7.18. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar 49/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	73
Tablo 7.19. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-IM6/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	74
Tablo 7.20. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) optimizasyon sonuçları..	75
Tablo 7.21. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-AS4/Epoksi) optimizasyon sonuçları	76
Tablo 7.22. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Boron/Epoksi) optimizasyon sonuçları...	77
Tablo 7.23. $[4A / 4B]_5$ hibrit kompozit plakaların (A-Spektra-Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	78
Tablo 7.24. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Aramid/Epoksi) optimizasyon sonuçları.....	79
Tablo 7.25. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları	80
Tablo 7.26. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar 49/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları	81
Tablo 7.27. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon	82
Tablo 7.28. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (AS4/Epoksi A-) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları	83

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

$f(x)$	Amaç Fonksiyonu
E_1	Boylamasına Elastisite
E_2	Boylamasına Elastisite
$(\sigma_1^T)_{ult}$	Boylamasına Maksimum Çekme Dayanımı
$(\sigma_1^C)_{ult}$	Boylamasına Maksimum Basma Dayanımı
G_{12}	Düzlem Kayma Modülü
$[Q]_{ij}$	Dönüştürülmüş e İndirgenmiş Rijitlik Matrisi
$(\sigma_2^T)_{ult}$	Enine Maksimum Çekme Dayanımı
$(\sigma_2^C)_{ult}$	Enine Maksimum Basma Dayanımı
γ_{xy}^0	Enine Kayma Şekil Değiştirmesi
(θ)	Fiber Açısı
$\{d_i\}$	GA Algoritmasının Desen Vektörü
x_o	GA Algoritmasının İlk Çözümü
x_i^m	GA Algoritmasının Komşu Örgü Noktası
$x, y \text{ ve } z$	Global Koordinatlar
$F_1, F_2, F_6, F_{11},$ F_{12}, F_{22} ve F_{66}	Hasar Tensörleri
$[4A / 4B]_{4s}$	Hibrit Malzeme Dizilimi
$[A / B]_{4s}$	Hibrit Malzeme Dizilimi
τ_{12}	Kayma Gerilmesi
N_{xy}	Kayma Bileşke Kuvvet

$(\tau_{12})_{ult}$	Maksimum Kayma Dayanımı
σ_1	Malzemenin Elyaf Doğrultusuna Paralel Yöndeki Normal Gerilme
σ_2	Malzemenin Elyaf Doğrultusuna Dik Yöndeki Normal Gerilme
ν_{21}	Majör Poisson Oranı
N_x, N_y	Normal Bileşke Kuvvetler
$\epsilon_x^0, \epsilon_y^0$	Orta Düzlem Birim Şekil Değişirmeleri
ΔT	Sıcaklık Farkı
n	Tabaka Sayısı
$[N^T]$	Termal Yük Matrisi
h	Toplam Tabaka Kalınlığı
$[A^*] = [A]^{-1}$	Uzama Kısalma Rijitlik Matrisinin Tersi
$[A_{ij}]$	Uzama-Kısalma Rijitlik Matrisi
α_x	X Düzleminde Isıl Genleşme Katsayısı
α_y	Y Düzleminde Isıl Genleşme Katsayısı
α_{xy}	XY Düzleminde Isıl Genleşme Katsayısı

Kısaltmalar

Al₂O₃	Alüminyum Oksit
B₄C	Bor Karbür
CTE	Coefficient Of Thermal Expansion
GA	Genetik Algoritma- Genetic Algorithm
GPSA	Genelleştirilmiş Model Arama Algoritması – Generalized Pattern Search Algorithm
GA/GPSA	Genetik Algoritma (GA)/ Genelleştirilmiş Model Algoritması (GPSA) Hibrit Algoritması
KKK	Karbon-Karbon Kompozitler
KLT	Klasik Laminasyon Teorisi
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
MgO	Magnezyum Oksit
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
SiC	Silikon Karbür
Si₃N₄	Silikon Nitrür
TiB₂	Titanyum Diborür
TiC	Titanyum Karbür

1. GİRİŞ

Teknoloji ve bilim insanlığın var olduğu günden bugüne kadar sürekli gelişmiştir. Teknik ilerlemeler sayesinde, havacılık, uzay, otomotiv başta olmak üzere birçok mühendislik uygulaması bundan etkilenmiştir. Bu uygulama alanlarında genellikle kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda meydana gelen gelişmeler, yeni ve alternatif malzeme kullanımı ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda günümüzde boyutsal kararlı kompozit malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler çevreden gelen etkilere maruz bırakıldıklarında uyarlanabilirlik özellikleri sayesinde geometrik yapılarında çok küçük değişimler olduğu için boyutsal kararlılık ihtiyacını karşılayacak en iyi potansiyele sahiptir. Boyutsal kararlı hale gelebilmek için, önemli özellikler arasında ısı genleşme katsayısı ve nem genleşme katsayısı bulunmaktadır. Isıl genleşme katsayısı parametresi mühendislik yöntem ve yapılarında dikkat edilmesi gereken bir parametre olup, kullanılan malzemelerin boyutsal özelliklerini ciddi biçimde değiştirmektedir. Kullanılan malzemeler üzerinde yanlış uygulanması ya da uygulanmaması durumunda, malzemenin mekanik özelliklerinde istenmeyen değişiklikler olmaktadır. Bu nedenle bu tip problemleri azaltabilmek hatta tamamen çözebilmek için araştırmacılar yeni çözüm yolları aramaktadır.

Tablo 1.1'de Kompozit malzemelerin kullanıldığı mühendislik uygulamalarının farklı tasarım amaçları kategoriler halinde ifade edilmiştir.

Tabloda, kompozit malzemelerin uygulama alanına bakıldığında dikkat edilmesi gereken beş farklı tasarım amacı ve gereksinimleri ifade edilmiştir. Bu tasarım amaçları rijitlik, kuvvet, dinamik kontrol ve kararlılık, hasar toleransıdır ve boyutsal kararlılık da bu tasarımlardan biridir. Uzaydaki uydular ve güneş reflektörleri kullanıldıkları ortam koşullarından dolayı farklı termal yüklemelere maruz kalmaktadır. Bu sebeple bu uygulama alanlarına düşük termal ve nem genleşme katsayısına sahip, aynı zamanda mümkün olan en yüksek sertliği (elastisite modülleri) sağlayan karbon fiber, grafit fiber ve kevlar fiber gibi önemli kompozit malzemeler genellikle tercih edilmelidir.

Tablo 1.1. Kompozit malzemelerin kullanıldığı mühendislik uygulamalarının farklı tasarım amaçları (Daniel ve Ishai, 1994)

Tasarımın amacı	Gereksinimler	Malzemeler	Uygulamalar
Rijitlik	Küçük Sapma	Karbon fiber Kompozit	Gemiler
	Yüksek Burkulma Yüğü	Kevlar fiber Kompozit	Spor Malzemeleri
	Yüksek Eğilme Rijitliği	Boron fiber Kompozit	Denizaltı
Kuvvet	Düşük Ağırlık		
	Yüksek yük kapasitesi	Karbon fiber Kompozit	Mafsallı Makaslar
	Düşük ağırlık	Kevlar fiber Kompozit	Basınçlı Kaplar
Dinamik kontrol ve kararlılık	Yüksek katmanlar arası mukavemet	S-cam fiber kompozit	
	Uzun yorulma ömrü	Karbon, grafit fiber	Mafsallı makaslar
	Yüksek rezonans frekansı	Termoplastik matris	Basınçlı kaplar
Boyutsal kararlılık	Düşük termal ve nem genleşme katsayısı	Karbon fiber kompozit	Uzaydaki uydular
	Yüksek sertlik (E_x , E_y)	Kevlar fiber kompozit	Güneş reflektörleri
		Grafit fiber kompozit	
Hasar toleransı	Yüksek darbe dayanımı	Sert epoksi matris	Balistik zırh
	Yüksek kırılma tokluğu	Termoplastik matris	Darbeye dayanıklı yapılar
	Enerji emici ara katmanlar		

1.1. Literatür Araştırması

Literatürde boyutsal kararlılıkla ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur. Örneğin; Le Riche ve Gaudin (1998)'de yayınlanan makalesinde, düşük termal genleşme ve nem genleşme katsayısı, yüksek sertlik gibi parametreler kullanılarak, kompozit plakların düzlem içi tasarım probleminde yeni bir yaklaşım modeli getirilmiştir. Tasarımda doğal matrisli ve metal matrisli kompozit plakalar kullanılmıştır. Bununla birlikte bu kompozitlerin boyutsal kararlı olabilmesi için, stokastik arama algoritmalarında içerisinde yer alan Monta Carlo Algoritma yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, boyutsal kararlılık optimizasyonunda, metal matrisli kompozit malzemelerin ise nem ve ısı genleşme katsayılarına ait düzlem içi fiber açısı diziliminin doğal matrisli kompozitlerin fiber açısı dizilimine göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu çalışma, kompozit malzemelerin boyutsal kararlı olabilmesi yapılan/yapılacak olan daha birçok araştırmaya yol gösterebilecek öneme sahiptir.

İlerleyen yıllarda da yine bu tasarım çalışması ele alınmış ve higrotermal artık gerilmelerin kompozit plakaların optimum tasarımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Khalil vd., 2001). Kullanılan kompozit plakaların açılı tasarımları, çapraz tabakalı, açılı ve yarı-izotropik plakalar olarak seçilmiştir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar içerisinde seçilen laminatlar farklı mekanik ve hidrotermal yüklere maruz bırakılmıştır. Kullanılan her malzemenin nem alma kapasitesi karşılaştırılmıştır. Zhu ve Sun (2003) yapmış olduğu çalışmada, tasarım için seçilen karbon/epoksi kompozit malzemenin fiber açılı dizilimi ve bazı malzeme özelliklerinin termal genleşme katsayısı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde düzlem kayma modülünün (G_{12}) 'nin Young modülüne (E_1) oranının baskın olduğu görülmüştür. Termal genleşme katsayısının işaretini ve büyüklüğünü belirleyen parametre olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte çalışmada seçilen kompozit laminatın fiber açılı dizilimleri için x yönünde negatif termal genleşmelerin mümkün olduğu görülmüştür. Bressan vd. (2004) 'de yapmış olduğu çalışmada, boyutsal kararlılık kavramını ele almak için kompozit plakalarda düşük termal genleşme katsayısına sahip karbon-epoksi malzemesini seçerek düzmem içi tasarım problemini ele almıştır. Termal genleşme katsayısının belirsizlik aralığını minimum hale dönüştürebilmek için klasik laminasyon teorisi kullanılmıştır. Bu çalışmada düşük termal genleşme ile karakterize edilen kompozit plakaların üretim maliyetlerini azaltan plaka bileşenlerin tasarımı incelenmiştir. Diaconu vd. (2003) 'de yayınladıkları çalışmada, kompozit plakaların eğilme gerilmesi araştırılmıştır. Bu plakaların içyapısı ve çevresel koşulları (nem, sıcaklık gibi) tasarıma etki ettirilmiş olup, bu bağlamda kompozit plakalarda oluşan eğilme gerilmeleri matematiksel programlama yöntemleri kullanılarak en aza indirilmiştir. İlerleyen birkaç on yılda da teknolojinin gelişmesine paralel olarak kompozit malzemelerin boyutsal kararlılık sorununu en uygun seviyeye ulaştıracak tasarım problemini Aydın ve Artem (2010)'da yayınladıkları makalesinde ele almıştır. Bu çalışmada, tasarım modelinin optimal hale gelebilmesi için lamine kompozitleri fiber takviyeli, simetrik-dengeli ve çok amaçlı olarak seçilmiştir. Stokastik optimizasyon yöntemleri içerisinde yer alan genetik algoritma kullanılmıştır. Kompozit malzeme olarak karbon/epoksi seçilmiştir. Termal genleşme katsayısı minimize edilmiş ve aynı zamanda Young modülü (E_1) maksimize edilmiştir. Aydın ve Artem (2011)'de yayınladıkları diğer bir çalışmada ifade ettiklerine göre, tasarımda düşük termal genleşme katsayısına sahip olan en uygun kompozit malzeme seçilmiştir.

Çok amaçlı genetik algoritma, genetik algoritma ve genelleştirilmiş model arama ve benzetilmiş tavlama algoritmaları üç farklı stokastik optimizasyon yöntemi olarak sırasıyla kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, lamine kompozit plakaları düşük termal genleşme katsayısına ve yüksek elastik modülüne haline getirecek uygun fiber açılı dizini tasarlanmıştır. Aydın vd. (2016) daha sonraki bir çalışmada, boyutsal kararlılığa ulaşabilmek için yüksek rijitlik, düşük termal ve nem genleşme katsayısına sahip olan kompozit plakaların optimizasyonu yapılarak en uygun fiber açılı tasarım modeli belirlenmiştir. Optimizasyonda genetik algoritma, benzetilmiş tavlama ve genelleştirilmiş model arama yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda optimum fiber açılı oryantasyonuna sahip kompozit plakalar elde edilmiştir.

Literatüre bakıldığında, kompozit plakaların tasarım problemlerinde hibritleme prosesi temel alınarak, birçok araştırma yapılmıştır. Bu proses birden fazla fiber ya da matris malzemesine sahip olacak şekilde kompozit malzemenin tasarlanmasını içermektedir. Örneğin; Adalı ve Duffy (1992)'de yayınladığı makalede, hibritleme prosesini kullanarak malzeme maliyetini en aza indirmeyi amaçlayacak bir tasarım modeli geliştirmiştir. Kompozit plaka olarak, sandviç tipi hibrit modeli seçilmiştir. Bu modelde, iç katmanı düşük sertlikte fiber, dış katmanı ise yüksek sertlikte fiber kompozit malzeme olarak dizayn edilmiştir. Bununla birlikte, maliyet etkilerini daha da geliştirmek için elyaf yönlerine göre optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda kompozit laminat malzemenin en uygun maliyetle sahip tasarımı oluşturulmuştur. Zhang vd.(1996)'da yayınladıkları makalede, havacılıkta kullanılan hibrit kompozitlerin termal genleşme katsayılarını ve mekanik özelliklerini tahmin etmek bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Boyutsal kararlılık optimizasyonu sonucunda hem sıfır termal genleşme katsayısına sahip hibrit kompozitlerin optimal tasarımı hem de herhangi bir termal genleşme katsayısına sahip hibrit kompozit plakaların optimum tasarımı bulunmuştur. Bu çalışmada kullanılan hibrit kompozit malzemelerin sadece havacılık uygulamalarında değil aynı zamanda uzay yapılarında da kullanılabileceği tespit edilmiştir. Adalı ve Verjienko (2001)' de yayınladıkları makalede, yüksek sertlikte yüzey ve düşük sertlikteki katmanlarından oluşan hibrit simetrik lamine kompozit plakaların optimum fiber dizisi tasarım modeli incelenmiştir. Bununla birlikte tasarım, doğrusal bir optimizasyon yöntemiyle çözülmüştür. Tasarımda hibritleme prosesinin etkisi başta olmak üzere fiber yönü oranı

gibi daha birçok önemli parametreleri araştırılmıştır. Abachizadeh ve Tahani (2007) ‘de yaptıkları çalışmada, hibritleme prosesi uygulanacak olan laminatın hafifliği ve minimum maliyeti sağlayacak malzemeler (cam/epoksi ve grafit epoksi) seçilmiştir. Bununla birlikte karınca kolonisi optimizasyonu kullanarak, çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımıyla minimum ağırlık ve maliyet elde edecek bir tasarım elde edilmiştir. Baier vd. (2008)’de yayınlanan makalelerinde, hibrit malzeme bileşeni optimizasyonu ve tasarım modeli sorununu ele almıştır. Seçilen hibrit malzemenin yapısal ve termo-elastik uyumsuzluklar gibi malzemenin davranışındaki etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte evrimsel strateji algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. Kullanılan hibrit kompozit malzemelerin uydu ekipmanlarında minimum kütle ve yüksek rezonans açısından optimal olduğu tespit edilmiştir. Abachizadeh ve Tahani ’nin bir diğer çalışmasında, simetrik hibrit laminat kompozitlerin optimal tasarımı yine karınca kolonisi optimizasyonu ile açıklamıştır. Hibritleme sürecinde, literatürdeki verilere dayanarak malzemeyi hafifletmek ve temel frekansı uygun seviyede tutabilmek adına, karınca kolonisi optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar, genetik algoritma (GA) ve benzetilmiş tavlama ile karşılaştırılmıştır. Tasarım değişkeni olarak laminatın iç ve dış katmanı oluşturan yüksek ve düşük sertlikte malzeme (cam/epoksi ve grafit epoksi) seçilmiştir. Bununla birlikte fiber yönündeki en ve boy oranına sahip en uygun istifleme dizisi oluşturulmuştur. Bu çalışmada malzemenin ağırlığı azaltmak ve temel frekansı uygun bir seviyede tutmak için hibritleme prosesinin etkin özelliği gösterilmiştir (Abachizadeh ve Tahani,2009). Aydın ve Savran (2019) ‘da yaptığı çalışmada, keten lif yapılı doğal kompozit malzemede belirlenen tasarım sorununa göre göre hibritleme prosesinin kompozit plakanın doğal frekansı, maliyeti ve ağırlığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda kompozit laminat yapıdaki fiber açı dizilimi geliştirilmiş benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda hibritleme prosesi kullanılarak laminatların maksimum doğal frekansa ve buna paralel olarak uygun maliyet ve hafifliğe ulaşılabildiği görülmüştür. Aydın ve Savran (2021) ‘de hibritleme prosesinden yararlanarak oluşturdukları tasarım problemini tekrar kullanarak yayınladıkları bu çalışmada ise, değişen en boy oranı ve simetrik–dengeli formda grafit-keten/epoksi ve grafit-cam/epoksi hibrit kompozit plakaların tasarım problemi ele alınmaktadır. Bu tasarımda tabakalı kompozit plakaların optimum fiber açı dilimi araştırılmıştır. Bununla birlikte diğer çalışmadan farklı olarak tek ve çok amaçlı

optimizasyon yaklaşımını aynı anda kullanarak kompozit plakanın doğal frekansı, maliyeti ve hafifliğinin uygun değer aralığında olup olmadığı incelenmiştir. Bu çalışmada optimum grafit-keten/epoksi hibrit kompozit plakanın, maksimum temel frekans ve minimum maliyet açısından grafit-cam/epoksi göre hibrit kompozit plakaya göre daha iyi bir sonuç verdiği göstermektedir. Literatürdeki çalışmalara bakılarak, hibrit kompozit plakların optimal tasarımına yardımcı olmak için, tasarımlarda kullanılan malzemelerin boyutsal kararlı halde olması, hafif ve maliyetinin düşük olması gibi bir çok önemli özellik daha verimli hale getirilmiştir (Larissa vd., 2014).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada boyutsal kararlı optimum kompozit plaka tasarımı için fiber istifleme dizini tasarımı ve optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Farklı tabaka kalınlığına sahip simetrik ve simetrik dengeli kompozit plakalar göz önünde bulundurulmaktadır. Fiber oryantasyon açıları tasarım değişkenleri olarak alınmıştır.

Buna göre tezin amacı şu şekilde sıralanabilir:

1. Fiber ve matris yönlerinde düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek elastisite modülünü sağlayan, 12 ve 16 tabakalı karbon/epoksi kompozit laminatlar için optimum fiber açı dizilimine sahip tasarımlar elde etmek.
2. Düşük termal genleşme katsayısına sahip, simetrik 16 tabakalı, sekiz farklı kompozit plakanın (aramid/ Epoksi, as4/ Epoksi, boron/ Epoksi, eglass/ Epoksi, im6/Epoksi, gy70/Epoksi, kevlar49/ Epoksi ve spektra/ Epoksi) $[A/B]_{45}$ ve $[4A/4B]_{45}$ hibrit tasarım modeline göre optimum fiber açı dizilimine sahip tasarımlar elde etmek.
3. $[A/B]_{45}$ hibrit tasarım modelleri ile $[4A/4B]_{45}$ tasarım modellerine ait fiber açı dizi optimizasyonlarını karşılaştırmak. Ayrıca hibrit olmayan tasarım modelleri ile tüm hibrit tasarım modellerine ait fiber açı dizi optimizasyonlarını karşılaştırmak.
4. Matlab Toolbox programında hibrit olmayan ve hibrit tabakalı kompozitlerin boyutsal kararlılık optimizasyonunu GA/GPSA hibrit algoritması yöntemiyle çözmek.
5. Tüm tasarım modelleri içerisinde optimum boyutsal kararlı tasarımlar seçilerek, belirli sıcaklık değişimleri altında boyutsal kararlılık performanslarının Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar teorileri ile güvenli bölgede kalıp kalmadığını araştırmak.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Giriş

Kompozit malzemelerin birçok tanımı olabilir. Genel anlamda tanımı, mikroskopik düzeyde bir araya getirilmiş ve birbiri içinde çözünmeyen en az iki veya daha fazla bileşenden oluşmuş yapılardır. Bu bileşenler matris ve takviye elemanı olarak adlandırılır (Kaw, 2006). Takviye elemanının malzemesi fiber, parçacık, ince levha veya pul şeklinde olabilir. Matris malzemeleri genellikle sürekli dir. Bu iki önemli parametre mühendislik başta olmak üzere birçok uygulama alanında muazzam bir konuma sahiptir. Kompozit malzemelerin kullanım alanı ise eski çağlardan beri yüzyıllardır devam etmektedir. Şekil 2.1’de eski çağlarda kullanılan kompozit malzemeler gösterilmektedir. Örneğin, eski Mısırlı işçiler, yapısal bütünlüklerini geliştirmek için piramitlerin inşası sırasında tuğlalarda doğranmış saman kullandılar. Yine Mısırlılar evlerini yapmak için bambu ile takviye edilmiş çamur kullandılar (Kaw, 2006). Eskimolar soğuktan donmamak için güçlü buz evlerinde yosun kullandı. Japon Samuray savaşçıları, kılıçlarını döverken çok katmanlı metalleri kullandılar. Günümüzde modern kompozit malzemelerin kullanımının ise İkinci Dünya Savaşı sırasında polimer matris içerikli cam elyafın kullanılmasıyla başladığı söylenebilir. 20. yüzyılda binaların ana unsuru olan inşaat çimentoya inşaat demiri yerleştirildi. Böylece iyi bilinen bir kompozit malzeme, yani betonarme üretildi (Vinson ve Sierakowski, 2004).



Şekil 2.1. Eski çağlarda kullanılan kompozit malzemeler (İnternet, 2021)

Geleneksel malzemeler bugün hala birçok alanda kullanılmasına rağmen, kompozit malzemeler birçok alanda üstün özellik taşımaktadır Tablo 2.1’de geleneksel olarak kullanılan malzemeler (çelik, alüminyum, vb.) ile fiber takviyeli kompozit malzemeler (grafit/epoksi, cam epoksi, vd.) arasındaki özellikleri karşılaştırılır.

Tablo 2.1. Fiberlerin, epoksi matrisli kompozitlerin ve dökme metallerin young modülü ve özgül mukavemet değerleri (Kaw, 2006)

Malzeme Birimleri	Özgül yoğunluk	Young modülü (GPa)	Maksimum kuvvet (MPa)	Özgül modül (GPa-m ³ /kg)	Özgül Mukavemet (MPa-m ³ /kg)
Grafit fiber	1,8	230,00	2067	0,1278	1,148
Aramid fiber	1,4	124,00	1379	0,08857	0,9850
Cam fiber	2,5	85,00	1550	0,0340	0,6200
Tek yönlü grafit/epoksi	1,6	181,00	1500	0,1131	0,9377
Tek yönlü cam/epoksi	1,8	38,60	1062	0,02144	0,5900
Çapraz kat Grafit/epoksi	1,6	95,98	373,0	0,06000	0,2331
Çapraz kat Cam/epoksi	1,8	23,58	88,25	0,01310	0,0490
Yarı izotropik grafit/epoksi	1,6	69,64	276,48	0,04353	0,1728
Yarı izotropik cam/epoksi	1,8	18,96	73,08	0,01053	0,0406
Çelik	7,8	206,84	648,1	0,02652	0,08309
Alüminyum	2,6	68,95	275,8	0,02652	0,1061

Fiber takviyeli kompozitler özellikle yüksek sıcaklık aralığında kullanıldığı için boyutsal kararlılık performanslarının daha iyi bir seviyede olması beklenir. Bu durum kompozit malzemelerin metallere oranla düşük termal genişleme katsayısı – coefficient of thermal expansion (CTE) değerlerine sahip olduğunda söz konusudur. Örneğin, sıklıkla kullanılan elektronik bileşenlerde (pil, motorlar, devre kesiciler vd.) fiber takviyeli kompozitlerin metallere göre daha avantajlı olduğu görülmektedir (Mallick, 2007).

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

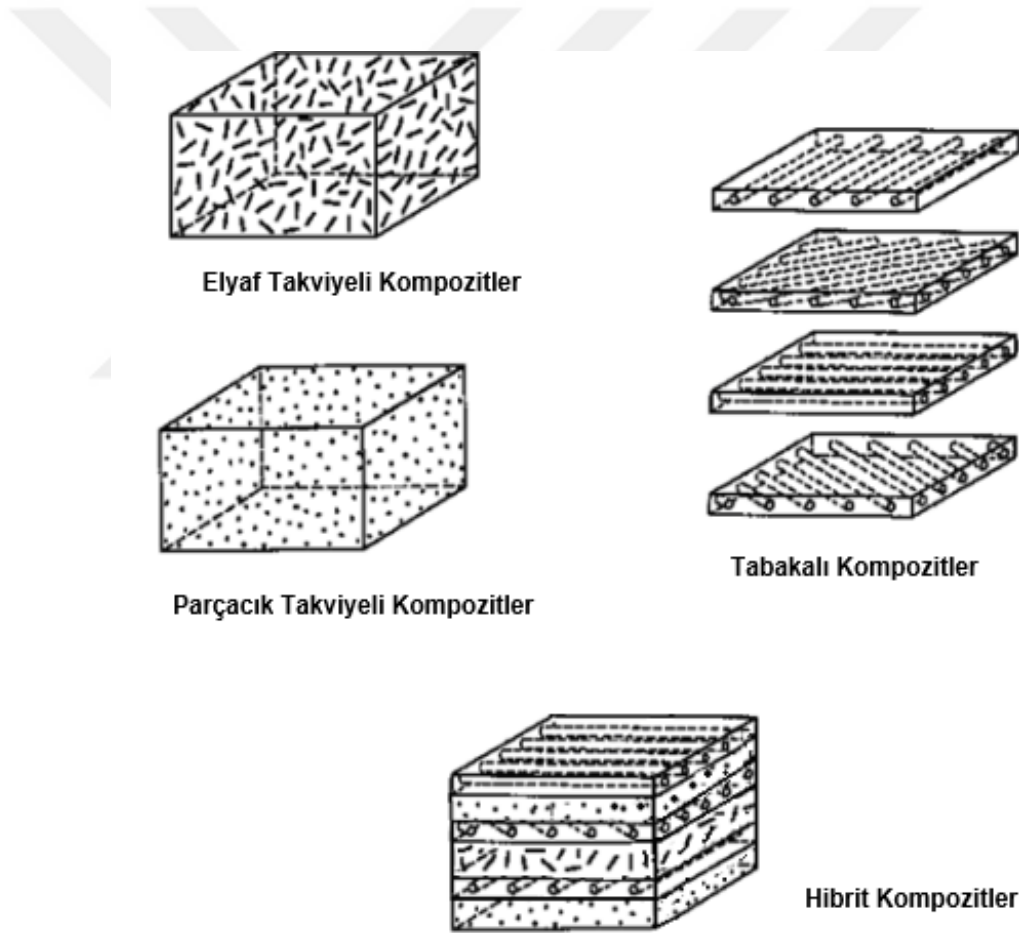
Kompozit malzemeler takviye geometrisi veya matris türüne göre sınıflandırılır (Kaw, 2006). Takviye türüne göre elyaf, parçacıklı, tabakalı ve hibrit olarak; matris yani dolgu elemanı türüne göre polimer, metal, karbon ve seramik olarak sınıflandırılabilir. Takviye elemanı, matris malzemesinin amacına uygun olarak mevcut konumundaki özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır (Kısasöz, 2018). Şekil 2.2’de kompozit malzemelerin takviye türüne göre çeşitleri gösterilmiştir.

Bu takviye elemanları sırasıyla tanımlanacak olursa;

Elyaf (lif) takviyeli kompozitler, en yaygın kullanım alanına sahip kompozitlerdir. Birçok teknolojik tasarımda kullanılmasının amacı, minimum ağırlıkta olup, aynı zamanda maksimum dayanıma ve/veya maksimum elastiklik modülü sahip olmalarıdır. Bununla birlikte bu kompozitlerin, uzun veya kısa boyutlarda olması da mekanik performansını etkilemektedir. Elyafın boyu uzadıkça dayanım ve rijitliği belirgin şekilde artar. Elyafın çok kısa olması halinde dayanımda belirgin bir artış sağlamamaktadır (Callister, Rethwisch, 2006). Parçacık takviyeli kompozitler, matris malzeme yapısının içinde başka bir malzemenin parçacıklar formunda bulunmasıdır. Bu parçacıklar rastgele biçimde dağıldığı için izotop yapıdadır. Bu kompozitler üstün mukavemet özellikleri ve yüksek çalışma ortam sıcaklığı gibi daha birçok avantaja sahiptir (Kaw, 2006). Tabakalı kompozitler, farklı kombinasyonlarda ve özellikteki iki veya daha fazla laminanın birleşmesiyle oluşur. Geleneksel metallerle kıyaslandığında bu kompozitler daha mukavim, bununla birlikte ısıya ve neme de daha dayanıklı oldukları için uygulamada büyük avantaj sağlamaktadır (Kayrak, 1999). Hibrit laminatlar genellikle birden fazla tipte dolgu ve/veya birden fazla tip matris içeren kompozitleri ifade eder. Geleneksel kompozitlerin özelliklerini daha da iyileştirmek ve/veya maliyetini düşürmek için yaygın olarak kullanılırlar. (Chung, 1994)

Hibrit laminatların kendi içerisinde kullanım amacına dört ana gruba ayrılmıştır. Tabaklar arası hibrit laminatlar, genelde otomotiv sanayisinde tampon kısmında burkulma rijitliği ve sertliği sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu yapıda amaç iki veya daha fazla farklı malzeme ile istenilen özellikleri en iyi forma dönüştürebilmektir. İkincisi, tabaka içi hibrit laminatlar aynı tabaka içerisinde olup, yapı içerisinde iki veya daha fazla türden fiber

bulundurmaktadır. Bu kompozitlerin yaygın kullanım alanından biri golf sopalarıdır. Tabaka içi hibrit laminatların golf sopalarında kullanılma amacı burulma rijitliği ve tokluk sağlayarak topu daha ileri noktalara savurmayı sağlamaktır. Diğer bir yapı ise bu iki yapının bileşimi olan tabakalar arası hibrit laminatlar-tabaka içi hibrit laminatlar ise kompozit sanayi sektöründe birçok uygulama alanında kullanılmaktadır (Kaw, 2006). Bu laminat yapının kullanım amacı, iki veya daha fazla türden fiberi birden fazla tabaka içerisinde kullanıp farklı tabaka içerisinde farklı kompozit sistemi oluşturmaktır. Son olarak reçine hibrit laminatların yapısına bakıldığında iki veya daha fazla reçinenin bir araya gelmesiyle oluşur (Sheppard, 1986).



Şekil 2.2. Takviye formuna dayalı kompozit türleri (Jones ve R.M, 1999; Koruvatan, 2008)

Kompozit malzemelerin matris türüne göre sınıflandırılması dikkate alındığında günümüz piyasasında en yaygın olarak kullanılan kompozitlerden biri; karbon, grafit ve kevlar gibi elyaf malzemeyle takviye edilmiş polimerlere (epoksi, polyester, vd.) sahip olan polimer matris tabanlı kompozit (PMK)' lerdir (Aydın, 2011). Tablo 2.2'de polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri gösterilmektedir. Polimer matrisli kompozitler; yüksek mukavemet, düşük maliyet, darbe dayanım özellikleri ve aşınma dayanımı gibi avantajlı özelliklere sahip bir kompozit çeşididir. Bununla birlikte, tenis raketlerinden uzay mekiğine kadar çeşitli uygulama alanına sahiptir.

Tablo 2.2. Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri (Kaw, 2006)

Özellik	Birim	Grafit	Aramid	Cam	Çelik	Alüminyum
Özgül ağırlık	-	1,8	1,4	2,5	7,8	2,6
Young modülü	GPa	230	124	85	206,8	68,95
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	2067	1379	1550	648,1	275,8
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m/m/}^{\circ}\text{C}$	-1.3	-5	5	11.7	23

Diğer önemli kompozitlerden biri metal matrisli kompozitler (MMK)'dir. Bu kompozitlerin matris malzemesi içeriğinde, çeşitli metal(alüminyum, magnezyum, titanyum, demir, silisyum, vd.) ve alaşımlar kullanılır (İbrahim vd., 1991). Bu kompozit malzemeler, geleneksel metallerle karşılaştırıldığında daha yüksek sıcaklıklarda kullanılır. Ayrıca malzemeye rijitlik, dayanım ve ısı iletkenlik gibi özellikleri iyileştirmektedir. Tablo 2.3'te yaygın kullanım alanına sahip metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri ifade edilmektedir. Tablo 'da edilen malzemelere ek olarak silikon karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür(B_4C), titanyum diborür (TiB_2), titanyum karbür(TiC), magnezyum oksit (MgO) ve karbon esaslı malzemeler gibi malzemeler de takviye elemanı olarak metal matrislerde kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitlere kıyaslandığında, yüksek dayanım, yüksek aşınma direnci, düşük ısı genleşme katsayısı gibi daha karakteristik özelliklere sahiptir.

Tablo 2.3. Metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri (Kaw, 2006)

Özellik	Birim	SiC/ alüminyum	Grafit/ alüminyum	Çelik	Alüminyum
Özgül ağırlık	-	2,6	2,2	7,8	2,6
Young modülü	GPa	117,2	124,1	206,8	68,95
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	1206	448,2	648,1	234,40
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$	12,4	18	11,7	23

Matris türüne göre bir başka kompozit türü ise seramik matrisli kompozit (SMK)'lerdir. Tablo 2.4'te bu kompozit malzemeler için mekanik özellikler gösterilmiştir. Takviye elemanı olarak genellikle alüminyum oksit (Al_2O_3), silikon karbür (SiC) ve silikon nitrür (Si_3N_4) kullanılmaktadır (Kaw, 2006). Seramik matrisli kompozitler bazı uygulama alanlarında metal matris kompozitlerin yerine kullanılır. Düşük yoğunlukları sayesinde daha hafiflerdir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmasının sebebi ise yüksek oksidasyon direncine sahip olmalarıdır (Kalemtaş, 2014). Bu malzemeler yapıları gereği kırılgan oldukları için yüksek sıcaklık mukavemeti ve aşınma direnci gibi karakteristik pek çok özellik bakımından diğer malzemelere kıyasla geride kalmaktadır. Örneğin; havacılık uygulamaları, uzay uygulamaları gibi alanlarda çevresel koşullardan kaynaklı olarak kullanım alanları sınırlıdır.

Tablo 2.4. Seramik matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri (Kaw, 2006)

Özellik	Birim	SiC/LAS	SiC/CAS	Çelik	Alüminyum
Özgül ağırlık	-	2,1	2,5	7,8	2,6
Young modülü	GPa	89,63	121	206,8	68,95
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	496,4	400	648,1	234,40
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$	3,6	4,5	11,7	23

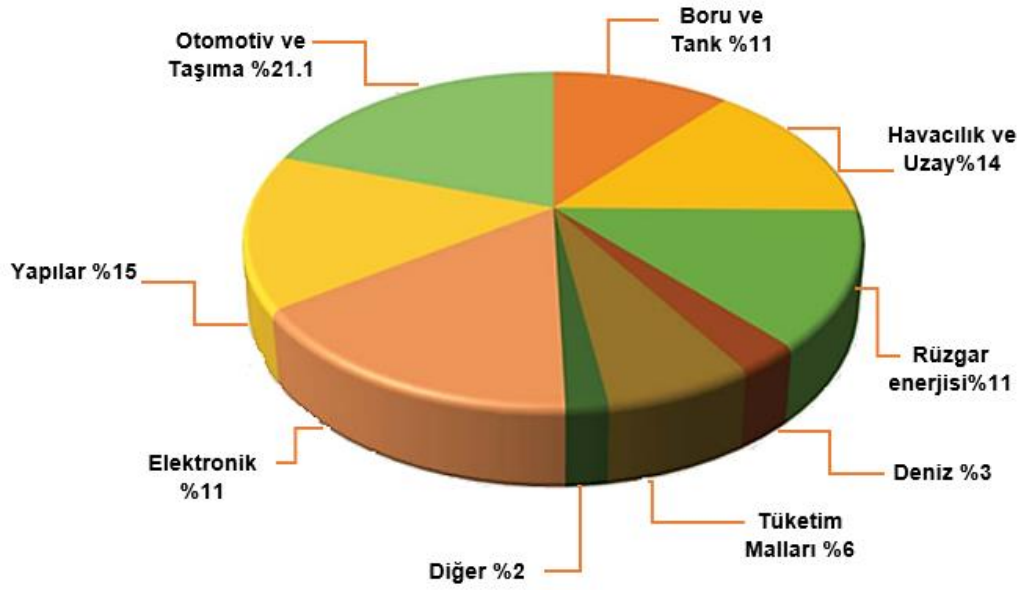
Matris türüne göre karbon-karbon kompozitler (KKK) de piyasada genellikle kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak yapının adından da anlaşılacağı üzere karbon esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Tablo 2.5'te ifade edilen malzemelerin mekanik özellikleri gösterilmiştir. Seramik matris kompozitler gibi kırılğan ve hasara karşı duyarlıdırlar. Bunun yanında yüksek sıcaklıklara dayanma, çekme ve basma dayanımının iyi olması, termal iletkenlik gibi üstün özellikler sağlayarak kullanım yerine göre avantaj sağlarlar. Örnek olarak uzay mekiği burnunda ve uçak frenlerinde ani oluşan yüksek sıcaklıklara karşı en çok kullanılan malzemedir.

Tablo 2.5. Karbon-karbon matris kompozitlerin mekanik özellikleri (Kaw, 2006)

Özellik	Birim	C-C	Çelik	Alüminyum
Özgül ağırlık	-	16,8	7,8	2,6
Young modülü	GPa	13,5	206,8	68,95
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	35,7	648,1	234,4
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m/m}^{\circ}\text{C}$	2,0	11,7	23

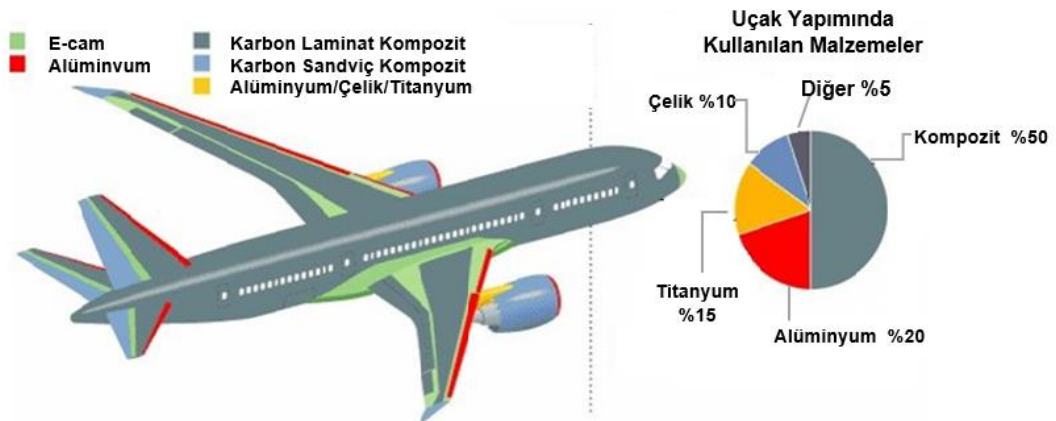
2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Günümüzde kompozit malzemeler, düşük maliyet, hafiflik ve mukavemet gibi önemli özellikleri sayesinde birçok alanda öncül malzeme olarak artan şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler yaygın olarak uzay, havacılık, otomotiv, gemi, spor malzemeleri, medikal sanayi ve askeri sanayi gibi ağırlığın kritik olduğu sektörlerde metallerin yerine kullanılmaya başlanmıştır (Mallick, 2007). Dünya genelinde kompozit malzemeleri 2019 yılı sevkiyat dağılımı Şekil 2.3'te gösterilmektedir (Ali vd., 2021). Buna göre kompozit malzemelerin en çok kullanıldığı alanlar sırasıyla otomotiv-taşıma, yapı, elektronik, havacılık ve uzay sektörleridir.



Şekil 2.3. Dünya genelinde kompozit Malzemelerin 2019 yılı sevkiyat dağılımı

Karbon, aramid gibi kompozit malzemeler diğer malzemelerden daha pahalı oldukları için özel uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Örneğin, askeri ve ticari uçaklarda bu malzemelerin tercih edilme sebebi hem hafif hem de dayanıklı olmalarıdır. Bu tür uçakların tasarımı en hafif olursa yakıttan da o kadar tasarruf edilir. Şekil 2.4, Boeing 787 uçağının çeşitli bileşenlerinde kompozit malzemelerin kullanımını göstermektedir. Uçağın yapımında kullanılan malzemeler daire grafiğinde gösterilmiştir. Kompozitlerin kullanılan malzemelerin yarısını oluşturmasıyla uçağın ağırlığının en aza indirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.4. Boeing 787’de çeşitli malzemelerin kullanımı (Katunin vd., 2017; Rosato, 2013)

Karbon fiberler ilk olarak 1970'li yıllarda endüstride kullanılmıştır. Günümüzde de bu malzeme, uçakların kanat, kuyruk ve gövde bileşenleri ana malzeme olarak kullanılmıştır. Bileşenin yapısal bütünlüğü ve dayanıklılığı, performanslarına ve diğer yapısal uçak bileşenlerinin gelişimine olan güveni artırmıştır, bu nedenle askeri uçaklarda artan miktarda kompozit malzeme kullanılmaktadır (Mallick, 2007).

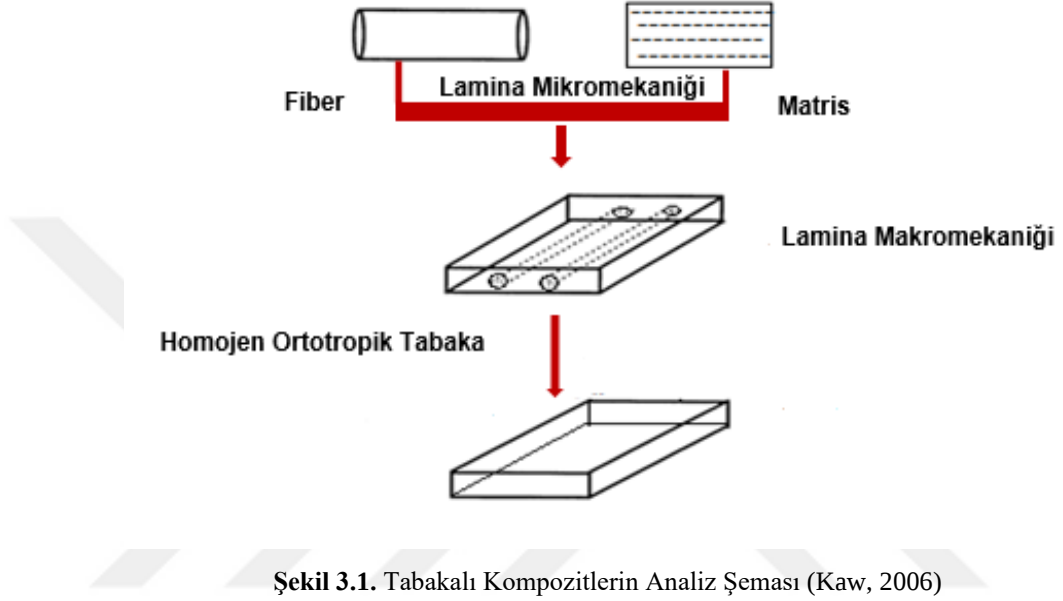
Kompozit malzemelerin dünya piyasasında ikincil olarak en yaygın uygulama alanı ise otomotiv endüstrisidir (Bkz. Şekil 2.3). Bu malzemelerin otomobiller ve diğer tüm ticari araçların yapımında kullanılma amacı daha hafif olması ile birlikte daha az benzine ihtiyaç duyulmasıdır. Örneğin; pahalı sınıf araçlar için kompozit tahrik milleri ve minimum kayma ile üstün çekiş sağlayan manuel vites mil sistemleri için karbon fiber/epoksi laminat debriyaj diskleri kullanılmıştır. Tır araç endüstrisi, 1970'lerde kaynaklı çelik bileşenleri, kalıplanmış davlumbazlar, çatılar ve diğer gövde parçaları yerine kompozit malzemeler kullanılmaya başlandı. Bugün tüm tır araç üreticileri ağırlık azaltmak için tasarımlarında kompozit kullanıyor (Vinson, 1986). Şekil 2.5'te orta sınıf bir araçta doğal, cam ve karbon elyaftan yapılmış parçalara ait birkaç örnek model gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Orta Sınıf Bir Araçta Doğal, Cam, Karbon Elyaftan Yapılmış Parçalara Örnekler (Gülmez, 2018)

3. KOMPOZİT MALZEME MEKANİĞİ

Kompozit malzemelerin mekanik analizi Şekil 3.1’de gösterildiği gibi iki ana grupta incelenebilir: (i) mikromekanik analiz ve (ii) makromekanik analiz. Bu iki analiz sırasıyla aşağıda tanımlanmıştır.



Mikromekanik: Bileşen malzemelerin tek tek özelliklerinden mikroskobik düzeyde yararlanılarak kompozit tabakanın rijitlik, mukavemet ve ısı genleşme katsayısı gibi ortalama malzeme özelliklerini inceler.

Makromekanik: Tabakaların homojen olduğu varsayılarak, makroskopik düzeyde ortalama malzeme özelliklerini inceler (Kaw, 2006).

3.1. Klasik Laminasyon Teorisi

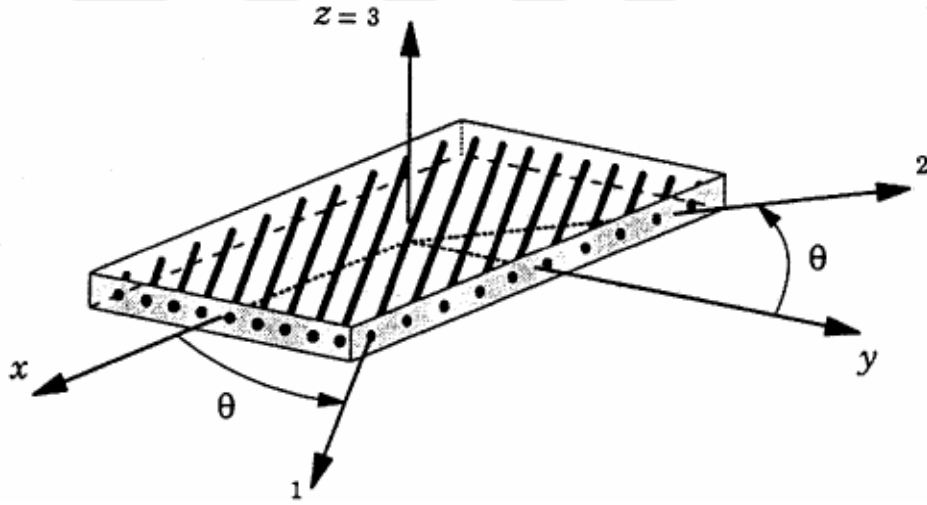
Klasik laminasyon teorisi (KLT) ince tabakalı kompozitlerin mekanik analizlerini belirler.

Bu teoriye göre aşağıdaki varsayımlar esas alınır :

- ✓ Kompozit plakayı oluşturan her lamina homojen ve ortotropiktir.
- ✓ Lamina kompozit çok ince bir yapıdadır ve plaka kalınlığı kenar boyutlarına oranla daha küçüktür.

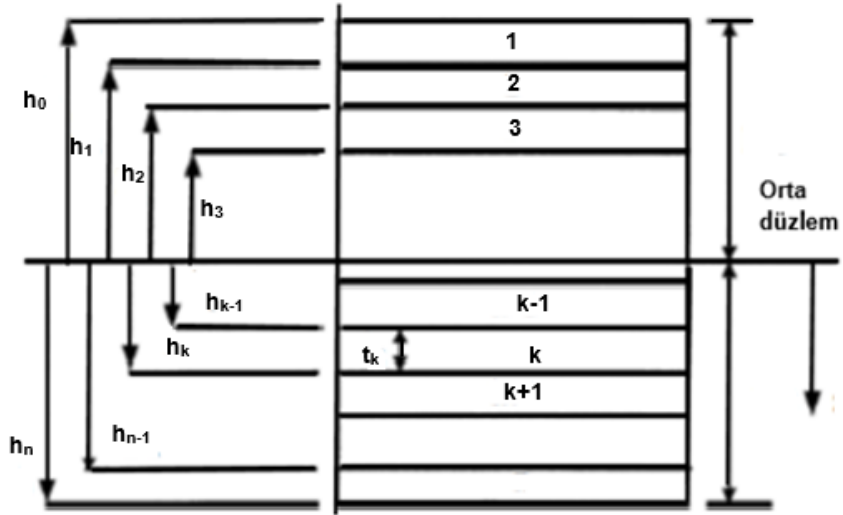
- ✓ Her lamina elastiktir ve birbirini sınırlandırır.
- ✓ Enine kayma şekil değiştirmeleri (γ_{xz} ve γ_{yz}), doğrusal olduğu için ihmal edilebilir.
- ✓ Tüm yer değiştirmeler kompozit plakanın kalınlığına kıyasla çok küçüktür ve bu plaka süreklidir.
- ✓ Kompozit plakayı oluşturan tabakaların ara yüzleri arasında kayma yoktur.

Şekil 3.2.'de global ve lokal koordinatları belirtilen bir tabakalı kompozit plaka kesiti gösterilmektedir. Kartezyen koordinat sistemi x, y ve z , katmanlı malzemenin global koordinatlarını tanımlar. 1 yönü fiber yönüne paralel (boylamasına) ve 2 yönü fiber yönüne dik (enine) ise koordinat sistemi (lokal koordinatlar) olarak adlandırılır. Fiber yönü x eksenine göre pozitif θ açısı doğrultusundadır.



Şekil 3.2. Global ve lokal koordinatları gösterilen tabakalı kompozit plaka (Okutan, 2001)

Şekil 3.3'te, Toplam kalınlığı h olan n tabakalı bir laminatta ait tabakaların koordinatları gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Bir laminatta ait tabakaların koordinatları (Kaw, 2006)

KLT'ne göre laminanın global gerilme ve birim şekil değiştirme ilişkisi denklem 3.1 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada, $[Q]_{ij}$ ($i, j = x$ veya y) dönüştürülmüş ve indirgenmiş rijitlik matrisini, $[\varepsilon]_{ij}$ ($i, j = x$ veya y) ise orta düzlem şekil değiştirmelerini göstermektedir. Farklı fiber açılarındaki (θ) rijitliği ifade eden $[\overline{Q}_{ij}]$ matrisinin elemanları aşağıdaki denklemler ile hesaplanır (Kaw, 2006).

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (3.2)$$

$$\overline{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(s^4 + c^4) \quad (3.3)$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (3.4)$$

$$\overline{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \quad (3.5)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \quad (3.6)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})c^2s^2 - Q_{66}(c^4 + s^4) \quad (3.7)$$

Bu denklemlerdeki $[Q_{ij}]$ (i, j = 1, 2, 6) laminanın indirgenmiş rijitlik matrisidir, $c = \cos\theta$ ve $s = \sin\theta$ 'dır. Matrisin elemanları, lokal eksendeki elastik yapı özelliklerine $(E_1, E_2, G_{12}, \nu_{21})$ bağlıdır. Sırasıyla bu elemanlar aşağıda ilgili denklemlerde gösterilmiştir.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (3.8)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (3.9)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (3.10)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (3.11)$$

Lokal koordinatlarda laminanın lokal gerilmeleri denklem 3.12 ile ifade edilir. Bu denklem açılı bir laminadaki global ve lokal gerilmelerin birbiriyle ilişkilendirilmesini ve bunun lamina açısı (θ) aracılığıyla yapıldığını gösterir (Kaw, 2006).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Bu denklemdeki $[T]$ matrisi, dönüşüm (transformasyon) matrisidir ve aşağıda denklem 3.13 ile gösterilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Böylece global gerilme ve lokal birim şekil değiştirme ilişkisi denklem 3.14 ile gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q]_{ij} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Denklem 3.14'te ifade edilen gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi düzenlenip yazılırsa, laminadaki lokal birim şekil değiştirme ile global birim şekil değiştirme ilişkisini gösteren denklem 3.15 elde edilir. [R] ile gösterilen matris Reuter matrisidir (Robert vd., 1971).

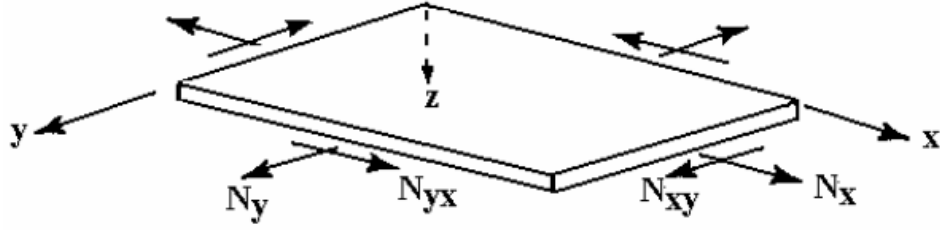
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Reuter matrisi denklem 3.16'da gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

KLT'deki bilgilere dayanarak, 3.17' denkleminde ifade edilen Uzama-Kısalma rijitlik matrisi [A] olarak tanımlanmaktadır. (ij =1,2,6)

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \left[\bar{Q}_{ij} \right]_k (h_k - h_{k-1}) \quad (3.17)$$



Şekil 3.4. Kompozit laminat üzerindeki kuvvet bileşenleri (Okutan, 2001)

Şekil 3.4'te kompozit plaklar üzerine uygulanan normal bileşke kuvvetler (N_x , N_y) ve kayma bileşke kuvvet (N_{xy}) orta düzlemde oluşan şekil değiştirmeleri denklem 3.18' de görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.2. Higrotermal Etkiler Altında Kompozit Plakaların Mekanikliği

Kompozit malzemeler, özellikle uzay yapılarında ciddi higrotermal (nem ve sıcaklık) etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler, uzay aracının uzaya fırlatılma anında oluşan sürtünme ve basınçtan kaynaklı yüksek sıcaklık ve nem, uzaya ulaştığında ise oluşan ani eksi sıcaklık değişimlerini kapsamaktadır. Bu etkiler kompozit malzemedeki higrotermal gerilmelere, yüklere sebep olmaktadır. Kompozit plakaları oluşturan her bir farklı açıya sahip laminaların deformasyon farklılıkları sonucunda artık gerilmeler doğmaktadır. Bu gerilmeler ve yükler ise laminada oluşan higrotermal genişleme farkından meydana gelmektedir (Kaw, 2006).

Bu tez çalışmasında tabakalı kompozit plakaların sadece termal etkiler altında davranışı ele alınacaktır. Buna göre, bir laminada meydana gelen birim uzunluk başına termal yükler KLT'ne göre denklem 3.19'da gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = \Delta T \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k (h_k - h_{k-1}) \quad (3.19)$$

Bu termal yükler sadece simetrik kompozit plakalarda görülmektedir. Denklemden yer alan termal (ısı) genleşme katsayısı (α) birim sıcaklık değişikliğindeki birim uzunluk başına düşen uzunluk değişimi olarak tanımlanır.

Bu ısı genleşme katsayısı (CTE) bileşenleri sırasıyla x yönünde α_x , y yönünde α_y ve xy düzleminde α_{xy} ile gösterilmektedir. Termal yük matrisi $[N^T]$, $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ olduğu durumda oluşan sıcaklık kaynaklı bileşke kuvveti (yükü) temsil etmektedir. Termal genleşme katsayıları $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ için KLT'ne göre denklem 3.20 ile hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}_{\Delta T=1} \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{12}^* & A_{16}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* & A_{26}^* \\ A_{16}^* & A_{26}^* & A_{66}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

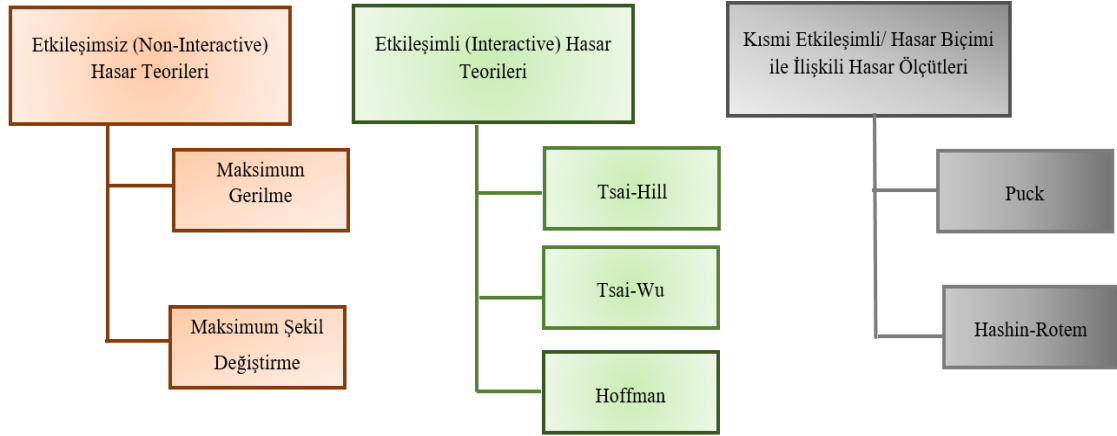
Burada $[A^*]$, uzama kısılma rijitlik matrisinin tersi olup $[A^*] = [A]^{-1}$ şeklinde gösterilebilir. Ayrıca ε_x^0 ve ε_y^0 orta düzlem birim şekil değiştirmeleri ve γ_{xy}^0 orta düzlem kayma birim şekil değiştirmesine karşılık gelmektedir. Ayrıca klasik laminat teorisine göre simetrik bir kompozit laminat için düzlem mühendislik sabitlerini de ifade etmek mümkündür. Etkin boylamasına düzlem modülü E_x , denklem 3.21'de ve etkin düzlem enine modülü E_y denklem 3.22'de verilmiştir.

$$E_x = \frac{1}{hA_{11}^*} \quad (3.21)$$

$$E_y = \frac{1}{hA_{22}^*} \quad (3.22)$$

4. KOMPOZİT PLAKALARDA HASAR TEORİLERİ

Çelik gibi geleneksel malzemeler genellikle izotropik formdadır. Bu malzemeler için geliştirilen hasar teorilerinde asal gerilmeler ve maksimum kayma gerilmeleri olmak üzere iki parametre bulunmaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler ise homojen yapıda olmadığı için izotropik değildir. Bu nedenle kompozit malzemelerin hasar teorileri de geleneksel malzemelerden farklıdır. Kompozit malzemelerin artan kullanımı ve uygulamaları sonucunda birçok araştırmacı fiber takviyeli kompozitlerin hasar kriterlerini araştırmıştır. Bu tabakalı kompozitlerin hasar kriterleri için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Şekil 4.1’de tabakalı kompozit malzemelerin hasar kriterleri sınıflandırılarak gösterilmektedir (Darıcık, Kıratlı, 2021).



Şekil 4.1. Kompozit Lamina Malzemelerin Sınıflandırılmış Hasar Kriterleri

Bu hasar teorileri kompozitler malzemeler hakkında bütünsel bir açıklama verdiği için tek bir yaklaşım ile güvenilirliği geçerli değildir. Bu yüzden, tasarım probleminde kullanılacak olan hasar teorileri eş zamanlı olarak çözümlenerek laminanın hasara uğrayıp uğramadığı karşılaştırılmalıdır. Bu tez çalışmasında; Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar teorileri kullanılmıştır (Tsai ve Wu, 1971; Hashin ve Rotem, 1973).

4.1. Tsai-Wu Hasar Teorisi

Kaw (2006, s. 157)' ın belirttiği üzere bu teori “toplam şekil değiştirme enerjisi (Beltrami-Haigh) hasar teorisini esas alır”. Tsai ve Wu tarafından 1971’de yapılan çalışmada, izotropik malzemelerin hasarına yönelik olan bu kriter temel alınarak laminalarda uygulanmıştır (Tsai ve Wu, 1971).

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (4.1)$$

Bu ifadede yer alan F_1 , F_2 , F_6 , F_{11} , F_{12} , F_{22} ve F_{66} hasar tensörlerinin denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$F_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (4.2)$$

$$F_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} \quad (4.3)$$

$$F_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} (\sigma_1^C)_{ult}} \quad (4.4)$$

$$F_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult} (\sigma_2^C)_{ult}} \quad (4.5)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{H_{11}H_{22}} \quad (4.6)$$

$$F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2} \quad (4.7)$$

Bu hasar teorisinin önemli yönleri bulunmaktadır:

- ✓ Gerilme bileşenleri arasında etkileşim vardır.
- ✓ Kompozit plakayı oluşturan laminanın basma ve çekme mukavemet değerlerinin her ikisi de hesaplanır.

Tüm hasar teorilerinin güvenilirliği hesaplayabilmek için kullanılan tek yönlü laminaya ait mekanik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Tek Yönlü Laminaya ait Mekanik Özellikler

Tek Yönlü Bir Lamina İçin Mekanik Özellikler		
Sembol	Özellik	Birim
σ_1	Malzemenin elyaf doğrultusuna paralel yöndeki normal gerilme	MPa
σ_2	Malzemenin elyaf doğrultusuna dik yöndeki normal gerilme	MPa
τ_{12}	Kayma gerilmesi	MPa
$(\sigma_1^T)_{ult}$	Boylamasına maksimum çekme dayanımı	MPa
$(\sigma_1^C)_{ult}$	Boylamasına maksimum basma dayanımı	MPa
$(\sigma_2^T)_{ult}$	Enine maksimum çekme dayanımı	MPa
$(\sigma_2^C)_{ult}$	Enine maksimum basma dayanımı	MPa
$(\tau_{12})_{ult}$	Maksimum kayma dayanımı	MPa

4.2. Hashin-Rotem Hasar Teorisi

Hashin-Rotem hasar teorisi, 1973 yılında Hashin ve Rotem tarafından sunulan ve kompozit malzemelerin günümüzde de hala kullanılmakta olan önemli hasar teorilerinden birisidir. Bu teori, kısmi etkileşimli/hasar biçimi ile etkileşimli hasar teorisinde içerisinde (Bkz Şekil 4.1) yer almaktadır (Hashin ve Rotem, 1973). Tsai-Wu hasar teorisi ten yönlü fiber takviyeli kompozit laminalarda fiber ve matris hasar modu olmak üzere iki hasar modu içermektedir. Aşağıda verilen bağıntılar tek yönlü laminada fiber ve matris hasarının ifadelerini göstermektedir.

$$\sigma_1 = (\sigma_1^T)_{ult} \quad (4.8)$$

(Tek yönlü laminadaki çekme gerilmesinin fiber hasarı ; $\sigma_1 > 0$)

$$-\sigma_1 = (\sigma_1^C)_{ult} \quad (4.9)$$

(Tek yönlü laminadaki basma gerilmesinin fiber hasarı ; $\sigma_1 < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}} \right)^2 + \left(\frac{(\tau_{12})}{(\tau_{12})_{ult}} \right)^2 = 1 \quad (4.10)$$

(Tek yönlü laminadaki çekme gerilmesinin matris hasarı ; $\sigma_2 > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_2}{(\sigma_2^C)_{ult}} \right)^2 + \left(\frac{(\tau_{12})}{(\tau_{12})_{ult}} \right)^2 = 1 \quad (4.11)$$

(Tek yönlü laminadaki basma gerilmesinin matris hasarı ; $\sigma_2 < 0$)

Bu teori tek yönlü olarak fiber takviyeli laminalarda iki hasar düzeneği içermektedir. Hasar düzenekleri kısaca şöyle ifade edilirse,

- ✓ Basma ve çekme gerilmesinin fiber hasarı (Fiber hasarı, fiber doğrultusunda oluşabilecek tüm gerilmeleri incelememektedir.
- ✓ Basma ve çekme gerilmesinin matris hasarı (Matris hasar düzeneğinde ise fibere gelen yanal ve teğetsel gerilmelerle ilgilenmektedir.)

5. OPTİMİZASYON

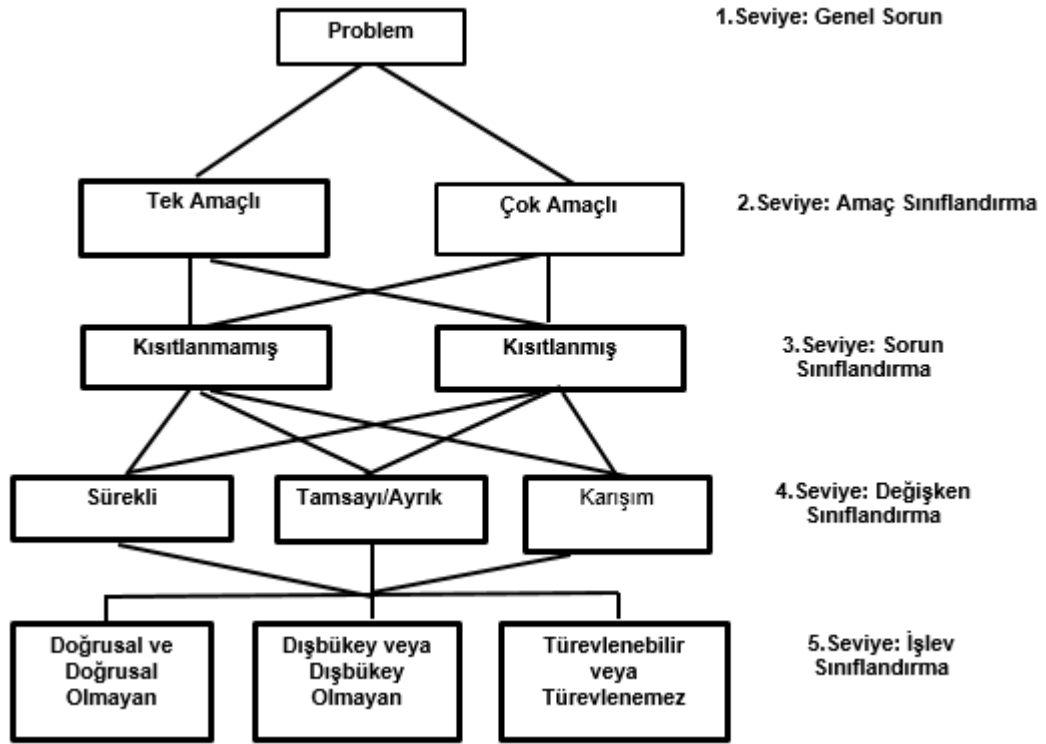
Optimizasyon, belirli koşullar altında en iyi sonucu elde etme eylemidir. Herhangi bir mühendislik sisteminin tasarımında, yapımında mühendisler, çeşitli aşamalarda birçok teknolojik ve yönetsel karar almak zorundadır. Tüm bu tür kararların nihai amacı, ya gereken çabayı en aza indirmek ya da istenen faydayı en üst düzeye çıkarmaktır. Herhangi bir pratik durumda gereken çaba veya istenen fayda, belirli karar değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir. Kısaca optimizasyon, bir fonksiyonun maksimum veya minimum değerini veren koşulları bulma süreci olarak tanımlanabilir (Rao, 1976).

Literatüre bakıldığında optimizasyon problemleri hakkında yürütülen araştırmalar, bilimin ortaya çıkması kadar eskiye dayanmaktadır. Örneğin, M.Ö. 100 yılı civarında İskenderiyeli matematikçi ve mühendis olan Heron, Katoptrikos adlı optik kitabında Heron Problemi olarak ifade ettiği optimizasyon problemini ilk defa tanımlamıştır (Yang, 2010). 20. yüzyıla doğru gelindiğinde optimizasyon konusunda ciddi gelişmeler meydana gelmiştir. II. Dünya Savaşı sırasında, İngiliz ordusu çok kıt ve sınırlı kaynakları (savaş uçakları, radarlar ve denizaltılar gibi) çeşitli faaliyetlere tahsis etme sorunuyla karşı karşıya kalmıştır. Mevcut sistematik yöntemler olmadığı için, ordu bir matematikçi ekibini problemi bilimsel bir şekilde çözmek için yöntemler geliştirmeye çağırdı. Ekip kaynak tahsisi için bir optimizasyon problemi üzerinde çalışmış ve bu problemi çözerek, İngiltere'nin hava savaşını kazanmasında etkili olmuştur (Rao, 2009). Minimum ve maksimum Teorisi" adında ilk optimizasyon kitabını Hancock yazmış ve 1917 yılında yayınlamıştır. Kantorovich (1939)'da ekonomi bilimine faydalı olabilmek adına doğrusal programlama için ilk algoritmayı geliştirmiştir. 1950'lerin sonuna doğru Turing evrimsel algoritma tasarımlarının ilk halini çizmiştir (Filiz, 2012). 20.yüzyılın sonlarına doğru kullanılan bu algoritma yöntemleri yerine günümüzdeki daha güçlü modern optimizasyon algoritma yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin; modern algoritmalar içerisinde yer alan genetik algoritmayı 1988'de ilk kez Holland ve ekip arkadaşları tarafından geliştirip yayınlanmıştır. Nakrani ve Tovey (2004) yılında yapmış oldukları ortak çalışmasına göre, o yıllarda kullanılan algoritma tekniklerini gözden geçirmiş ve yeni bir algoritma yöntemi olan Bal Arısı algoritmasını bulmuşlardır. Karaboğa (2005)' te

yayınladığı makalesinde aynı algoritma yöntemini ele almıştır. Fakat kullanım özelliklerini daha da geliştirmiştir.

5.1. Optimizasyon Probleminin Tanımı

Belirli kısıtlamalar altında, bir dizi değişkenin matematiksel bir fonksiyonunu maksimize etmeye veya minimize etmeye uğraşan problemler, optimizasyon problemi olarak adlandırılırlar (Sarker ve Newton, 2008). Şekil 5.1’de Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması şematize edilmiştir.



Şekil 5.1. Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması (Sarker ve Newton, 2008)

Amaç fonksiyonu, optimize edilecek olan matematiksel fonksiyonunun, kullanım işlevine göre genellikle bir veya daha fazla değişkenli amaç içeren (tek veya çok amaçlı) ve aynı zamanda bir tasarımın en verimli halini belirleyen büyüklüktür. Problemin içeriğine bakılarak, modeldeki değişkenler gerçek veya tamsayı yahut her ikisinin karışımı olabilir. Problem modelinde belirlenen parametreler optimize edilmeye

başladığında tasarımı en verimli hale getirebilmek adına değeri değiştirilebilir. Buna tasarım değişkenleri denir.

Optimizasyon problemi kısıtlanmış veya kısıtlanmamış olabilir. Ayrıca optimizasyon problemleri, değişkenlerine ve işlevlerine göre de sınıflandırılır.

Bir optimizasyon problemi matematiksel olarak aşağıda gösterilmektedir (Sarker ve Newton, 2008; Karaboğa, 2004; Elmas, 2007; Akça, 2005).

$f(x)$ 'i en aza indiren x i bulmak için,

Minimum ya da maksimum

$$f(x) \quad x \in X$$

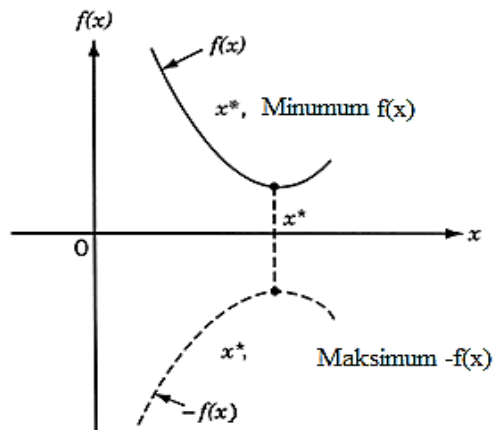
Bağlı olan

$$h_i(x) = 0, i = 1, \dots, m$$

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, p$$

(5.1)

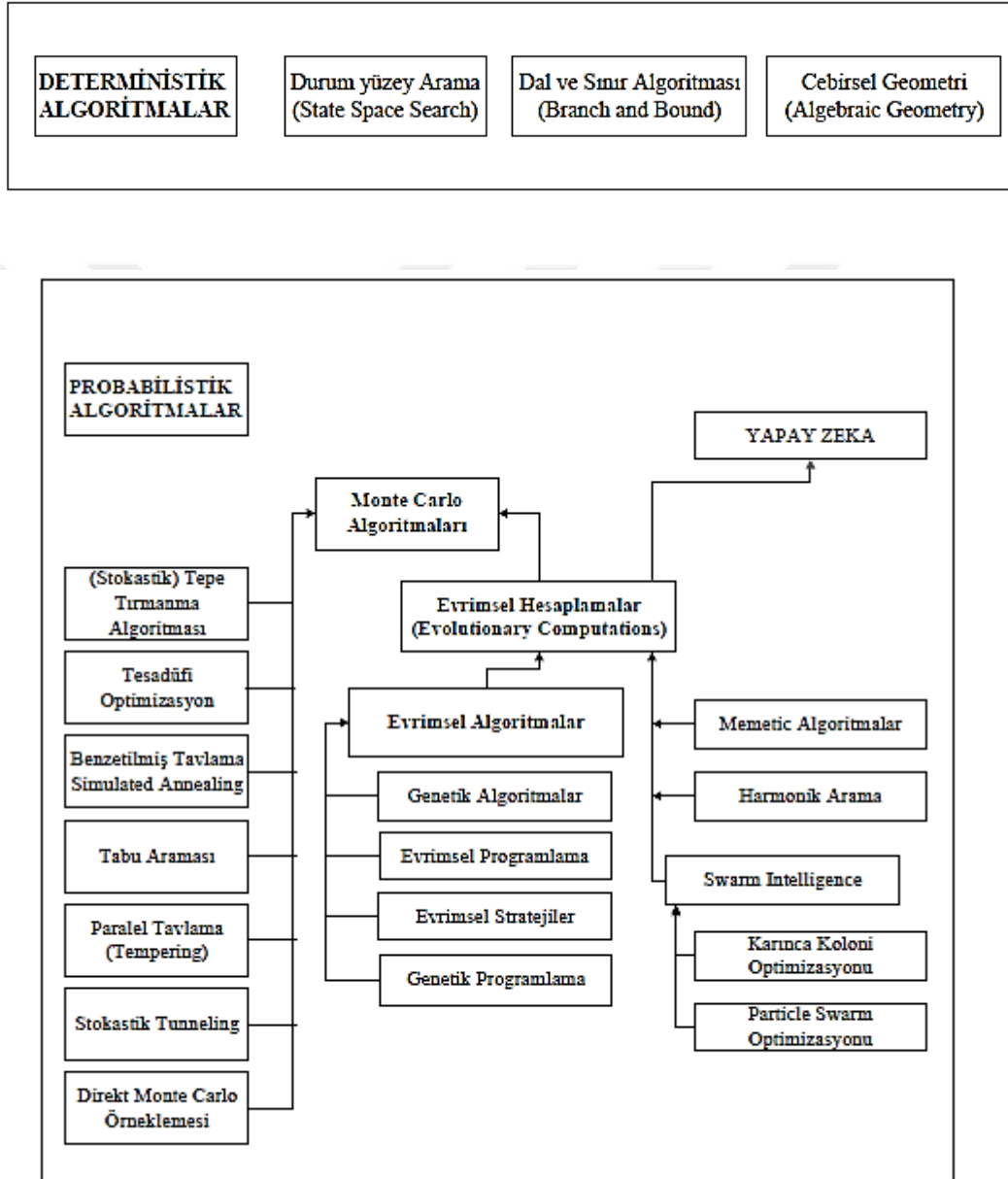
Denklem 5.1'de ifade edilen, bir minimizasyon problemini maksimizasyon problemi haline getirebilmek için amaç fonksiyonunun işareti değiştirilmelidir. (Ayvalık, 2017). Şekil 5.2'de amaç fonksiyonunun ($f(x)$) minimum ve maksimumu grafikte gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Amaç fonksiyonunun $f(x)$ minimum ve maksimumu (Rao, 2009)

5.2. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon problemleri işlem metoduna göre sınıflandırılmaktadır. Şekil 5.3'te gösterildiği üzere, algoritmaların farklı kategorilerine göre deterministik ve stokastik olmak üzere iki ana başlığa ayrılmaktadır.



Şekil 5.3. Algoritmaların sınıflandırılması (Weise, 2008; Çakar, 2009)

Deterministik algoritmaların önemli özellikleri şunlardır: analitiktirler, süreklidirler, türevlenebilirler ve çok sayıda tasarım değişkeni olan problemlere uygun değildirler

(Rao, 2009). Bununla birlikte bu yöntemler stokastik algoritmalarındaki gibi herhangi bir olasılıklı değişkene sahip değildir.

Bu yöntem araştırmacıları, mevcut tasarım probleminde en uygun çözüm noktasına ulaştırmaktadır. Doğruluğunu sağlayabilmek adına amaç fonksiyonuna belirli varsayımlar eklenmektedir (Çakar, 2009).

Stokastik Algoritmalar: Bir amaç fonksiyonunun optimumunu bulmak için rastgeleliği kullanan bir optimizasyon algoritmaları alanını ifade eder.

Stokastik algoritmaların önemli özelliklerini şöyle tanımlamaktadır.

- ✓ Deneysel tasarıma dayanmaktadır.
- ✓ İstatiksel yöntemler kullanılmaktadır.
- ✓ Bazı karmaşık optimizasyon problemleri için net çözümler içermektedir.
- ✓ Belirli süreler içerisinde optimizasyon problemlerini kolaylıkla çözebilmektedir (Spall, 2003).

Literatürdeki optimizasyon çalışmalarında en çok kullanılan ve etkili olan optimizasyon algoritmaları; genetik algoritma, benzetilmiş tavlama algoritması, genelleştirilmiş model arama algoritması, yapay arı kolonisi algoritması, parçacık sürü optimizasyonu algoritması olarak verilebilir. Bu doğrultuda, tez çalışmasında oluşturulan problemlerin çözümünde genetik algoritma ve genelleştirilmiş model arama algoritmasını içeren hibrit bir algoritma kullanılmıştır.

5.3. Genetik Algoritma (GA)

Evrimsel hesaplama, 1960'lı yıllarda I.Rechenberg tarafından "Evrimsel stratejileri "adlı çalışmasında ilk kez tanıtılmıştır. İlerleyen yıllarda birçok araştırmacı bu çalışmayı temel olarak farklı fikirler geliştirmişlerdir (S.N.Sivandam ve S.N.Deepa 2008; Deveci, 2011). Genetik Algoritma – Genetic Algorithm (GA), 1975 yılında John Holland ve çalışma arkadaşları tarafından keşfedilmiştir. Charles Darwin'in doğal seleksiyon teorisinde bahsettiği en iyinin hayatta kalması esasına dayanan ve devamlı en iyiye ulaşmayı hedefleyen bir biyolojik evrim modelini bilgisayar ortamına aktaran stokastik bir arama prosedürüdür (Yang, 2010).

Genetik algoritmalar birçok yönden avantaj sağlamaktadır:

- ✓ Eşzamanlı olmaları sayesinde keşfetme ve yararlanma yeteneği daha üstün gelmektedir.
- ✓ Çözüm uzayının sadece gerekli bir kısmı taramaktadır. Bu işlem kolaylığı sayesinde etkin bir arama yöntemiyle beklenen performansından daha kısa sürede en iyileştirme yöntemidir.
- ✓ Diğer algoritma yöntemleriyle kıyaslandığında lokal çözümlere takılmadıkları için önemli bir farklılık yaratmaktadır.
- ✓ Global optimumu keşfetme yeteneği sayesinde geleneksel optimizasyon yöntemlerine kıyaslandığında birçok yönden fayda sağlamaktadır (Sciuva vd., 2003; Pelletier ve Vel 2006; Deveci, 2011)
- ✓ Bu algoritma yöntemi daha geniş bir çözüm alanına sahiptir.
- ✓ Optimizasyonda oluşan artan miktarda teorik doğrulama ve gerçek dünya problemlerine başarılı uygulamayı desteklemektedir (Sivandam ve Deepa 2008).

5.3.1. Genetik algoritmanın (GA) kullanım alanları

- ✓ Parametre ve sistem tanılama alanında,
- ✓ Kontrol sistemlerinde,
- ✓ Robot uygulamalarında,
- ✓ Görüntü ve ses tanıma sistemlerinde,
- ✓ Yapay zeka uygulamalarına dayanan birçok alanda,
- ✓ İş dünyasında kullanım alanına göre ağ tasarım problemleri, yol bulma problemleri, çizelgeleme problemleri için kullanılmaktadır.
- ✓ Mühendislik problemlerinde;

GA'nın yaygın kullanım alanına sahip olan kompozitlerin mukavemetinin artırılması, uzay ve havacılık gibi hassasiyeti yüksek alanlarda kullanılan kompozit malzemeleri boyutsal kararlı hale getirmek ve aynı zamanda bu malzemeleri daha hafif yapı haline getirmeyi sağlayarak alternatif çözümler sunmasıdır (Aydın, 2011).

GA, tamsayılı programlama yöntemine uygun olmaları ve en iyi çözüm yolunu bulabilmeleri nedeniyle kompozit plakaların optimizasyon tasarımında kullanılmaktadır.

5.3.2. Genetik algoritma terminolojisi

Genetik algoritma, bir problemde birden fazla olası çözüm içerisinde uygun parametrelerin (en iyisi) belirmesi sonucunda optimum çözüme ulaşmayı hedeflemektedir.

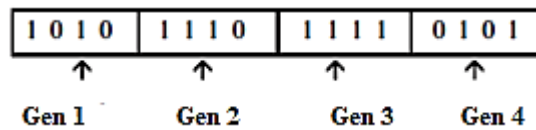
GA'da bulunan kavramlar ve zorunlu olan parametreler sırasıyla tanımlanmıştır.

Gen: Belirlenen bir problemdeki genetik bilgi taşıyan en küçük birim olarak tanımlanmaktadır. Gen ile tanımlanacak ifadeler A,B formunda karakter harfleri de kullanılabilir. Bununla birlikte 0 veya 1 sayılarını kullanarak bit veya bit dizisi oluşturulabilir (Karasoy ve Ballı, 2016).

Kromozom: Genlerin bir araya gelmesi sonucunda oluşan yapıdır. Şekil 5.4'te Bir kromozomun temsili yapısı gösterilmektedir. Mevcut probleme ait her türlü bilgi içeriğine sahiptir. Bununla birlikte problemde farklı çözüm yolu oluşturacak alternatifler sağlamaktadır. GA'da bir bireyin uygunluğu aynı zamanda fenotipi içinde bir amaç fonksiyonu değeridir. Uygun olup olmadığına bakabilmek için ilk olarak kromozomun kodu çözülmelidir. Daha sonra ise amaç fonksiyonu değerlendirilmelidir. Uygunluk faktörü çözümün iyi olmasının yanında kromozomun en uygun olana ne kadar yakın olması gerektiğini de belirtir (Sivanandam ve Deepa 2008). Bir kromozomda bulunan genleri, Şekil 5.5'teki gibi temsil etmektedir.



Şekil 5.4. Bir kromozomun temsili



Şekil 5.5. Bir kromozomdaki genlerin temsili

Popülasyon (Topluluk): Bireyler veya kromozomların bir araya gelmesi sonucunda oluşan yapıdır. Mevcut bir problemde alternatif olarak çözüm kümeleri üretmektedir. Popülasyondaki birey sayısını kullanıcı tasarım modeline göre seçmektedir. (Zayıf olan bireylerin yerini kuvvetli yeni bireyler almaktadır) Genetik operatörlerle (seçilim, mutasyon vd.) sağlanan yenilemeler ile probleme uygun bireyler seçilmektedir. GA’da popülasyon üretimi ve popülasyon büyüklüğü oldukça önemlidir (Deveci, 2011).

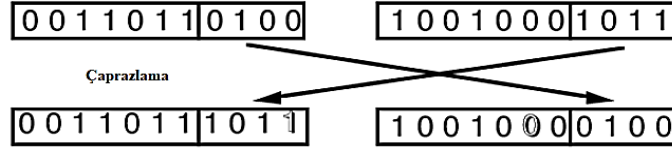
5.3.3. Genetik operatörler

Mevcut tasarım probleminde GA’nın çözümü ilerlediğinde, yapılan arama uzayında keşifle en uygun çözüme ulaşma, arama hızı yönü gibi önemli faktörler mevcuttur. Bu arama uzayının yeni bölgelerine yapılan keşif, mevcut popülasyon üzerinde uygulanan işlemler yani genetik operatörler tarafından yapılmaktadır. Bu operatörler, her nesilde yeni yavrular oluşturmak için genlerin kalıtım sürecini taklit etmektedir. Temsil sırasında ise bireylerin genetik yapısını değiştirmek için kullanılır. Temelde, operatörler rastgele bir arama yapmaktadır.

Bu operatörler sırasıyla şu şekilde tanımlanmaktadır.

a-) Çaprazlama (Crossover)

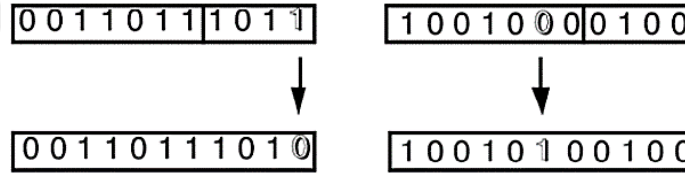
Çaprazlama ana genetik operatördür ve her nesilde mevcut çözümleri daha iyiye götürmek için kullanır. Üreme sürecinde temel görevi yeni çocuklar oluşturmaktır. Aynı anda iki kromozom üzerinde çalışmaktadır. Daha net bir tanım yapılırsa, bir çift ebeveynden alınan genetik bilgiyi birleştirerek hareket etmektedir. GA’nın çaprazlama operatörü, çaprazlama noktasını tanımlamak için rastgele bir kesme noktası seçer ve yavruları oluşturur. Çaprazlama elde etmenin basit bir yolu, kesme noktasının solundaki bir ebeveynin segmentini, kesme noktasının sağındaki diğer ebeveynin segmentiyle birleştirerek, bir çocuk oluşturmak için yeniden düzenlenmesidir. GA’nın performansı büyük ölçüde kullanılan çaprazlama operatörünün performansına bağlıdır (Spall, 2003; Gen vd., 2008; Deveci, 2011). Örnek bir çaprazlama işlemi Şekil 5.6 ‘da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Çaprazlama işlemi (Comellas ve Ozon,2014)

b-) Mutasyon (Mutation)

Çaprazlamadan sonra uygulanan işlemdir. Mutasyon, farklı kromozomlarda kendiliğinden değişiklikler oluşturan aynı zamanda arka planda çalışan bir operatörüdür. Bu operatör, popülasyonda bir nesilden diğer nesle aktarılan genetik farklılıkları korumaktadır. Mutasyon işleminde çözüm baştan sona tamamen değişebilmektedir. Aynı zamanda GA’da tasarım uzayında çözüme yakın alanları bulmak için kullanışlıdır. Algoritmanın yerel bir minimumda kalmasını engellemektedir (Gürdal, vd., 1999; Sivanandam ve Deepa 2008;Deveci,2011). Örnek mutasyon işlemi Şekil 5.7 ‘de gösterilmektedir.

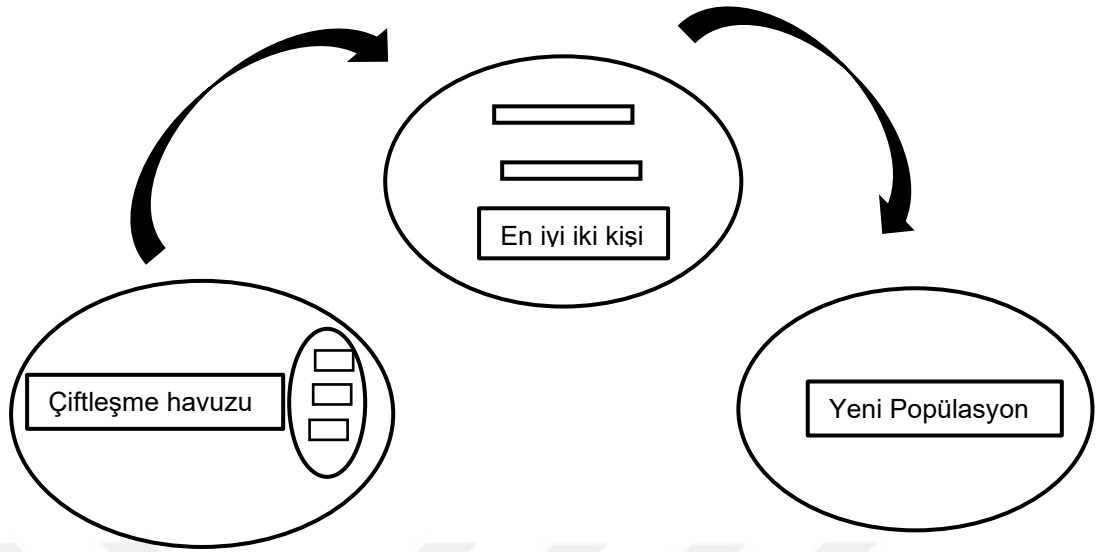


Şekil 5.7. Mutasyon işlemi (Comellas ve Ozon,2014)

c-) Seçim (Selection)

Seçim, mevcut popülasyonda bulunan iki ebeveynin seçilmesi aşamasına denir. Kodlama işleminde, popülasyon içerisindeki neslin bir sonraki nesilde de yavru oluşturacak bireylerin nasıl seçileceğini ve her birinin kaç yavru oluşturacağını belirler.

Seçimin amacı, daha yüksek uygunluktaki bireyleri yaratmaktır (Sivanandam ve Derin 2008). Mutasyon işlemi Şekil 5.8 ‘de gösterilmektedir.



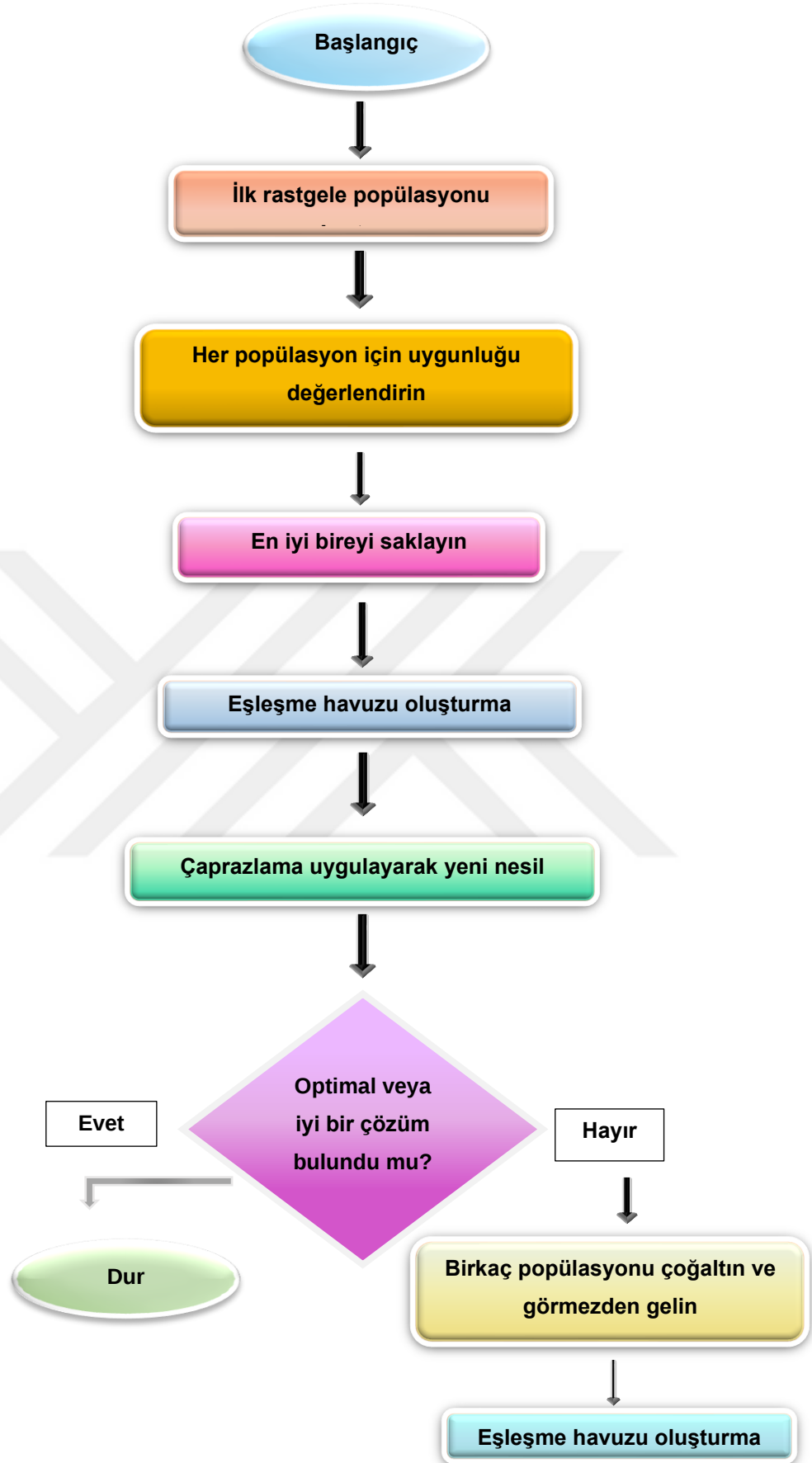
Şekil 5.8. Seçim işlemi (Deveci, 2011)

d-) Değişim (Replacement)

Değiştirme döngünün son adımıdır. GA’da, iki ebeveyn sabit büyüklükte bir popülasyondan çekilir, yavrular üretildiğinde, popülasyonun mevcut üyelerinden hangisinin varsa, yeni çözümlerle değiştirilmesi gerektiğini bir yöntem belirlemelidir. Rastgele değiştirmede, çocuklar popülasyondaki rastgele seçilen iki bireyi değiştirir. Zayıf ebeveyn değiştirmede, daha zayıf bir ebeveynin yerini güçlü bir çocuk alır (Sivanandam ve Deepa, 2008;Deveci, 2011). Benzer şekilde, üretilen tüm yeni bireyler popülasyona dahil edilmeyecek ise veya popülasyon büyüklüğünden daha fazla sayıda yeni birey üretilmiş ise hangi bireylerin yeni popülasyonda yer alacağını belirlenmesi için ekleme (reinsertion) planının uygulanması gerekmektedir.

Ekleme planı kullanılan seçim algoritmasına göre belirlenmektedir. Rulet tekerleği seçimi, stokastik örnekleme ve budama seçimi gibi tüm popülasyon temelli seçim algoritmaları için global ekleme; lokal seçim algoritmaları için ise lokal ekleme kullanılmaktadır.

Şekil 5.9’ da Genetik Algoritmanın Akış Şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Genetik Algoritmanın Akış Şeması (Sivanandam ve Deepa, 2008)

5.4. Genelleştirilmiş Model Arama Algoritması (GPSA)

Model arama yöntemleri, optimizasyonda doğrudan arama yöntemlerinin bir sınıfıdır. Genelleştirilmiş Model Arama Algoritması – Generalized Pattern Search Algorithm (GPSA), Torczon (1997) tarafından fonksiyonların türevsiz kısıtsız optimizasyonu için tanımlanmış ve daha sonra doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon problemlerini hesaba katacak şekilde genişletilmiştir. GPSA, problemi global çözüme götürecek en uygun nokta veya noktalara yaklaşır. Doğrudan arama amaç fonksiyonunun herhangi bir gradyan bilgisini gerektirmez ve amaç fonksiyonunun türevlenebilir, stokastik veya sürekli olmadığı problemleri çözmek için kullanılabilir (Karakaya ve Soykasap, 2009; Spall, 2003; Mathworks 2019b).

GPSA, bir ve birden fazla tekrarlama yoluyla optimal noktaya yaklaşan ve bir dizi nokta bulan doğrudan bir arama yöntemidir.

GPSA, çözümde tekrarlanan iki aşamaya ayrılmaktadır:

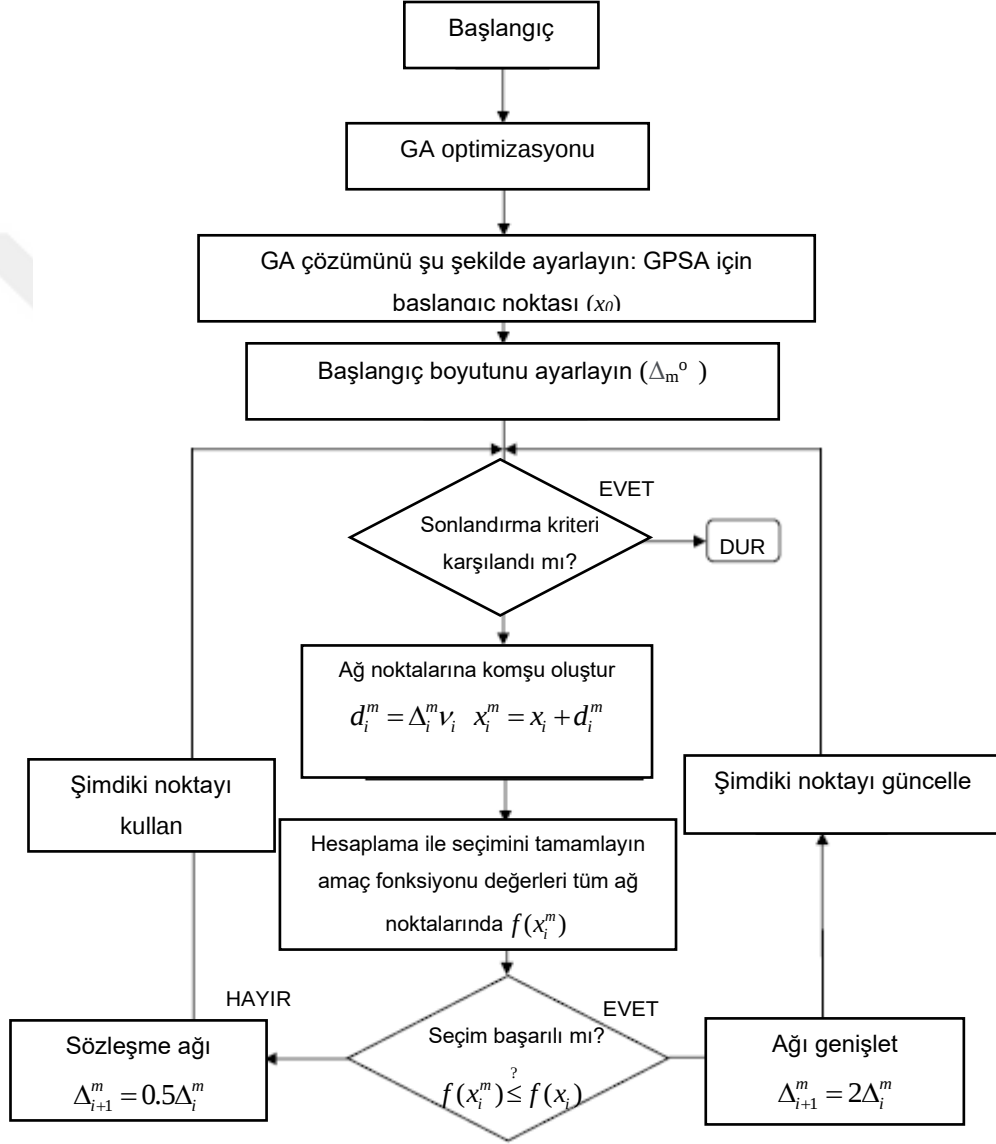
1. Arama aşaması: Amaç fonksiyonu bir ağ üzerinde sonlu sayıda noktada değerlendirilir. Bu aşamanın en önemli görevi ise, yerleşik olarak ifade edilen en iyi çözümden daha düşük bir amaç fonksiyonu değerine sahip yeni bir nokta bulmaktır.
2. Seçim aşaması: Daha düşük bir amaç fonksiyonu değerinin elde edilip edilemeyeceğini görmek için komşu ağ noktalarında amaç fonksiyonu değerlendirilir (Nicosia, 2008; Aydın, 2011).

5.5. Genetik Algoritma (GA)/ Genelleştirilmiş Model Algoritması (GPSA) Hibrit Algoritması

Hibrit algoritma, kullanılacak optimizasyon algoritmalarının her bir güçlü yanından yararlanmak için araştırmacılar tarafından iki farklı metasezgisel yaklaşımı birleştiren yöntemlere denir (Deveci, 2017). Çalışma uzayındaki problem verilerine bağlı kalarak algoritmanın ya birini seçer ya da kullanılan algoritmalar arasında köprü görevi yapar. Bu algoritma yönteminin genellikle kullanılmasının amacı belirlenen her bir algoritmanın üstün özelliklerini seçmek ve bu özellikleri birleştirerek optimizasyonda en uygun sonuca ulaşmayı sağlamaktır.

Tekli olarak kullanılan algoritma yöntemleriyle de karşılaştırıldığında hibrit algoritma yönteminin daha optimal sonuçlara ulaştığı bilinmektedir. Örneğin, hibrit algoritmalarda kullanılan arama yetenekleri daha verimli hale getirilerek hesaplama hızında gelişmeler sağlamaktadır.

Aşağıda Şekil 5.10’da hibrit bir algoritmanın akış seması gösterilmiştir.



Şekil 5.10. GA/GPSA hibrit algoritmasının akış seması

Bu tez çalışmasında GA/GPSA hibrit algoritması kullanılmıştır. Bu hibrit algoritma, her iki algoritmanın en iyi özelliklerini seçerek ve en uygun çözüm veya çözümlere en az tekrarlama ile hesaplama yapabilmesini sağlamaktadır.

Belirlenen tasarım modeli problemlerinde kullanılan hibrit algoritmada GPSA'nın nasıl çalıştığını ve eş zamanlı olarak GA ile nasıl etkileşime girdiğini ifade eden optimizasyon işlemi Şekil 5.10'da verilmiştir ve aşağıda adım adım açıklanmaktadır.

Adım 1. GA, maksimum sayısına varana kadar veya ilerleme değerinde herhangi bir gelişme olmayana kadar çalışır.

Adım 2. GA sona erdiğinde, ulaşılan uygun değer çözüm GPSA'nın araması için bir başlangıç noktası olarak kullanılır.

Adım 3. GPSA, aramasına bir ilk çözüm x_0 ve başlangıç boyutu Δ_m^0 ile başlar.

Adım 4. Arama aşaması, en iyi çözümden daha düşük bir amaç fonksiyonuna sahip bir çözümle karşılaşır algoritma durur. Sonlandırma kriterleri karşılanmazsa, algoritma sorgulama aşamasına gider ve ağ boyutunu her desen vektörüyle $\{d_i\}$ çarparak bir dizi komşu örgü noktası x_i^m oluşturur.

Adım 5. k'ıncı yinelemedeki yoklama adımında, GPSA, geliştirilmiş bir nokta bulmak için amaç fonksiyon değerlerini $f(x_i^m)$ hesaplayarak tüm örgü noktalarını sorgular. Geliştirilmiş bir nokta bulunursa bu süreç, global optimuma ulaşılan kadar birçok yinelemeyle devam eder (Deveci, Aydın ve Artem, 2016).

GA/GPSA hibrit algoritması en iyi sonuçları elde edebilmek ve güvenilirliği artırmak için en uygun ayarların belirlenmesi gerekir. Bu sebeple bir ön optimizasyonu çalışması yapılarak Algoritma için en uygun ayarlar verilmiştir.

5.6. Matlab Optimizasyon Araç Kutusu

Tezde MATLAB GA/GPSA Hibrit Algoritması ve Doğrudan Arama Araç Kutusu kullanılmıştır (The Mathworks, Inc. R2019a). MATLAB GA/GPSA Hibrit Algoritması ve Doğrudan Arama Araç Kutusu, standart ve büyük ölçekli optimizasyon için kısıtlı ve

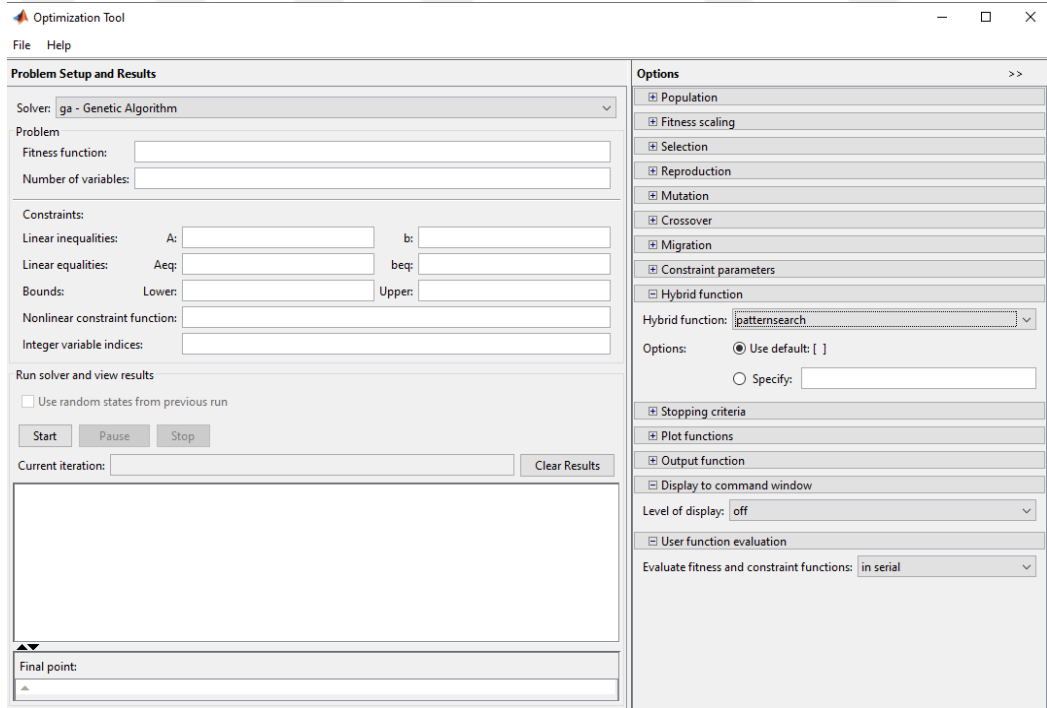
kısıtlamasız sürekli ve ayrık problemleri çözen yaygın olarak kullanılan algoritmaları içerir. Matlab araç kutusuna bakıldığında bulunan çözümler optimizasyon algoritması olarak da seçilebilmektedir.

Örneğin 'Genetik Algoritma (GA)', 'Simüle edilmiş tavlama algoritması (simülasyonlu tavlama algoritması)' yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulanan bu yöntemler literatürde birçok araştırmacı ve ekibi tarafından kompozit malzeme tasarımında da kullanılmıştır (Aydın, 2011; Deveci, 2011; Savran, 2017).

GA/GPSA Hibrit Algoritmasında, GA çözümleri araç kutusunda iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar aşağıda kısaca şu şekilde ifade edilirse:

Problem tanımı: Problem Kurulumu ve Sonuçları (problem tanımı) bölümü, Uygunluk fonksiyonu, Değişken sayısı, Kısıtlamalar ve Sınırları içermektedir.

Seçenekler: Popülasyon, Fitness fonksiyonu, Seçilim, Reprodüksiyon, Mutasyon, Çaprazlama, Göç gibi bazı önemli ayarlamaları içerir. Şekil 5.11' de MATLAB Toolbox içerisinde bulunan genetik algoritma çözümleri ara yüzü gösterilmektedir.



Şekil 5.11. MATLAB Toolbox içerisinde bulunan genetik algoritma çözümleri ara yüzü

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi problem kurulumu ve sonuç kısmı içerisinde yer alan Fitness fonksiyonu ve değişken sayısı tanımlanmalıdır.

Uygunluk fonksiyonu, minimize veya maksimize edilecek amaç fonksiyonudur. Bununla birlikte değişken sayısı ise uygunluk fonksiyonu ile ilgili girdi vektörünün uzunluğuna karşılık gelmektedir. Kısıtlar panelinde problem için kısıtlar veya doğrusal olmayan bir kısıt fonksiyonu girilebilir. Problem sınırlandırılmamış ise bu alanlar boş bırakılmaktadır. Başlat düğmesi, genetik algoritmayı çalıştırmak için kullanılır. Optimizasyonun sonuçları, çözümleyiciyi çalıştırmaktadır. Daha sonra ise sonuçlar görüntüleme panelinde görüntülenmektedir.

Genetik algoritmanın seçenekleri, gerektiğinde Seçenekler panelinden değiştirilebilmektedir. GA güvenilirliğini artırmak ve en doğru sonuçları elde etmek için GA uygun seçeneklerin belirlenmesi gerekmektedir. Popülasyon seçenekleri, bu algoritmanın popülasyonun parametrelerini belirlenmesinde imkan vermektedir. Oluşturma işlevi, genetik algoritma için başlangıç popülasyonunu oluşturan işlevi belirtir bu işlevde ise GA’daki başlangıç popülasyonu, başlangıç puanları ve başlangıç aralığını sağlamaktadır. Popülasyon türü, kullanılan tüm algoritmalarda da uygunluk işlevine yapılan girdinin türünü belirtmektedir. Bu aşama önemli ve unutulmamalıdır.

Başlangıç popülasyonu, adından da anlaşılacağı üzere GA’da başlangıç popülasyonu belirtir. Başlangıç puanları ise başlangıç popülasyonunun başlangıç puanlarını tanımlamaktadır. Başlangıç aralığı, bir oluşturma işlevi tarafından oluşturulan başlangıç popülasyonundaki vektörlerin aralığını tanımlamaktadır. Fitness ölçekleme bölümünde, uygunluk fonksiyonu tarafından döndürülen ham uygunluk puanları, seçim fonksiyonuna uygun bir aralıktaki değerlere dönüştürülür. Seçim seçeneği, amaç fonksiyonlarından ölçeklendirilmiş değerlerini gelecek nesillerin ebeveynleri belirlemektir. Üreme seçeneği, her yeni nesilde GA çocuk yaratımının belirlenmesi ile ilgilidir. Mutasyon seçeneği, belirtilen problemde herhangi bir kısıtlama veya sınır yoksa Gauss alt seçeneği seçilebilir. Crossover seçeneğinde altı farklı çaprazlama işlevi bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla Dağınık, Tek nokta, İki nokta, Orta Düzey, Sezgisel ve Aritmetik olarak ara yüzde bulunmaktadır.

5.7. Hibrit Algoritmanın Performansı

Deveci (2017)'de yaptığı çalışmasında elde edilen bir burkulma optimizasyon problemini bir test problemi olarak kabul etmiştir ve maksimum kritik burkulma yükü faktörü veren en iyi fiber aç dizilimi bakımından hibrit algoritmanın performansını değerlendirmek için belirlenen seçenekleri çözmüştür. Hibrit algoritmanın sonuçlarını daha önce literatürde farklı hibrit algoritmalar tarafından çalışılan en iyi sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Tablo 5.1'de test problemleri için yükleme durumları verilmiştir. a ve b kompozit levha boyutlarının ayrıntılarını ve N_{xx} ve N_{yy} düzlem içi yüklerini gösterir. Tüm yük durumları için optimum kritik burkulma yükü faktörleri literatürden derlenmiş ve Tablo 5.2'de mevcut kritik burkulma yükü faktörü ve istifleme ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 5.1. Test problem için yükleme durumları

	Tabaka sayısı	a (mm)	b (mm)	N_{xx} (N/mm)	N_{yy} (N/mm)
1	48	508	127	17.5	2.2
2	48	508	127	17.5	4.4
3	48	508	127	17.5	8.8
4	64	508	254	17.5	17.5

Tablo 5.2. GA-GPSA hibrit algoritmasının performans sonuçları

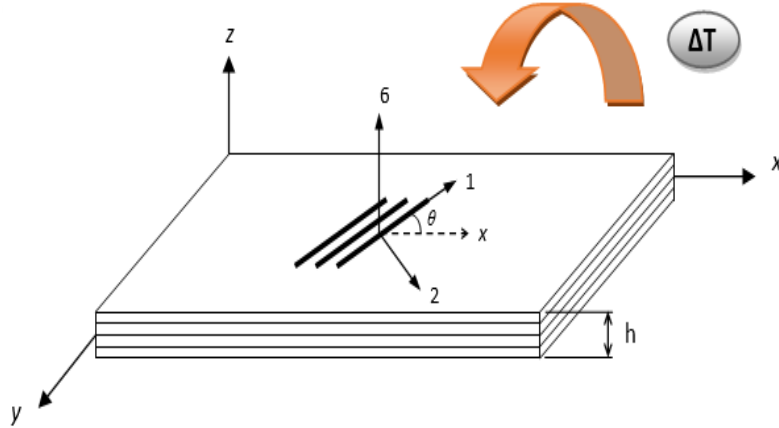
#	$\lambda_{cb}^{[46-49]}$ ([lbf/in ³]/[lbf/in ³])	$\lambda_{cb}^{present}$ ([lbf/in ³]/[lbf/in ³])	Fiber Aç Dizilimi
1	16120.38	20950.55	$[90_4 / (\pm 45_2 / 90_2)_2 / \pm 45_3 / 90_2]_s$
	16119.48	20920.39	$[90_2 / (90_2 / \pm 45)_2 / \pm 45_5 / 90_2 / \pm 45]_s$
	16087.83	20894.53	$[90_4 / \pm 45_3 / 90_4 / \pm 45_5]_s$
2	13442.04	15961.75	$[90_4 / \pm 45 / (90_2 / \pm 45)_2 / \pm 45_3]_s$
	13441.28	15729.07	$[90_2 / (90_2 / \pm 45)_2 / \pm 45_4 / 90_2 / \pm 45_2]_s$
	13435.94	15512.55	$[90_4 / \pm 45_2 / 90_2 / \pm 45_7]_s$
3	10003.53	10591.61	$[90_2 / \pm 45 / 90_2 / (90_2 / \pm 45)_2 / \pm 45_4 / 90_2]_s$
	10002.95	10460.19	$[90_2 / (90_2 / \pm 45)_2 / \pm 45_5 / 90_2 / \pm 45]_s$
	9999.45	10343.85	$[(90_2 / \pm 45)_3 / \pm 45 / 90_2 / \pm 45_4]_s$
4	3973.01*	3973.01	$[90_{10} / \pm 45 / 90_2 / \pm 45_7 / 90_2 / \pm 45]_s$
	3973.00*	3973.00	$[90_4 / (90_2 / \pm 45)_3 / 90_8 / \pm 45 / 90_6]_s$

6. HİBRİT ALGORİTMA KULLANILARAK KARBON/EPOKSİ KOMPOZİT PLAKALARIN BOYUTSAL KARARLILIK TASARIMI

Bu bölümde literatürden alınan bir tabakalı karbon/epoksi kompozit malzemenin boyutsal kararlılık optimizasyonu çalışması ve sonuçları sunulmaktadır. Bölümde sırasıyla problem tanımı, bulgular – tartışma ve tasarımların performansını değerlendiren alt bölümler verilmektedir.

6.1. Problem Tanımı

Bu çalışmada 12 tabakalı $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3]_s$ ve 16 tabakalı $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3/\pm\theta_4]_s$ simetrik-dengeli karbon/epoksi kompozit plakalarda maksimum boyutsal kararlılık etmek için çeşitli fiber açısı istifleme dizisi optimizasyon problemleri, Genetik Algoritma (GA)/Genelleştirilmiş Model Arama Algoritma (GPSA) hibrit algoritması kullanılarak çözülmüştür. Ele alınan kompozit plakalar dikdörtgen şeklindedir ve Şekil 6.1’de Termal yüklemelere maruz kalan, global ve lokal koordinatları ifade edilen bir kompozit plaka tasarım modeli gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Termal yüklemelere maruz kalan, global ve lokal koordinatları ifade eden tabakalı kompozit plaka modeli (Geçmez ve Deveci, 2020)

Boyutsal kararlılık optimizasyonu için, tabakalı kompozit tasarımlarında kullanılan karbon/epoksi malzeme özellikleri de Tablo 6.1’de ifade edilmiştir (Aydın,2011).

Tablo 6.1. Karbon/epoksi kompozit malzeme özellikleri (Aydın,2011)

Parametreler	Değer
E_1 (Fiber yöndeki elastisite modülü [GPa])	277.3
E_2 (Fibere dik yöndeki elastisite modülü (GPa))	7.1
G_{12} (Kayma modülü (GPa))	3.49
ν_{12} (Poisson oranı)	0.29
α_1 (Fiber yöndeki ısı genleşme katsayısı($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$))	-1
α_2 (Fiber yöne dik ısı genleşme katsayısı($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$))	22.42

Ele alınacak olan optimizasyon problemleri matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Bul: $\{\theta_k, n\}$, $\theta_k \in \{-90:90\} \wedge \{0_2, \pm 45, 90_2\}$, $k=1, \dots, n$

Minimize et: α_x, α_y

Kısıtlar: Simetri

Denge

E_x, E_y

Algoritma: GA/GPSA hibrit algoritması

Burada, sırasıyla plakanın x ve y yönlerinde minimum termal genleşme katsayıları α_x ve α_y 'yi ayrı ayrı tek amaç fonksiyonu olarak elde etmek için optimum -90° - 90° aralığında sürekli ve 0_2° , $\pm 45^{\circ}$, 90_2° geleneksel θ_k fiber açıları bulunmaktadır. Simetri ve denge geometrik kısıtlamaları nedeniyle n , 12 tabakalı problemlerde 3 ve 16 tabakalı problemlerde 4 olmaktadır. Her bir tabaka kalınlığı 0.125 mm alınmıştır. Ayrıca, kompozit plaka dayanımından ödün vermemek için sırasıyla plaka x ve y yönlerine ait elastisite modülleri E_x ve E_y lineer olmayan eşitsizlik sınır şartları olarak çoğu probleme uygulanmıştır. Hibrit algoritma “MATLAB Optimization Toolbox” kullanılarak oluşturulmuştur.

Karbon epoksi tabakalı kompozitlerin optimum tasarımları elde edilmeden önce, literatürde Aydın (2011)'nin çalışmasındaki veriler baz alınarak bir doğrulama çalışması yapılmıştır.

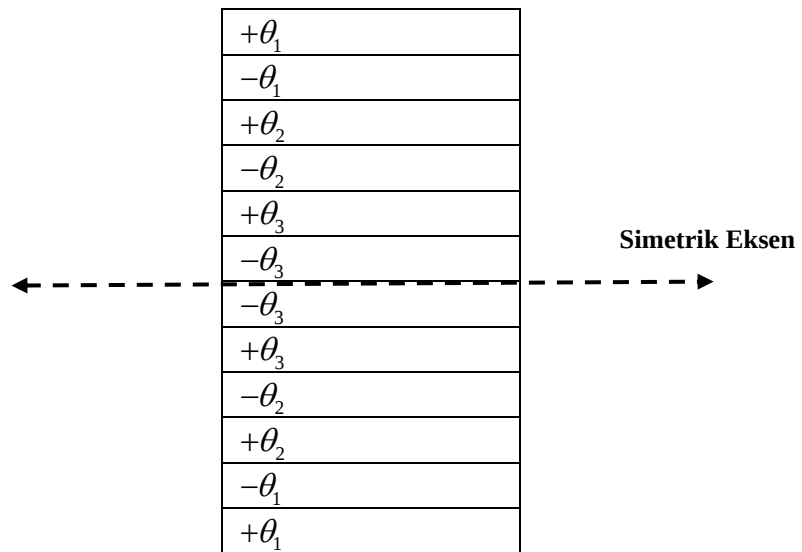
Çalışmada seçilen problemlerde MATLAB ile yazılan amaç fonksiyonları (α_x , α_y) ve kısıtlara (E_x , E_y) ait kodlar doğrulanmıştır.

Amaç fonksiyonu, elastisite modülü kısıt fonksiyonu ve hibrit algoritmanın çalıştırıldığı örnek kodlar Ek-1’de sunulmuştur. Tasarım optimizasyonunda oluşturulan model problemler Tablo 6.2’de sunulmuştur.

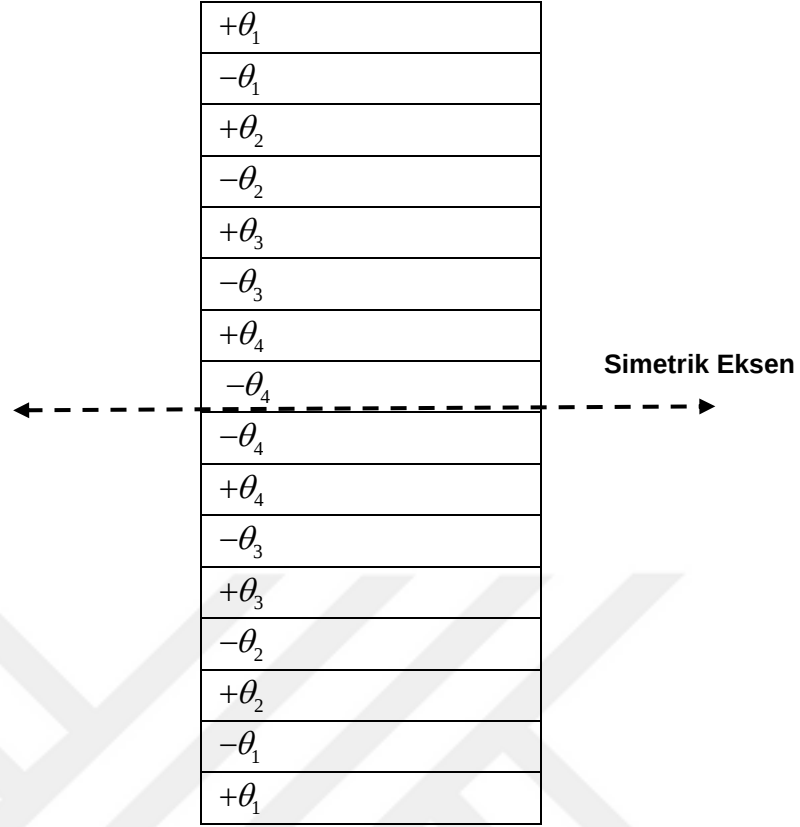
Tablo 6.2. Malzeme parametrelerine ait model problemler

Optimizasyon	Kısıt	12 Tabakalı	16 Tabakalı
Min α_x	-		
Min α_y	-		
Min α_x	E_x		
Min α_y	E_y		
Min α_x	E_y	$[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3]_s$	$[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3 / \pm\theta_4]_s$
Min α_y	E_x		
Min α_x	E_x, E_y		
Min α_y	E_x, E_y		

Oluşturulan optimizasyon senaryosu dikkate alındığında toplamda 32 tane model problem çözülmüştür. Aşağıda kompozit malzemenin tasarımda kullanılan tabaka sayılarına göre fiber açı istifleme dizilerinin şematik gösterimi Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’te verilmektedir.



Şekil 6.2. 12 tabakalı kompozit malzemenin istifleme dizini $[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3]_s$ (Aydın, 2011)



Şekil 6.3. 16 tabakalı kompozit malzemenin istifleme dizini $[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3 / \pm\theta_4]_s$ (Aydın, 2011)

6.2. Bulgular ve Tartışma

GA/GPSA hibrit algoritması ile 12 ve 16 tabakalı simetrik-dengeli karbon/epoksi kompozit plakalar için sürekli ve geleneksel fiber açıları kullanılarak bulunan optimum tasarımlar tablolarda sunulmuştur. İlk olarak sürekli açılar (-90° - 90°) ile elde edilen sonuçlar; 12 tabakalı kompozit için Tablo 6.3'te (model problem 1 – 8), 16 tabakalı kompozit için Tablo 6.4'te (model problem 9 – 16) verilmiştir.

Tablo 6.3'e bakıldığında özellikle model problem 5 ve 6 'da termal genleşme katsayıları α_x ve α_y değerlerinin açık gri renk ile vurgulanan 10^{-11} mertebesine kadar indirgenebildiği görülmektedir. Bununla birlikte E_x ve E_y elastisite modülleri, tasarım problemleri için belirlenen kısıtları sağlamakta ve hatta değer olarak üzerine çıkmaktadır. Örneğin; model problem 6'da E_x 'in koyu gri renkle vurgulandığı gibi belirlenen $E_x \geq 100$ GPa kısıtlamasını hem sağladığı ve hem de üstünde bir değere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.3. Sürekli açi değerleri için 12 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Kısıt	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)	E_x (GPa)	E_y (GPa)
1	Min α_x	-	$[\pm 55.4/\pm 9.7/\pm 85.1]_s$	$-1,142 \cdot 10^{-9}$	$-1,156 \cdot 10^{-7}$	97,44	131,7
2	Min α_y	-	$[\pm 3.2/\pm 50.2/\pm 61.2]_s$	$-4,672 \cdot 10^{-7}$	$-5,857 \cdot 10^{-9}$	100,8	78,73
3	Min α_x	$E_x \geq 100 \text{ GPa}$	$[\pm 6.7/\pm 81.9/\pm 57.4]_s$	$9,472 \cdot 10^{-10}$	$-5,337 \cdot 10^{-7}$	98,78	139,2
4	Min α_y	$E_y \geq 50 \text{ GPa}$	$[\pm 27.07/\pm 87.4/\pm 17.9]_s$	$-4,567 \cdot 10^{-7}$	$8,763 \cdot 10^{-10}$	132,0	97,47
5	Min α_x	$E_y \geq 50 \text{ GPa}$	$[+83.3/\pm 46/\pm 23]_s$	$9,396 \cdot 10^{-11}$	$-4,709 \cdot 10^{-7}$	79,24	101,5
6	Min α_y	$E_x \geq 100 \text{ GPa}$	$[\pm 33.4/\pm 1.2/\pm 83.6]_s$	$-4,538 \cdot 10^{-7}$	$-9,029 \cdot 10^{-11}$	136,5	100,0
7	Min α_x	$E_x, E_y \geq 100 \text{ GPa}$	$[\pm 82/\pm 3/\pm 58.5]_s$	$1,279 \cdot 10^{-10}$	$-4,536 \cdot 10^{-7}$	100,4	137,1
8	Min α_y	$E_x, E_y \geq 50 \text{ GPa}$	$[\pm 31/\pm 88.9/\pm 9.1]_s$	$-4,532 \cdot 10^{-7}$	$-4,451 \cdot 10^{-10}$	137,1	100,5

Tablo 6.4. Sürekli açi değerleri için 16 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3/\pm\theta_4]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Kısıt	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)	E_x (GPa)	E_y (GPa)
9	Min α_x	-	$[\pm 35/\pm 79/\pm 90/\pm 2.7]_s$	$3,113 \cdot 10^{-9}$	$-4,532 \cdot 10^{-7}$	102,5	114,1
10	Min α_y	-	$[\pm 57/\pm 19.2/\pm 69.5/\pm 18.3]_s$	$-4,687 \cdot 10^{-7}$	$-2,539 \cdot 10^{-9}$	109,8	84,24
11	Min α_x	$E_x \geq 100 \text{ GPa}$	$[\pm 89.7/\pm 7.9/\pm 32.2/\pm 88.9]_s$	$-7,832 \cdot 10^{-10}$	$-4,488 \cdot 10^{-7}$	105,0	145,2
12	Min α_y	$E_y \geq 50 \text{ GPa}$	$[\pm 33.5/\pm 1.6/\pm 89.8/\pm 88.9]_s$	$-8,898 \cdot 10^{-10}$	$-4,482 \cdot 10^{-7}$	105,6	146,2
13	Min α_x	$E_y \geq 50 \text{ GPa}$	$[\pm 85.5/\pm 86.2/\pm 18/\pm 27]_s$	$-2,834 \cdot 10^{-10}$	$4,514 \cdot 10^{-7}$	102,6	140,9
14	Min α_y	$E_x \geq 100 \text{ GPa}$	$[\pm 65.8/\pm 2/\pm 69.1/0]_s$	$-4,529 \cdot 10^{-7}$	$1,627 \cdot 10^{-9}$	140,2	140,2
15	Min α_x	$E_x, E_y \geq 100 \text{ GPa}$	$[\pm 4/\pm 85.4/\pm 82/34.2]_s$	$-5,507 \cdot 10^{-10}$	$-5,347 \cdot 10^{-7}$	103,5	142,5
16	Min α_y	$E_x, E_y \geq 50 \text{ GPa}$	$[\pm 4/\pm 34.2/\pm 85.4/82]_s$	$-5,507 \cdot 10^{-10}$	$-5,504 \cdot 10^{-7}$	103,5	142,5

Tablo 6.4'te 16 katmanlı simetrik-dengeli karbon/epoksi kompozit plaka için sonuçlara bakıldığında model problemlerin (model problem 10 ve 14 hariç) α_x ve α_y değerlerinin 10^{-9} - 10^{-10} mertebesine kadar minimize edilebildiği görülmektedir. Bu değerler tabloda açık gri renk ile vurgulanmıştır. Ayrıca, E_x ve E_y elastisite modüllerinin, belirlenen kısıtları sağladığı ve hatta modül değerlerinin çok daha üzerine çıktığı görülmektedir. Bu durumlar tabloda koyu gri renk ile vurgulanmıştır.

Optimizasyonda ikinci olarak, geleneksel açılar ($0_2^\circ, \pm 45^\circ, 90_2^\circ$) ile elde edilen sonuçlar; 12 tabakalı kompozit plaka için Tablo 6.5'te (model problem 17 – 24), 16 tabakalı kompozit plaka için Tablo 6.6'da (model problem 25 – 32) verilmiştir.

Tablo 6.5. Geleneksel açılı 12 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Kısıt	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)	E_x (GPa)	E_y (GPa)
17	Min α_x	-	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
18	Min α_y	-	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
19	Min α_x	$E_x \geq 10$ GPa	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
20	Min α_y	$E_y \geq 10$ GPa	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
21	Min α_x	$E_y \geq 15$ GPa	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	35,12	79,75
22	Min α_y	$E_x \geq 30$ GPa	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	35,12	79,75
23	Min α_x	$E_x, E_y \geq 30$ GPa	$[0_2/\pm 45/90_2]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	89,58	115,1
24	Min α_y	$E_x, E_y \geq 15$ GPa	$[90_2/\pm 45/0_2]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	115,1	89,58

Tablo 6.6. Geleneksel açılı 16 katmanlı simetrik-dengeli $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3/\pm\theta_4]_s$ karbon/epoksi kompozit plakaların optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Kısıt	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)	E_x (GPa)	E_y (GPa)
25	Min α_x	-	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
26	Min α_y	-	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
27	Min α_x	$E_x \geq 10 \text{ GPa}$	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
28	Min α_y	$E_y \geq 10 \text{ GPa}$	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
29	Min α_x	$E_y \geq 10 \text{ GPa}$	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	13,32	13,32
30	Min α_y	$E_x \geq 30 \text{ GPa}$	$[\pm 45/\pm 45/\pm 45]_s$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	$-2,5653 \cdot 10^{-7}$	35,12	79,75
31	Min α_x	$E_x, E_y \geq 30 \text{ GPa}$	$[0_2/\pm 45/90_2]_s$	$2,4075 \cdot 10^{-7}$	$-5,6513 \cdot 10^{-7}$	115,1	115,1
32	Min α_y	$E_x, E_y \geq 15 \text{ GPa}$	$[90_2/\pm 45/0_2]_s$	$-5,6513 \cdot 10^{-7}$	$2,4075 \cdot 10^{-7}$	115,1	115,1

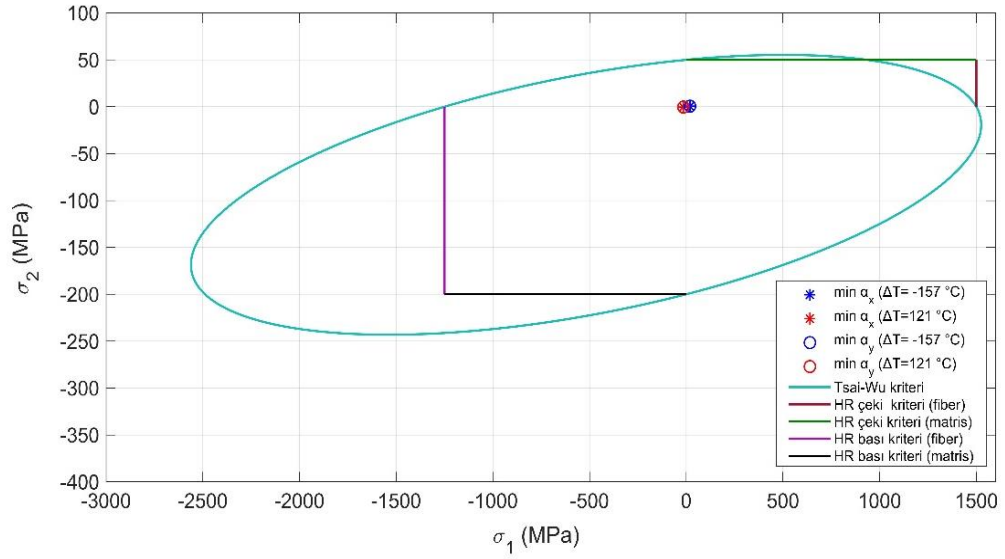
Tablo 6.5 ve 6.6'ya bakıldığında genel olarak α_x ve α_y termal genleşme katsayısı değerlerinin en fazla 10^{-7} mertebesine kadar minimize edilebildiği görülmüştür. Bunun sebebi, kullanılan açılarının sadece belirli açılar olmasıdır. Bunun yanında, tanımlanan E_x ve E_y kısıtları sağlanmış ve hatta model problemler 21 – 24 ve 30 – 32'de çok daha yüksek elastisite modülü değerleri elde edilmiştir.

6.3. Optimum Tasarımların Sıcaklık Değişimi Altındaki Performansı

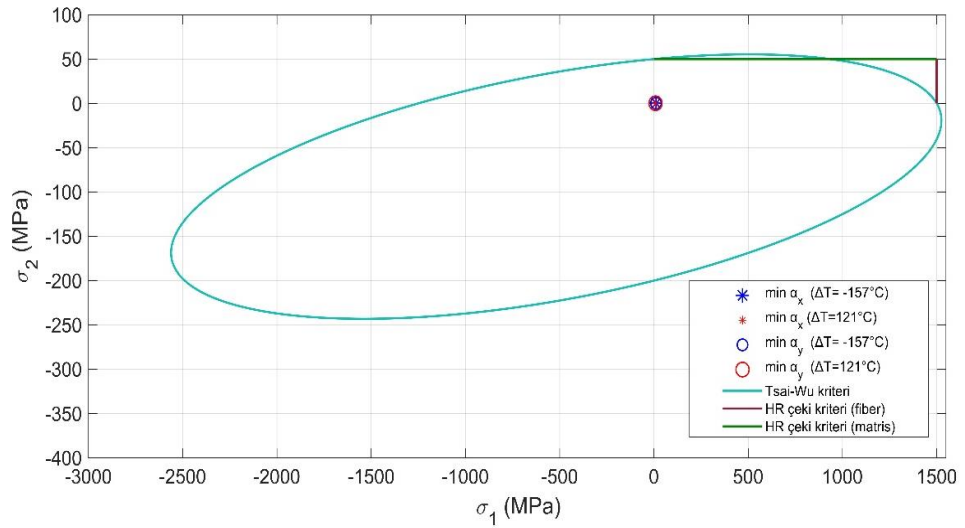
Maksimum boyutsal kararlılık için bulunan optimum açı dizilimindeki karbon/epoksi kompozit plakalar içerisinde bazı tasarımlar seçilmiş ve belirli sıcaklık değişimleri altında Tsai-Wu (TW) ve Hashin-Rotem (HR) hasar kriterleri dikkate alınarak güvenli olup olmadıkları araştırılmıştır. Seçilen tasarımlar E_x ve E_y kısıtlarını içeren 7-8, 15-16, 23-24 ve 31-32 olmak üzere 8 farklı model problemidir. Bu tasarımların (min α_x ve min α_y) boyutsal kararlılık performansları, ulaşılan maksimum sıcaklık farkları olan

$\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ için termal yükleme durumu uygulanarak test edilmiştir. (NASA, 2020).

Elde edilen sonuçlar Şekil 6.4 – 6.7 arasında sunulmuştur. Seçilmiş 12 tabakalı simetrik-dengeli kompozit plakaların sıcaklık değişimi altındaki dayanım performansları sırasıyla sürekli açılı tasarımlar için Şekil 6.4’te ve geleneksel açılı tasarımlar için Şekil 6.5’te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Optimum $\min \alpha_x [\pm 82/\pm 3/\pm 58.5]_s$, $\min \alpha_y [\pm 31/\pm 88.9/\pm 9.1]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin hasar teorilerine göre termal performansı

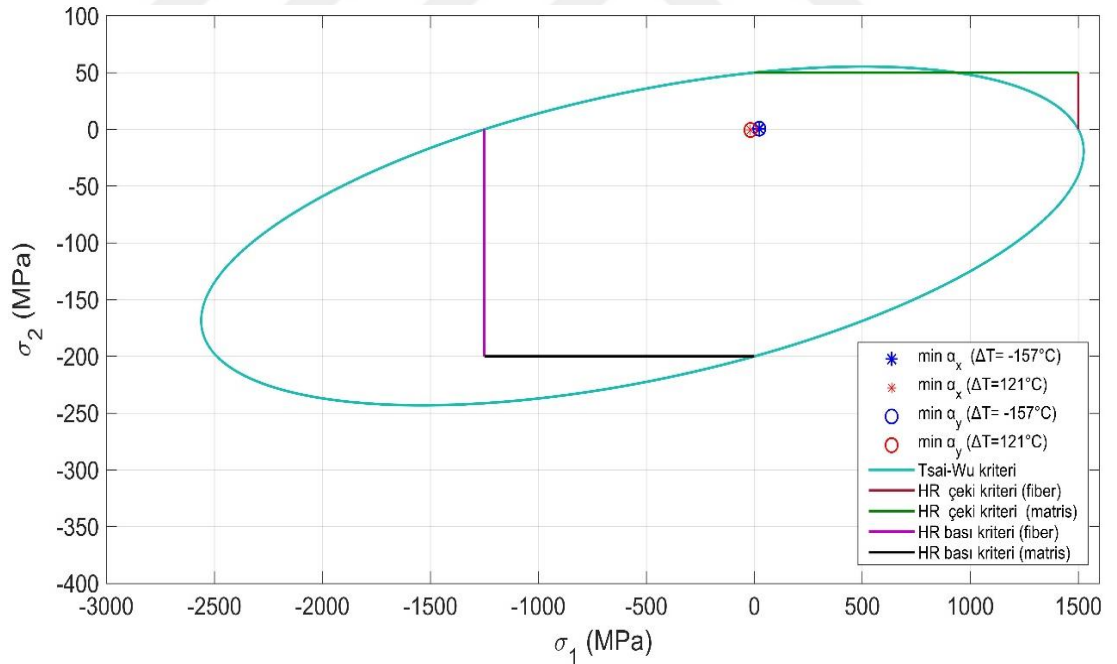


Şekil 6.5. Optimum $\min \alpha_x [0_2/\pm 45/90_2]_s$, $\min \alpha_y [90_2/\pm 45/0_2]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin hasar teorilerine göre termal performansı

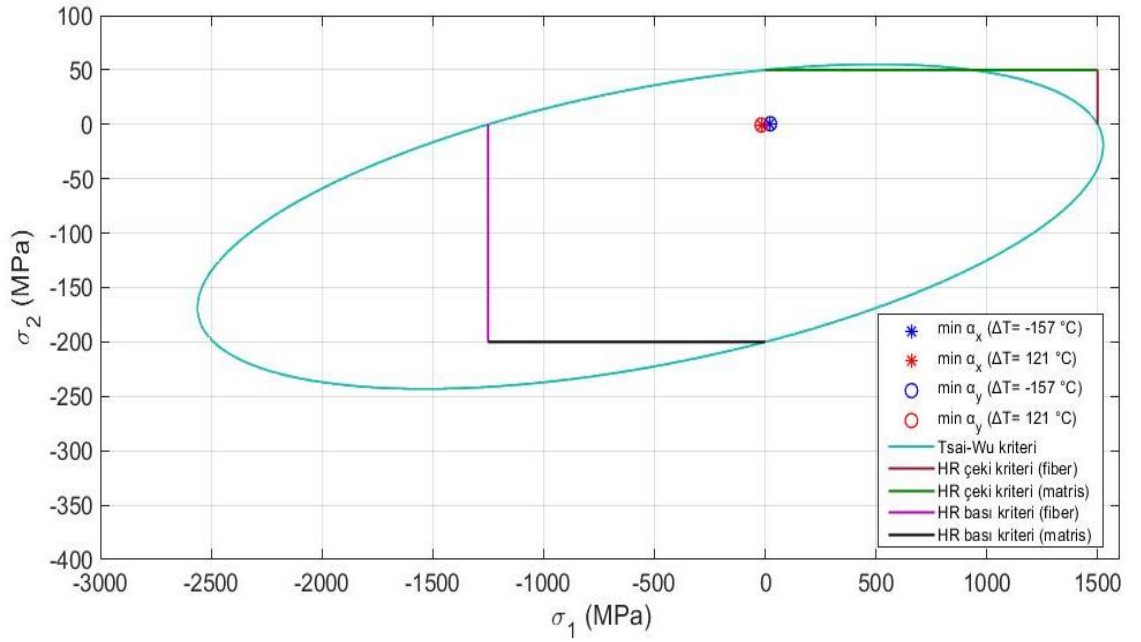
Şekil 6.4'ten sürekli açılı 12 katmanlı kompozit plakanın tasarımında, mavi renkle ifade edilen yani $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve kırmızı renkle ifade edilen yani $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ 'de min α_x ve min α_y değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende olduğu görülmektedir.

HR hasar kriterinde yeşil ve siyah renkler, sırasıyla matris yönünde çeki ve bası gerilmesini temsil etmekte, mor ve bordo renkler ise sırasıyla fiber yönünde bası ve çeki gerilmesini temsil etmektedir. Tasarımların bu kritere göre de güvende olduğu görülmektedir. Şekil 6.5'te ise seçilen geleneksel açılı kompozit plakanın tasarımlarının iki farklı termal sıcaklıkta min α_x ve min α_y değerlerinin yine aynı renklerle ifade edilen hem TW hasar kriteri hem de HR çeki kriterlerine göre güvende olduğu görülmektedir.

Seçilen 16 tabakalı simetrik-dengeli kompozit plakaların sıcaklık değişimi altındaki dayanım performansları sırasıyla sürekli açılı tasarımlar için Şekil 6.6'da ve geleneksel açılı tasarımlar için Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Optimum min $\alpha_x [\pm 4/\pm 85.4/\pm 82/34.2]_s$, min $\alpha_y [\pm 4/\pm 34.2/\pm 85.4/82]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 6.7. Optimum min α_x $[0_2/\pm 45/90_2]_s$, min α_y $[90_2/\pm 45/0_2]_s$ açılı dizilimli karbon/epoksi kompozitlerin hasar teorilerine göre termal performansı

16 tabakalı kompozit plakalı tasarımları incelendiğinde, önceki grafiklerdekine benzer olarak Şekil 6.6’da ve 6.7’de iki farklı termal yükleme altında ($\Delta T = -157$ °C ve $\Delta T = 121$ °C) min α_x ve min α_y değerleri için aynı renkler ile belirtilmiştir.

HR hasar kriterinde yeşil ve siyah renkler, sırasıyla matris yönünde çeki ve bası gerilmesini temsil etmekte, mor ve bordo renkler ise sırasıyla fiber yönünde bası ve çeki gerilmesini temsil etmektedir.

Şekil 6.6’da sürekli açılı tasarımların iki hasar kriterine göre de güvenli sınırlar içinde olduğu görülmektedir. Şekil 6.7’den geleneksel açılı kompozit plakanın tasarımlarının iki farklı termal sıcaklıkta min α_x ve min α_y değerlerinin sürekli açılı tasarım sonuçlarıyla benzer şekilde olduğu ve aynı renklerle ifade edilen hem TW hasar kriteri hem de HR çeki kriterlerine göre güvende olduğu görülmektedir.

7. HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELER İLE BOYUTSAL KARARLILIK OPTİMİZASYONU

Bir önceki bölümde, karbon/epoksi kompozitlerin fiber açısı dizilimi optimizasyonu GA/GPSA hibrit algoritma kullanılarak gerçekleştirildi. Tüm model problemlerin (1-32) hibrit olmayan tek malzemeli optimum tasarımları elde edildi ve boyutsal kararlılık performansı değerlendirildi.

Bu bölümde ise, çeşitli kompozit malzemelerden oluşan tabakalı hibrit kompozit plakaların boyutsal kararlılık optimizasyonu ele alınmıştır. Belirlenen kompozit malzemelerin hangi hibritlerinin plakada fiber açısı dizilimi optimizasyonu ile termal genleşme katsayılarını minimum değere ulaştırarak en fazla boyutsal kararlılığı sağlayacağı araştırılmıştır.

7.1. Problem Tanımı

Optimizasyonda 16 tabakalı hibrit kompozit plakanın maksimum boyutsal kararlılık için yapılan açısı dizilimi optimizasyonunda literatürden aynı matris malzemesinden sekiz farklı kompozit malzeme (Aramid/Epoksi, AS4/Epoksi, Boron/Epoksi, E-cam/Epoksi, IM6/Epoksi, GY70/Epoksi, Kevlar49/Epoksi ve Spektra/Epoksi) seçilmiştir (Adams vd., 2002). Bu malzemelerin özellikleri Tablo 7.1’de sunulmuştur.

Tablo 7.1. Tabakalı kompozit tasarımlarında kullanılan malzeme özellikleri (Adams vd., 2002)

Malzeme Özellği	Spektra / Epoksi	E-Cam/ Epoksi	Kevlar 49/Epoksi	AS4/ Epoksi	IM6/ Epoksi	Boron/ Epoksi	GY70/ Epoksi	Aramid / Epoksi
E_1 (GPa)	31	43	76	138	172	240	325	95
E_2 (GPa)	3,4	9,7	5,5	10,3	10,0	18,6	6,2	5,1
G_{12} (GPa)	1,4	6,2	2,1	6,9	6,2	6,6	5,2	1,8
ν_{12}	0,32	0,26	0,34	0,30	0,29	0,23	0,26	0,34
X_1^T (MPa)	1100	1070	1380	2275	2760	1590	760	2100
X_2^T (MPa)	8	38	30	52	50	60	26	1200
X_1^C (MPa)	83	870	275	1590	1540	2930	705	30
X_2^C (MPa)	48	185	138	207	152	200	70	130
S_6 (MPa)	24	72	43	131	124	108	27	30
$\alpha_1 (10^{-6} / ^\circ\text{C})$	-11	6,4	-2,0	-0,1	-0,4	4,5	-0,5	-3,6
$\alpha_2 (10^{-6} / ^\circ\text{C})$	120	16	57	18	18	20	1895	60

Hibrit kompozit optimizasyon problemleri matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Bul: $\{\theta_k, n\}$, $\theta_k \in \{-90:90\} \wedge \{0,45,90\}$, $k=1,...,n$

Minimize et: α_x, α_y (Tek Amaçlı Fonksiyon)

Kısıtlar: Simetri

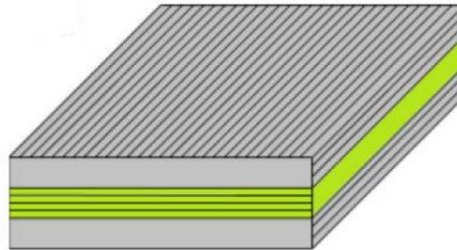
$[A/B/A/B/A/B/A/B]_s$ malzeme dizilimi

$[A/A/A/A/B/B/B/B]_s$ malzeme dizilimi

Algoritma: GA/GPSA hibrit algoritması (MATLAB Optimization Toolbox)

Görüldüğü üzere optimizasyonda fiber açılarının optimum dizilimleri, -90° - 90° sürekli açıları ve 0° , 45° , 90° geleneksel açılar kullanılarak ayrı ayrı bulunmuştur. Termal genleşme katsayıları α_x ve α_y , tek amaçlı fonksiyonlar olarak ele alınarak minimize edilmiştir. Problemlerde sadece simetri geometrik kısıdı uygulanmıştır. Böylece tasarım değişkenlerinin (θ_k) yani fiber açılarının sayısı $n=8$ olmaktadır. Bunun yanında, A ve B birbirinden farklı kompozit malzemelerden laminaları (tabakaları) göstermek üzere $[A/B/A/B/A/B/A/B]_s$ ve $[A/A/A/A/B/B/B/B]_s$ hibrit kompozit dizilimleri uygulanmıştır. Her bir tabakanın kalınlığı 0.125 mm alınmıştır. Amaç fonksiyonu ve hibrit algoritmanın çalıştırıldığı örnek kodlar Ek-2’de sunulmuştur.

Şekil 7.1’de örnek olarak iki farklı malzeme içeren bir hibrit kompozit plaka tasarım modeli gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Tabakalar arası hibrit kompozit plaka (Yu vd., 2015)

Hibrit kompozit plakaların sunulan iki farklı dizilimi şematik olarak Şekil 7.2 ve 7.3'te gösterilmektedir.

$+\theta_1$	A
$-\theta_1$	B
$+\theta_2$	A
$-\theta_2$	B
$+\theta_3$	A
$-\theta_3$	B
$+\theta_4$	A
$-\theta_4$	B
$-\theta_4$	B
$+\theta_4$	A
$-\theta_3$	B
$+\theta_3$	A
$-\theta_2$	B
$+\theta_2$	A
$-\theta_1$	B
$+\theta_1$	A

Şekil 7.2. 16 tabakalı hibrit kompozit plakaların $[A/B]_{4S}$ dizilimi

$+\theta_1$	A
$-\theta_1$	A
$+\theta_2$	A
$-\theta_2$	A
$+\theta_3$	B
$-\theta_3$	B
$+\theta_4$	B
$-\theta_4$	B
$-\theta_4$	B
$+\theta_4$	B
$-\theta_3$	B
$+\theta_3$	B
$-\theta_2$	A
$+\theta_2$	A
$-\theta_1$	A
$+\theta_1$	A

Şekil 7.3. 16 tabakalı hibrit kompozit plakaların $[4A/4B]_S$ dizilimi

7.2. Bulgular ve Tartışma

Hibrit kompozit malzeme optimizasyonu öncesinde hibrit kompozitler ile kıyaslama yapabilmek açısından minimum termal genleşme katsayılarını (α_x ve α_y) veren 16 tabakalı simetrik ve hibrit olmayan kompozit plakaların fiber açı dizilimi optimizasyonu sürekli ve geleneksel açılar için ayrı ayrı yapılmıştır.

Sürekli açılar (-90° - 90°) kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 7.2’de sunulmuştur.

Tablo 7.2. Sürekli açılı hibrit olmayan kompozit plakaların optimizasyon sonuçları

	Opt.	Malzemeler	Fiber Aç ı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
1	Min α_x	E-cam/ Epoksi	$[19_4/86/16/1/75]_s$	$8,0417 \cdot 10^{-6}$	$1,0595 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[73/90/90/90/90/90/90/90]_s$	$1,5816 \cdot 10^{-5}$	$6,3947 \cdot 10^{-6}$
2	Min α_x	Kevlar49 / Epoksi	$[84/81/88/59/83/89 /82/62]_s$	$4,1884 \cdot 10^{-6}$	$-7,5086 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[89/ 70 /67/75/86 /67/71/82]_s$	$6,3444 \cdot 10^{-6}$	$-2,9069 \cdot 10^{-6}$
3	Min α_x	AS4/ Epoksi	$[10/14/0/30/0/2/82/84]_s$	$5,3587 \cdot 10^{-9}$	$1,1134 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[58/44/28/90/34/90/21/26]_s$	$1,3947 \cdot 10^{-6}$	$-2,7594 \cdot 10^{-7}$
4	Min α_x	IM6/ Epoksi	$[79 /61 /8/88 /79 /75/88/88]_s$	$3,2160 \cdot 10^{-8}$	$3,2160 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[63/ 89 /89 /76/87/63/74/87]_s$	$1,2026 \cdot 10^{-8}$	$1,2026 \cdot 10^{-8}$
5	Min α_x	Gy70/ Epoksi	$[88/49/66/58/85/89/90/90]_s$	$1,4244 \cdot 10^{-6}$	$-3,2458 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[88/49/66/59/85/90/90/90]_s$	$1,4183 \cdot 10^{-6}$	$-3,2458 \cdot 10^{-7}$
6	Min α_x	Aramid/ Epoksi	$[65/81/73/7/16/65/14/31]_s$	$3,5661 \cdot 10^{-6}$	$-4,1119 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[41/9/73/50/79/59/42/81]_s$	$7,1708 \cdot 10^{-8}$	$3,4533 \cdot 10^{-6}$
7	Min α_x	Spektra/ Epoksi	$[21/82/5/60/19/12/42/11]_s$	$6,8621 \cdot 10^{-6}$	$-4,9593 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[56/28/20/30/42/66/83/86]_s$	$6,8260 \cdot 10^{-6}$	$-1,3531 \cdot 10^{-8}$
8	Min α_x	Boron/ Epoksi	$[26 /51/11/ 39 /68 /20 /55 /62]_s$	$1,4421 \cdot 10^{-8}$	$1,5168 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[74/ 50/ 30/ 14/ 69 /5 /36/ 5]_s$	$1,5299 \cdot 10^{-6}$	$1,3757 \cdot 10^{-9}$

Tabloya bakıldığında en iyi sonucun model problem 3’te, bulunan tasarım ile α_x değerinin en çok 10^{-9} mertebesinde minimize edilmesiyle bulunduğu görülmektedir. Benzer bir şekilde model problem 8’de elde edilen tasarım ile α_y değeri 10^{-9} mertebesine kadar minimize edilmiş ve y yönünde boyutsal kararlı hale gelmiştir.

Diğer en fazla minimize edilmiş termal genleşme katsayısı değerleri de gri renk ile vurgulanmıştır. Diğer taraftan genel olarak bulunan optimum tasarımlar ile termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-5} - 10^{-7} merteye aralığında olabilmektedir.

İkinci olarak geleneksel açılar (0° , 45° , 90°) kullanılarak elde edilen hibrit olmayan kompozit plaka optimizasyon sonuçları Tablo 7.3'te sunulmuştur.

Tablo 7.3. Geleneksel açılı hibrit olmayan kompozit plakaların optimizasyon sonuçları

	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x ($1/^\circ\text{C}$)	α_y ($1/^\circ\text{C}$)
9	Min α_x	E-cam/ Epoksi	$[0_3/45_5]_s$	$7,603 \cdot 10^{-6}$	$1,2081 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_4/45/90_2]_s$	$1,4571 \cdot 10^{-5}$	$6,4999 \cdot 10^{-6}$
10	Min α_x	Kevlar49 / Epoksi	$[0/90_7]_s$	$-1,2500 \cdot 10^{-7}$	$3,5625 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_6/45/90]_s$	$3,5625 \cdot 10^{-6}$	$-1,2500 \cdot 10^{-7}$
11	Min α_x	AS4/ Epoksi	$[45_8]_s$	$5,5937 \cdot 10^{-7}$	$5,5938 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[90_5/45/90/45]_s$	$1,1965 \cdot 10^{-6}$	$-7,7743 \cdot 10^{-8}$
12	Min α_x	IM6/ Epoksi	$[0/90_7]_s$	$-2,5000 \cdot 10^{-8}$	$1,1250 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$1,1250 \cdot 10^{-6}$	$-2,5000 \cdot 10^{-8}$
13	Min α_x	Gy70/ Epoksi	$[45_8]_s$	$5,4687 \cdot 10^{-7}$	$5,4687 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$1,1250 \cdot 10^{-6}$	$-3,1250 \cdot 10^{-8}$
14	Min α_x	Aramid/ Epoksi	$[45_8]_s$	$1,7625 \cdot 10^{-6}$	$1,7625 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$3,7500 \cdot 10^{-6}$	$-2,2500 \cdot 10^{-7}$
15	Min α_x	Spektra/ Epoksi	$[0/90_7]_s$	$-6,8750 \cdot 10^{-7}$	$7,5000 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$7,5000 \cdot 10^{-6}$	$-6,8750 \cdot 10^{-7}$
16	Min α_x	Boron/ Epoksi	$[0/45_2/90_2/90/45/90]_s$	$1,5818 \cdot 10^{-8}$	$1,5154 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90/45_2/90/45/90_3]_s$	$1,5154 \cdot 10^{-6}$	$1,5818 \cdot 10^{-8}$

Tablo 7.3'e bakıldığında Model problem 12'de α_x ve α_y tasarımlarının 10^{-8} mertebesinde olduğu ve diğerlerine göre daha küçük termal genleşme katsayısı elde edildiği görülmektedir. Model problem 11 ve 13'de ise sadece α_y tasarımında en çok boyutsal kararlı hale geldiği tespit edilmiştir. Bu en düşük değerlerin hepsi tabloda koyu gri renk ile vurgulanmıştır. Bu iki tabloda verilen tüm model problemlerin sonuçları karşılaştırıldığında, AS4/Epoksi kompozit plaka tasarımlarının (model problem 3-11)

daha düşük termal genleşme katsayısı değerinde olduğu ve boyutsal kararlılık performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

Hibrit olmayan kompozit malzemeler ile optimizasyonun ardından seçilen 8 farklı kompozit malzeme ile daha önceden tanımlanan iki farklı malzeme içeren iki farklı dizilim ile plakaların hibritleme işlemi yapılarak boyutsal kararlılık optimizasyonu çalışılmıştır.

İlk olarak $[A/B]_{45}$ hibrit dizilimi sürekli açılar kullanılarak çalışılmış ve elde edilen optimum fiber açı dizilimleri ve minimum termal genleşme katsayısı değerleri Tablo 7.4 – 7.11’de sunulmuştur (Model Problem 17 – 58).

Tablo 7.4’te E-cam/Epoksi kompozit malzemenin A malzemesi olduğu ve diğer 7 malzemenin B malzemesi olarak değiştirilerek bulunan sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.4. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
17	Min α_x	E-Cam	$[90/45/90/45/90/45/90/45]_s$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y	Spektra - Epoksi	$[0/45/0/45/0/45/0/45]_s$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$
18	Min α_x	E-Cam - Kevlar 49/	$[68/29/55/82/44/27/65/11]_s$	$1,1536 \cdot 10^{-8}$	$5,1309 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y	Epoksi	$[69/60/5/20/27/56/8/75]_s$	$5,7179 \cdot 10^{-6}$	$-6,2675 \cdot 10^{-9}$
19	Min α_x	E-Cam- IM6/Epoksi	$[84/26/74/32/59/21/75/28]_s$	$2,4508 \cdot 10^{-9}$	$2,1778 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[11/60/7/47/39/59/5/55]_s$	$2,2258 \cdot 10^{-6}$	$-1,1135 \cdot 10^{-8}$
20	Min α_x	E-Cam- GY70/Epoksi	$[90/8/50/28/77/20/88/26]_s$	$1,3056 \cdot 10^{-6}$	$-6,0097 \cdot 10^{-9}$
	Min α_y		$[22/50/9/48/57/60/30/69]_s$	$1,1608 \cdot 10^{-8}$	$1,3072 \cdot 10^{-6}$
21	Min α_x	E-Cam - AS4/Epoksi	$[49/71/22/41/90/88/90/65]_s$	$1,5622 \cdot 10^{-5}$	$-2,8600 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[1/0_2/4/0_2/4/39]_s$	$1,9562 \cdot 10^{-8}$	$1,6488 \cdot 10^{-5}$
22	Min α_x	E-Cam- Aramid/	$[29/0/88/1/31/0/21/41]_s$	$-2,4751 \cdot 10^{-8}$	$4,8580 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y	Epoksi	$[53/90/81/83/13/85/61/68]_s$	$-3,0797 \cdot 10^{-5}$	$4,8446 \cdot 10^{-8}$
23	Min α_x	E-Cam- Boron/Epoksi	$[0/-35/0/35/0/-35/0/35]_s$	$2,1022 \cdot 10^{-6}$	$1,0198 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[0_8]_s$	$3,8084 \cdot 10^{-6}$	$1,291 \cdot 10^{-5}$

Tabloya bakıldığında optimizasyon ile α_x ve α_y termal genleşme katsayısı değerlerinin 10^{-9} mertebesine kadar minimize edilebildiği görülmektedir. En düşük α_x , α_y , model problem 18-19’de elde edilmiştir. 10^{-8} – 10^{-9} arası değerler koyu gri vurgulanmıştır.

Tablo 7.5’te A malzemesinin Kevlar/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.5. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar49/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
24	Min α_x	Kevlar	$[58/0/0/0/0/0/0]_s$	$9,0914 \cdot 10^{-8}$	$1,5844 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y	Spektra - Epoksi	$[83/57/88/1/52/42/83/8]_s$	$1,5779 \cdot 10^{-5}$	$1,5779 \cdot 10^{-5}$
25	Min α_x	Kevlar 49- E-cam/ Epoksi	$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$
26	Min α_x	Kevlar 49- IM6/Epoksi	$[0/84/0/0/53/0/0/44]_s$	$-3,3993 \cdot 10^{-8}$	$1,6978 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[63/29/70/88/72/56/74/85]_s$	$1,6888 \cdot 10^{-5}$	$5,5429 \cdot 10^{-8}$
27	Min α_x	Kevlar 49- GY70/Epoksi	$[46/40/46/6/39/47/43/19]_s$	$-1,5392 \cdot 10^{-8}$	$1,4146 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[14/84/18/56/26/60/47/75]_s$	$1,4137 \cdot 10^{-5}$	$-6,1848 \cdot 10^{-9}$
28	Min α_x	Kevlar 49- AS4/Epoksi	$[0_5/9/1/0]_s$	$2,7186 \cdot 10^{-8}$	$1,1507 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[28/42/62/48/87/36/82/52]_s$	$1,1550 \cdot 10^{-5}$	$-1,6255 \cdot 10^{-8}$
29	Min α_x	Kevlar 49- Aramid/ Epoksi	$[65/38/30/48/57/52/55/7]_s$	$3,6536 \cdot 10^{-8}$	$3,3274 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[8/86/34/37_2/85/75/70]_s$	$2,8329 \cdot 10^{-5}$	$4,9816 \cdot 10^{-6}$
30	Min α_x	Kevlar 49- Boron/Epoksi	$[45/32/45/32/45/-32/45/-32]_s$	$3,4334 \cdot 10^{-6}$	$4,0769 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[53/71/53/71/53/71/53/71]_s$	$4,0876 \cdot 10^{-6}$	$3,5108 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.5’ten, görüldüğü üzere model problem 24-29’un sadece min α_x optimizasyonlarında 10^{-8} mertebesinde, model problem 26, 27 ve 28’in hem min α_x hem de min α_y optimizasyonlarında 10^{-8} ve 10^{-9} mertebesinde en düşük termal genleşme katsayısı değerleri elde edilebilmiştir. Bu mertebedeki tüm değerler gri renk ile vurgulanmıştır.

A malzemesinin Aramid/Epoksi olduğu hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçları Tablo 7.6 ‘da verilmiştir.

Tablo 7.6. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Aramid /Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
31	Min α_x	Aramid Spektra - Epoksi	$[43/53/1/41/54/75/3/2]_s$	$1,3945 \cdot 10^{-7}$	$5,1215 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[48/67/62/28/90/33/80/-1]_s$	$5,1546 \cdot 10^{-5}$	$-1,9162 \cdot 10^{-7}$
32	Min α_x	Aramid-Kevlar 49/ Epoksi	$[2/83/57/25/1/32/8/2]_s$	$9,1010 \cdot 10^{-8}$	$1,4050 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[25/75/84/18/65/348/20]_s$	$1,4140 \cdot 10^{-5}$	$1,3960 \cdot 10^{-9}$
33	Min α_x	Aramid- E-Cam/ Epoksi	$[42/84/33/64/33/82/10/80]_s$	$-1,1729 \cdot 10^{-10}$	$1,3037 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[51/1/59/7/79/11/60/42]_s$	$1,3045 \cdot 10^{-6}$	$3,6338 \cdot 10^{-9}$
34	Min α_x	Aramid-IM6/Epoksi	$[34/54/56/67/56/80/1/78]_s$	$9,6873 \cdot 10^{-8}$	$3,6634 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[79/43/66/19/39/58/88/82]_s$	$3,6662 \cdot 10^{-5}$	$6,8898 \cdot 10^{-8}$
35	Min α_x	Aramid-GY70/Epoksi	$[68/73/68/88/2/69/8/55]_s$	$-1,1786 \cdot 10^{-7}$	$-6,4479 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[51/75/52/47/66/45/89/15]_s$	$9,7842 \cdot 10^{-6}$	$3,4786 \cdot 10^{-5}$
36	Min α_x	Aramid-AS4/Epoksi	$[1/35/29/41/82/85/71/58]_s$	$-2,6349 \cdot 10^{-7}$	$3,9650 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[73/68/53/75/46/48/3/14]_s$	$3,9415 \cdot 10^{-5}$	$-2,9393 \cdot 10^{-8}$
37	Min α_x	Aramid-Boron/Epoksi	$[34/58/9/82/25/64/18/64]_s$	$-1,2779 \cdot 10^{-8}$	$2,6349 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/32/45/-32/45/-32/45/32]_s$	$2,9275 \cdot 10^{-6}$	$7,9372 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.6’ya bakıldığında genellikle tüm model problemlerde, boyutsal kararlılık seviyelerinin beklenen performansı karşıladığı belirlenmiştir. $10^{-8} - 10^{-10}$ arası değerler koyu gri ile 10^{-7} mertebesindeki değerler açık gri renk ile vurgulanmıştır. Özellikle, Kevlar 49/Epoksi, E-Cam/Epoksi ve IM6/Epoksi kompozit malzemeleri ile elde edilen hibrit kompozit plakaların model tasarımlarının (Bkz. model problem 32, 33 ve 34) diğer tasarımlara göre boyutsal kararlılık yönünden daha iyi olduğu görülmektedir.

A malzemesinin GY70/Epoksi olduğu hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçları Tablo 7.7 ‘de verilmiştir.

Tablo 7.7. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
38	Min α_x	GY70-Spektra - Epoksi	$[5/75/69/69/0/0/1/72]_s$	$2,6534 \cdot 10^{-8}$	$3,8923 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[67/41/37/78/89/46/76/40]_s$	$3,8949 \cdot 10^{-5}$	$1,1932 \cdot 10^{-9}$
39	Min α_x	GY70-Kevlar 49/ Epoksi	$[25/65/90/68/33/63/12/5]_s$	$-2,2366 \cdot 10^{-8}$	$1,4153 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[3/25/54/76/16/43/29/84]_s$	$1,4104 \cdot 10^{-5}$	$2,7420 \cdot 10^{-8}$
40	Min α_x	Gy70-IM6/Epoksi	$[41/8/52/23/51/8/27]_s$	$1,1924 \cdot 10^{-8}$	$1,1385 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90/35/35/7/64/39/42/44]_s$	$1,1401 \cdot 10^{-5}$	$-3,8628 \cdot 10^{-9}$
41	Min α_x	Gy70- E-Cam/ Epoksi	$[37/43/18/74/22/64/23/38]_s$	$-1,8190 \cdot 10^{-8}$	$1,3181 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[28/5/20/7/29/14/20/22]_s$	$1,3108 \cdot 10^{-6}$	$1,8696 \cdot 10^{-8}$
42	Min α_x	Gy70-AS4/Epoksi	$[82/10/37/9/84/54/83/48]_s$	$8,0163 \cdot 10^{-7}$	$-1,2367 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[1/0/1/2/0_3/-1]_s$	$3,1808 \cdot 10^{-8}$	$5,3994 \cdot 10^{-6}$
43	Min α_x	Gy70-Aramid/ Epoksi	$[49/36/49/67/73/35/46/31]_s$	$-2,5290 \cdot 10^{-7}$	$1,4687 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[89/80/22/80/0/88/60/67]_s$	$1,4385 \cdot 10^{-5}$	$4,9351 \cdot 10^{-8}$
44	Min α_x	Gy70-Boron/Epoksi	$[41/80/46/79/49/64/4/85]_s$	$4,6718 \cdot 10^{-7}$	$2,4544 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[72/14/63/33/72/6/65/2]_s$	$2,6204 \cdot 10^{-6}$	$-4,2191 \cdot 10^{-9}$

Tablo 7.7’de termal genleşme katsayılarının $10^{-7} - 10^{-9}$ mertebesinde olduğu pek çok tasarım elde edilmiştir. En düşük α_x değeri model problem 39 tasarımı ile $-2,2366 \cdot 10^{-8}$ 1/°C olarak, en düşük α_y değeri de model problem 44’de min α_y tasarımı ile $-4,2191 \cdot 10^{-9}$ 1/°C olarak elde edilmiştir. Öte yandan model problem 42 ‘de min α_x optimizasyonunda α_x ’e göre α_y daha fazla ve min α_y optimizasyonunda α_y ’ye göre α_x daha fazla minimize edilmiştir.

A malzemesi AS4/Epoksi olacak şekilde oluşturulan hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçları Tablo 7.8’de sunulmuştur.

Tablo 7.8. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-AS4/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
45	Min α_x	AS4 Spektra - Epoksi	$[19/1/0/1/0/1/-1/1]_s$	$-1,1329 \cdot 10^{-8}$	$1,4595 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[49/10/85/31/71/28/87/54]_s$	$1,4540 \cdot 10^{-5}$	$4,3517 \cdot 10^{-8}$
46	Min α_x	AS4- E-Cam/ Epoksi	$[39/89/42/83/42/84/39/83]_s$	$-5,4662 \cdot 10^{-9}$	$2,6115 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[50/4/53/4/50/4/50/4]_s$	$1,2729 \cdot 10^{-6}$	$1,4327 \cdot 10^{-6}$
47	Min α_x	AS4- IM6/Epoksi	$[1/2/1/-1/2/0/2/1]_s$	$8,4299 \cdot 10^{-9}$	$7,9839 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[77/38/80/70/54/18/67/5]_s$	$8,0075 \cdot 10^{-6}$	$-1,5086 \cdot 10^{-8}$
48	Min α_x	AS4- GY70/Epoksi	$[1/86/1/2/1/-1_2/0]_s$	$6,4736 \cdot 10^{-9}$	$5,3934 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[74/50/73/77/69/14/38/34]_s$	$5,4123 \cdot 10^{-6}$	$-1,2453 \cdot 10^{-8}$
49	Min α_x	As4-Kevlar 49/ Epoksi	$[89/-1/1/0_3/7/2]_s$	$-3,4388 \cdot 10^{-10}$	$1,1534 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[55/30/62/50/80/51/64/90]_s$	$1,1512 \cdot 10^{-5}$	$2,1798 \cdot 10^{-8}$
50	Min α_x	AS4-Aramid/ Epoksi	$[47/54/19/0/66/3/20/10]_s$	$4,7703 \cdot 10^{-8}$	$2,4953 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90/77/53/69/51/77/43/38]_s$	$2,4941 \cdot 10^{-5}$	$6,0218 \cdot 10^{-8}$
51	Min α_x	AS4- Boron/Epoksi	$[45/90/45/82/45/90/45/82]_s$	$1,7397 \cdot 10^{-6}$	$3,3066 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/-17/45/-17/45/17/45/17]_s$	$3,3878 \cdot 10^{-6}$	$1,7243 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.8’den α_x değerinin en çok 10^{-10} mertebesine ve α_y değerinin 10^{-8} mertebesine kadar minimize edildiği ve hibrit kompozit plaka tasarımının x yönünde daha boyutsal kararlı hale geldiği gözlemlenmektedir. Bu düşük değerler tabloda gri renk ile vurgulanmıştır. En düşük termal genleşme katsayıları yani maksimum boyutsal kararlılık, model problem 49’da $-3,4388 \cdot 10^{-10}$ 1/°C ve $2,1798 \cdot 10^{-8}$ 1/°C değerleri ile sağlanmıştır.

A malzemesi IM6/Epoksi olacak şekilde oluşturulan hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçları Tablo 7.9’da sunulmuştur.

Tablo 7.9. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-İm6/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/°C)	α_y (1/°C)
52	Min α_x	İm6 Spektra - Epoksi	$[23/30/14/40/31/1/24]_s$	$-2,5871 \cdot 10^{-8}$	$1,4897 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[86/46/90/62/33/59/15]_s$	$1,4818 \cdot 10^{-5}$	$5,3696 \cdot 10^{-8}$
53	Min α_x	İm6- E-Cam/ Epoksi	$[49/82/26/89/39/77/34/88]_s$	$-8,7379 \cdot 10^{-9}$	$2,2123 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[67/18/53/7/61/15/64/16]_s$	$2,1922 \cdot 10^{-6}$	$-1,2133 \cdot 10^{-8}$
54	Min α_x	İm6-Kevlar 49/ Epoksi	$[16/64/5/30/38/57/73/18]_s$	$4,3023 \cdot 10^{-8}$	$1,2135 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[82/42/62/15/28/14/72/89]_s$	$1,2146 \cdot 10^{-5}$	$3,2061 \cdot 10^{-8}$
55	Min α_x	İm6- GY70/Epoksi	$[39/10/49/20/24/38/52/49]_s$	$1,1330 \cdot 10^{-5}$	$6,7271 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[21/41/42/57/38/88/82/67]_s$	$1,1482 \cdot 10^{-5}$	$-8,4917 \cdot 10^{-8}$
56	Min α_x	İm6- AS4/Epoksi	$[-1_2/2/1/0/1/2_2]$	$-1,4599 \cdot 10^{-9}$	$7,9938 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[6/50/36/76/64/44/82/86]_s$	$7,9914 \cdot 10^{-6}$	$9,3575 \cdot 10^{-10}$
57	Min α_x	İm6-Aramid/ Epoksi	$[0_3/1/14/1/72/0]_s$	$2,7208 \cdot 10^{-8}$	$2,2031 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[70/40/56/44/20/54/76]_s$	$1,1517 \cdot 10^{-5}$	$1,0541 \cdot 10^{-5}$
58	Min α_x	İm6- As4/Epoksi	$[-1_2/2/1/0/1/2_2]$	$-1,4599 \cdot 10^{-9}$	$7,9938 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[6/50/36/76/64/44/82/86]_s$	$7,9914 \cdot 10^{-6}$	$9,3575 \cdot 10^{-10}$

Tabloya bakıldığında genel olarak çoğu tasarım minimum sonuç vermiştir ama en iyi optimizasyon sonuçları model problem 53, 56 ve 58’de, α_x ve α_y değerinin 10^{-8} - 10^{-10} mertebesine kadar minimize edildiği ve hibrit kompozit plaka tasarımının x ve y yönünde boyutsal kararlı hale geldiği gözlemlenmektedir. Tüm göreceli minimum değerler, tabloda gri renk ile vurgulanmıştır. Öte yandan, diğer problemlerde bulunan optimum tasarımlar ile termal genleşme katsayısı değerleri $10^{-5} - 10^{-7}$ mertebe aralığında olabilmektedir.

Çalışmada A malzemesi Boron/Epoksi olacak şekilde oluşturulan hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçları Tablo 7.10’da sunulmuştur.

Tablo 7.10. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Boron/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
59	Min α_x	Boron	$[-32/45/32/45/-32/45/32/45]_s$	$2,9275 \cdot 10^{-6}$	$7,9372 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y	Spektra - Epoksi	$[58/45/58/-45/-58/45/-58/45]_s$	$7,9372 \cdot 10^{-6}$	$2,9275 \cdot 10^{-6}$
60	Min α_x	Boron- Kevlar 49/	$[-32/45/32/45/32/45/-32/45]_s$	$3,4334 \cdot 10^{-6}$	$4,0769 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y	Epoksi	$[71/53/71/53/71/53/71/53]_s$	$4,0876 \cdot 10^{-6}$	$3,5108 \cdot 10^{-6}$
61	Min α_x	Boron- E-Cam/ Epoksi	$[33/74/-4/74/35/74/33/74]_s$	$-1,474 \cdot 10^{-9}$	$4,2504 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[78/-4/64/-7/-53/-4/-38/-5]_s$	$3,8566 \cdot 10^{-6}$	$8,2135 \cdot 10^{-9}$
62	Min α_x	Boron- IM6/Epoksi	$[90/46/90/46/78/46/78/46]_s$	$1,0183 \cdot 10^{-6}$	$3,2584 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[21/45/21/45/-21/45/-21/45]_s$	$3,4216 \cdot 10^{-6}$	$9,7190 \cdot 10^{-7}$
63	Min α_x	Boron- GY70/Epoksi	$[4/0/2/45/0_2/1_2]_s$	$-1,1719 \cdot 10^{-6}$	$1,6697 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[88/82/45/64/71/87/46/89]_s$	$5,3271 \cdot 10^{-5}$	$2,3993 \cdot 10^{-8}$
64	Min α_x	AS4- Boron/Epoksi	$[45/90/45/82/45/90/45/82]_s$	$1,7397 \cdot 10^{-6}$	$3,3066 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/-17/45/-17/45/17/45/17]_s$	$3,3878 \cdot 10^{-6}$	$1,7243 \cdot 10^{-6}$
65	Min α_x	Boron- Aramid/ Epoksi	$[67/0/69/0/69/0_2/41]_s$	$3,4096 \cdot 10^{-5}$	$2,8011 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[62/55/89/83/63/89/80/88]_s$	$4,8327 \cdot 10^{-5}$	$7,7808 \cdot 10^{-8}$

Tablo 7.10'dan görüldüğü gibi Boron/Epoksi hibrit kompozit tasarımlarının hemen hemen hepsinde optimum fiber açı tasarımlarıyla elde edilebilen minimum α_x değerleri en fazla $10^{-5} - 10^{-6}$ merteye aralığında olabilmektedir. Bununla birlikte, en iyi optimizasyon sonucu model problem 61'de α_x ve α_y tasarımlarının 10^{-9} mertebesinde kadar minimize edilmiş ve kompozit x ve y yönünde boyutsal kararlı hale gelmiştir. Model problem 62, 63 ve 65'te min α_y optimizasyonunun sonucunun 10^{-8} mertebesine kadar minimize edildiği ve hibrit kompozitin sadece y yönünde boyutsal kararlaştırıldığı görülmektedir.

Son olarak, sürekli açılar kullanılarak ve A malzemesi Spektra/Epoksi olacak şekilde oluşturulan hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçları Tablo 7.11'de gösterilmiştir.

Tablo 7.11. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (Spektra/Epoksi-A) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
66	Min α_x	Spektra- E-Cam/ Epoksi	$[65_4/70/83/14/22]_s$	$3,9358 \cdot 10^{-6}$	$4,0088 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[25_4/85/31/1/46]_s$	$3,9841 \cdot 10^{-6}$	$3,9212 \cdot 10^{-6}$
67	Min α_x	Spektra- Kevlar 49/ Epoksi	$[0/73/83/59/7/87/8/35]_s$	$2,2838 \cdot 10^{-8}$	$3,1786 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45/81/59/20/90/28/46/56]_s$	$3,2031 \cdot 10^{-5}$	$-2,2221 \cdot 10^{-7}$
68	Min α_x	Spektra- IM6/Epoksi	$[76/47/4/44/38/12/10/58]_s$	$-1,1716 \cdot 10^{-7}$	$1,7015 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[47/75/32/43/88/44/65/19]_s$	$1,6812 \cdot 10^{-5}$	$8,5232 \cdot 10^{-8}$
69	Min α_x	Spektra- GY70/Epoksi	$[59/1/0/41/0/16/51/0]_s$	$-3,9584 \cdot 10^{-8}$	$1,5974 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[22/65/56/52/78/88/14/88]_s$	$1,5889 \cdot 10^{-5}$	$4,5156 \cdot 10^{-8}$
70	Min α_x	Spectra- AS4/Epoksi	$[0_2/82/0/19/0_3]_s$	$3,4560 \cdot 10^{-9}$	$1,4580 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[27/17/75/50/63/64/76/90]_s$	$1,4609 \cdot 10^{-5}$	$-2,6099 \cdot 10^{-8}$
71	Min α_x	Spektra- Aramid/ Epoksi	$[43/35/90/5/0/11/44/17]_s$	$-2,3099 \cdot 10^{-9}$	$4,3872 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[52/85/36/53/83/46/56/86]_s$	$4,3872 \cdot 10^{-5}$	$-8,9191 \cdot 10^{-9}$
72	Min α_x	Spektra- Boron/Epoksi	$[45/32/45/-32/45/-32/45/32]_s$	$2,9275 \cdot 10^{-6}$	$7,9372 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[48/64/48/90/48/90/48/90]_s$	$8,5399 \cdot 10^{-6}$	$3,8036 \cdot 10^{-6}$

Tablodan anlaşıldığı üzere en iyi optimizasyon sonuçları model problem 69, 70 ve 71’de, α_x ve α_y değerinin 10^{-8} - 10^{-9} mertebesine kadar minimize edildiği ve hibrit kompozit plaka tasarımının x ve y yönünde boyutsal kararlı hale geldiği gözlemlenmektedir. Diğer model tasarımlarının genelinde termal genleşme katsayısı değerlerinin $10^{-5} - 10^{-6}$ mertebe aralığında kaldığı görülmektedir.

Tablo 7.4-7.11’de toplamda sekiz tabloda kullanılan E-cam/Epoksi, Kevlar 49/Epoksi, Aramid/Epoksi, GY70/Epoksi ve AS4/Epoksi kompozit malzemeleri ile elde edilen hibrit kompozit plaka tasarımlarının, genellikle boyutsal kararlılık performansı yönünden iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu sebeple, $[A/B]_{45}$ diziliminde sürekli açılar kullanılarak elde edilen bu hibrit tasarımlar seçilmiş ve geleneksel açılar (0° , 45° ve 90°) kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Elde edilen optimum fiber açı dizilimleri ve minimum termal genleşme katsayısı değerleri Tablo 7.12 – 7.16 arasında sunulmuştur (Model Problem 72 – 106).

E-cam/Epoksi hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo 7.12’de gösterilmiştir.

Tablo 7.12. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
73	Min α_x	E-cam-Spektra/Epoksi	$[90/45/90/45/90/45/90/45]_s$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0/45/0/45/0/45/0/45]_s$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$
74	Min α_x	E-cam-Kevlar 49/Epoksi	$[90_2/45/90_2/45/90/45]_s$	$3,9265 \cdot 10^{-8}$	$5,0943 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0/45_3/90/45_2/90]_s$	$5,8601 \cdot 10^{-6}$	$3,5277 \cdot 10^{-8}$
75	Min α_x	E-cam-IM6/Epoksi	$[90/45_3/90/5/90/45]_s$	$-8,2011 \cdot 10^{-8}$	$2,3212 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_2/0/45/0/45/0/45]_s$	$2,3212 \cdot 10^{-6}$	$-8,2011 \cdot 10^{-8}$
76	Min α_x	E-cam-GY70/Epoksi	$[45_6/90/45]_s$	$7,9853 \cdot 10^{-8}$	$1,2666 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0/45/0/45/0/45/0/90]_s$	$1,2028 \cdot 10^{-6}$	$1,1590 \cdot 10^{-7}$
77	Min α_x	Eglass-As4/Epoksi	$[0_6/45/0]_s$	$3,7172 \cdot 10^{-8}$	$1,6428 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_7/45]_s$	$1,6428 \cdot 10^{-5}$	$3,7172 \cdot 10^{-8}$
78	Min α_x	E-cam-Aramid/Epoksi	$[90/0/90/0/90/45/90/45]_s$	$-5,1438 \cdot 10^{-8}$	$4,9548 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90/45/90/45/90/45/90/90]_s$	$5,4048 \cdot 10^{-5}$	$2,8893 \cdot 10^{-7}$
79	Min α_x	E-cam-Boron/Epoksi	$[0_5/45/0_0]_s$	$3,7028 \cdot 10^{-6}$	$3,7028 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_3/45/90_4]_s$	$3,7028 \cdot 10^{-5}$	$3,7028 \cdot 10^{-6}$

Tablodan E-cam-Spektra/Epoksi ve E-cam-Boron/Epoksi hibrit tasarımı (model problem 73-79) haricinde diğer tüm tasarım modellerinde boyutsal kararlılık performansının iyileştirildiği görülmektedir. Sürekli açı kullanılarak yapılan optimizasyon sonuçları (Tablo 7.4) ile kıyaslandığında ise geleneksel açılı tasarımlar ile genel olarak daha düşük α_x ve α_y değerleri elde edildiği ve $10^{-7} - 10^{-8}$ mertebe aralığında kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 7.13'te Kevlar49/Epoksi hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 7.13. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A- Kevlar49/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
80	Min α_x	Kevlar 49- Spektra/Epoksi	$[0/90/45_6]_s$	$1,9861 \cdot 10^{-6}$	$3,6964 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45_2/90_2/45_2/90_2]_s$	$3,9169 \cdot 10^{-5}$	$-2,1883 \cdot 10^{-7}$
81	Min α_x	Kevlar 49- E- Cam/ Epoksi	$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$
82	Min α_x	Kevlar 49- IM6/Epoksi	$[0/45_2/0_6]_s$	$1,6888 \cdot 10^{-5}$	$5,5425 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[45/0/90/0/90/45_3]_s$	$3,1899 \cdot 10^{-7}$	$1,7263 \cdot 10^{-5}$
83	Min α_x	Kevlar 49- GY70/Epoksi	$[90/0/45_6]_s$	$2,8727 \cdot 10^{-7}$	$1,3844 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[0/45/0/90/0/90/0/90]_s$	$1,4092 \cdot 10^{-5}$	$3,8510 \cdot 10^{-8}$
84	Min α_x	Kevlar 49- As4/Epoksi	$[45_4/0/45_3]_s$	$-5,5543 \cdot 10^{-5}$	$1,2090 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$1,1608 \cdot 10^{-5}$	$-7,3619 \cdot 10^{-8}$
85	Min α_x	Kevlar 49- Aramid/ Epoksi	$[0/45_6/0]_s$	$-5,3133 \cdot 10^{-7}$	$4,6073 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_3/45/90/45_2/90]_s$	$4,5773 \cdot 10^{-6}$	$-2,3086 \cdot 10^{-7}$
86	Min α_x	Kevlar 49- Boron / Epoksi	$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$3,5451 \cdot 10^{-6}$	$4,1167 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$4,1167 \cdot 10^{-6}$	$3,5451 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.13'te, model problemlerin α_x ve α_y değerlerinin $10^{-7} - 10^{-8}$ olmak üzere bir mertebe aralığında elde edildiği görülmektedir. En minimum termal genleşme katsayıları model problem 83'deki optimum tasarımlarla bulunmuştur. Bu sonuçların hepsi tabloda gri renk ile vurgulanmıştır. Kevlar49/ Epoksi kompozit plakanın tüm sürekli açılı hibrit tasarımlarıyla geleneksel açılı hibrit tasarım modelleri karşılaştırıldığında, x ve y yönündeki ısı genleşme katsayıları değerlerinin genel olarak sürekli açılarla elde edilen tasarımlarda daha iyi olduğu ve boyutsal kararlılık performansının daha iyi bir seviyeye ulaştığı söylenebilir.

Aramid/Epoksi hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo 7.14'te gösterilmiştir.

Tablo 7.14. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A- Aramid/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
87	Min α_x	Aramid-Spektra/Epoksi	$[45_3/90/0/90/0/45]_s$	$2,6635 \cdot 10^{-7}$	$4,3603 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45_3/90/45/90/0/45]_s$	$4,3603 \cdot 10^{-5}$	$2,6635 \cdot 10^{-7}$
88	Min α_x	Aramid-Kevlar 49/Epoksi	$[90/0/90/45_2/0/90/45]_s$	$4,9900 \cdot 10^{-5}$	$2,9235 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[45_2/0/45_5]_s$	$2,9235 \cdot 10^{-8}$	$4,9900 \cdot 10^{-5}$
89	Min α_x	Aramid-E-cam/Epoksi	$[45_7/90]_s$	$7,9853 \cdot 10^{-8}$	$1,2666 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/90/0]_s$	$1,2028 \cdot 10^{-6}$	$1,1590 \cdot 10^{-7}$
90	Min α_x	Aramid-IM6/Epoksi	$[0/90/90/0/90/0/90/0/45]_s$	$-8,6769 \cdot 10^{-7}$	$2,2926 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_5/45/90_2]_s$	$2,2926 \cdot 10^{-5}$	$-8,6769 \cdot 10^{-7}$
91	Min α_x	Aramid-GY70/Epoksi	$[0_4/45_2/0_2]_s$	$-1,6314 \cdot 10^{-6}$	$2,9831 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90/45_6/90]_s$	$2,8601 \cdot 10^{-5}$	$-4,0097 \cdot 10^{-7}$
92	Min α_x	Aramid-AS4/Epoksi	$[45_3/0/90/45_3]_s$	$3,2255 \cdot 10^{-7}$	$3,9063 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45_3/90/0/45_3]_s$	$3,9063 \cdot 10^{-5}$	$3,2255 \cdot 10^{-7}$
93	Min α_x	Aramid-Boron/Epoksi	$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$2,4888 \cdot 10^{-6}$	$3,4218 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$3,4218 \cdot 10^{-6}$	$2,4888 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.14'e bakıldığında Aramid/Epoksi hibritlerinin büyük çoğunluğunda gri renk ile vurgulandığı üzere termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-7} mertebesinde elde edilmiştir. En minimum değere $\alpha_x = 7,9853 \cdot 10^{-8} 1/^\circ\text{C}$ ile model problem 89'da ulaşılmıştır. Problemlerde x yönü y yönüne göre daha boyutsal kararlı haldedir. Aramid/ Epoksi kompozit tüm sürekli açılı hibrit tasarımlarıyla geleneksel açılı hibrit tasarım modelleri karşılaştırıldığında, pek çok tasarımda sürekli açılar kullanılarak bulunan optimum dizilimlerin geleneksel açılar ile yapılan tasarımlardan daha düşük α_x ve α_y değerleri verdiği söylenebilir.

Devamında, GY70/Epoksi hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo 7.15'te gösterilmiştir.

Tablo 7.15. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A- GY70/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
94	Min α_x	Gy70-Spektra/Epoksi	$[0/45_7]_s$	$-2,1054 \cdot 10^{-7}$	$1,6145 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90/45/90/0/45/0/45/0]_s$	$1,5838 \cdot 10^{-5}$	$9,6472 \cdot 10^{-8}$
95	Min α_x	GY70-Kevlar 49/ Epoksi	$[45_4/90/45_2/0]_s$	$-3,6668 \cdot 10^{-7}$	$1,4168 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_4/45/90_3]_s$	$1,4168 \cdot 10^{-5}$	$-3,6818 \cdot 10^{-8}$
96	Min α_x	Gy70-E-cam/Epoksi	$[45_3/90/45_3/90]_s$	$7,9853 \cdot 10^{-8}$	$1,2666 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/90/0]_s$	$1,2028 \cdot 10^{-6}$	$1,1590 \cdot 10^{-7}$
97	Min α_x	Gy70-IM6/Epoksi	$[0/90/0/90/0/90/45/90]_s$	$2,8254 \cdot 10^{-7}$	$1,1114 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45_4/90_4]_s$	$1,1504 \cdot 10^{-5}$	$-1,0670 \cdot 10^{-7}$
98	Min α_x	Gy70-AS4/Epoksi	$[45_8]_s$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$5,3640 \cdot 10^{-6}$	$3,5850 \cdot 10^{-8}$
99	Min α_x	Gy70-Aramid/Epoksi	$[0/45_2/0/45_3/0]_s$	$-4,0097 \cdot 10^{-7}$	$2,8601 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45/90/45_2/90/45_3]_s$	$2,8601 \cdot 10^{-5}$	$-4,0097 \cdot 10^{-7}$
100	Min α_x	Gy70-Boron/Epoksi	$[45/90/45_5/90]_s$	$2,8872 \cdot 10^{-6}$	$2,5032 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/90/0]_s$	$9,1449 \cdot 10^{-8}$	$3,6559 \cdot 10^{-7}$

Tablo 7.15'ten genel olarak optimizasyon sonucunda 10^{-7} ve 10^{-8} mertebelerinde minimum α_x ve α_y değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler gri renk ile vurgulanmıştır.

Bununla birlikte min α_y optimizasyonlarında min α_x optimizasyonlarına göre daha fazla minimum değer elde edilebilmiştir ve dolayısıyla bulunan optimum tasarımların y yönünde daha boyutsal kararlı halde olduğu söylenebilir. Ayrıca tüm sürekli açılı hibrit tasarımlarıyla (Tablo 7.7) geleneksel açılı hibrit tasarım modelleri karşılaştırıldığında, bazı tasarımlarda sürekli açılı tasarımların gelenek açılı tasarımlara göre daha minimum α_x ve α_y değerleri verdiği söylenebilir.

Son olarak, Tablo 7.16'da AS4/Epoksi ile yapılan hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 7.16. $[A/B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A- AS4/Epoksi) geleneksel açılı optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
101	Min α_x	AS4-Spektra/Epoksi	$[0/90/0/45_s]_s$	$1,8388 \cdot 10^{-8}$	$1,4565 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45/0/90/45/90/45_3]_s$	$1,4565 \cdot 10^{-5}$	$1,8388 \cdot 10^{-8}$
102	Min α_x	AS4-E-Cam/Epoksi	$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$-3,9553 \cdot 10^{-8}$	$2,6416 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$2,6416 \cdot 10^{-6}$	$-3,9553 \cdot 10^{-8}$
103	Min α_x	AS4-Kevlar 49/Epoksi	$[90/45_3/90/45_2/0]_s$	$-2,9896 \cdot 10^{-7}$	$1,1833 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$-7,3619 \cdot 10^{-5}$	$1,1608 \cdot 10^{-8}$
104	Min α_x	AS4-IM6/Epoksi	$[45/90/45_6]_s$	$8,0512 \cdot 10^{-7}$	$7,1873 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$8,0123 \cdot 10^{-6}$	$-1,9915 \cdot 10^{-8}$
105	Min α_x	AS4-GY70/Epoksi	$[45_8]_s$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$5,3640 \cdot 10^{-6}$	$3,5850 \cdot 10^{-8}$
106	Min α_x	AS4-Aramid/Epoksi	$[90/45_6/0]_s$	$3,2255 \cdot 10^{-7}$	$3,9063 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[0/45_2/90/45_4]_s$	$3,9063 \cdot 10^{-5}$	$3,2255 \cdot 10^{-7}$
107	Min α_x	AS4-Boron/Epoksi	$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$1,7403 \cdot 10^{-6}$	$3,2993 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$3,2993 \cdot 10^{-6}$	$1,7403 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.16’da görüldüğü ve vurgulandığı gibi, model problemlerin çoğunda termal genleşme katsayıları 10^{-8} gibi küçük mertebelerde bulunmuştur ve en iyi optimizasyon sonucu model problem 106’da elde edilmiştir. Ayrıca AS4/Epoksinin tüm sürekli açılı hibrit tasarımlarıyla (Tablo 7.8) geleneksel açılı hibrit tasarımları karşılaştırıldığında, ikisinde de birkaç durum hariç hemen hemen aynı düzeylerde α_x ve α_y değerler bulunabildiği söylenebilir.

Öte yandan geleneksel açılı hibrit olmayan tasarımlarla (Tablo 7.3) tüm geleneksel açılı hibrit tasarımları karşılaştırıldığında, hibrit tasarımlarla elde edilen α_x ve α_y değerlerinin boyutsal kararlılık performanslarının daha iyi seviyede olduğu yorumu yapılabilir.

Üçüncü bir çalışma olarak $[4A/4B]_{45}$ hibrit dizilimi sürekli açılar ($-90^\circ - 90^\circ$) kullanılarak optimize edilmiş ve elde edilen optimum fiber açılı dizilimleri ve minimum

termal genleşme katsayısı değerleri Tablo 7.17 – 7.24 arasında sunulmuştur (Model Problem 108 – 163).

E-cam/Epoksi malzemesi ile hibritlenen kompozit plakalarına ait model problemlerin sürekli açılar kullanılarak gerçekleştirilen minimum termal genleşme katsayısı için optimizasyon sonuçları Tablo 7.17’de gösterilmiştir.

Tablo 7.17. $[4A / 4B]_{4s}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
108	Min α_x	E-Cam - Spektra Epoksi	$[90_4/45_4]_s$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0_4/45_4]_s$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$
109	Min α_x	E-Cam-Kevlar 49/ Epoksi	$[75/69/55/90/12/20/90/1]_s$	$1,5943 \cdot 10^{-8}$	$5,8095 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[32/58/8/18/47/55/15/71]_s$	$5,3879 \cdot 10^{-6}$	$9,7363 \cdot 10^{-9}$
110	Min α_x	E-Cam - IM6/Epoksi	$[69/82/64/78/31/40/40/25]_s$	$1,0856 \cdot 10^{-8}$	$2,1919 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[12/2/26/22/58/57/52/68]_s$	$2,1877 \cdot 10^{-6}$	$1,1080 \cdot 10^{-8}$
111	Min α_x	Eglass/GY70- Epoksi	$[86/67/82/84/25/33/32/59]_s$	$1,6199 \cdot 10^{-8}$	$1,2920 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[41/27/36/0/48/42/35/55]_s$	$1,3194 \cdot 10^{-6}$	$1,1003 \cdot 10^{-8}$
112	Min α_x	E-Cam- AS4/Epoksi	$[49/71/22/41/90/88/90/65]_s$	$1,5622 \cdot 10^{-5}$	$-2,8600 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[1/0_2/4/0_2/4/39]_s$	$1,9562 \cdot 10^{-8}$	$1,6488 \cdot 10^{-5}$
113	Min α_x	E-Cam - Aramid/Epoksi	$[16/0/40/43/30/46/24/2]_s$	$-2,1973 \cdot 10^{-7}$	$5,5558 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[43/59/11/88/88/75/10/86]_s$	$5,2189 \cdot 10^{-5}$	$-1,0937 \cdot 10^{-7}$
114	Min α_x	E-Cam- Boron/Epoksi	$[0_4/\pm 35_4]_s$	$2,1022 \cdot 10^{-6}$	$1,0198 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_4/63_3/90]_s$	$1,2276 \cdot 10^{-5}$	$3,5685 \cdot 10^{-6}$

Tabloda, en iyi optimizasyon sonucu olarak model problem 108’de α_x tasarımının 10^{-8} , α_y tasarımının 10^{-9} mertebesinde kadar minimize edilmiştir ve her iki yönde de boyutsal kararlı olduğu görülmektedir. Diğer tüm model tasarımların termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-6} - 10^{-8} mertebe aralığında kaldığı görülmektedir. İlginç bir şekilde model problem 112’de min α_x optimizasyonunda α_y değeri, min α_y optimizasyonunda α_x değeri en düşük elde edilmiştir.

Tablo 7.4’de verilen (A-E-cam/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının yaklaşık olarak aynı seviyelerde olduğu görülmektedir. E-cam/Epoksi ’nin $[A/B]_{45}$ ve $[4A/4B]_{45}$ tasarımlarından elde edilen bazı sonuçların başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.18’de A malzemesinin Kevlar/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.18. $[4A/4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar 49/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
115	Min α_x	Kevlar-Spektra Epoksi	$[8/16/12/41/65/48/84/79]_s$	$8,1404 \cdot 10^{-9}$	$3,8942 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[86/67/66/85/25/65/6/8]_s$	$3,8949 \cdot 10^{-5}$	$4,0483 \cdot 10^{-5}$
116	Min α_x	Kevlar 49- E- cam/ Epoksi	$[45_4/90_4]_s$	$7,2920 \cdot 10^{-8}$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/0_4]_s$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$
117	Min α_x	Kevlar 49- IM6/Epoksi	$[53/0/46/13/29/0/62/60]_s$	$-2,4353 \cdot 10^{-8}$	$1,6968 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[2/0/2_2/1/0/2/-1]_s$	$1,6968 \cdot 10^{-5}$	$1,7378 \cdot 10^{-5}$
118	Min α_x	Kevlar/ GY70- Epoksi	$[32/20/71/27/28/36/3/13]_s$	$1,2301 \cdot 10^{-5}$	$1,4008 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[32/31/67/43/52/45/77/85]_s$	$1,4125 \cdot 10^{-5}$	$5,4698 \cdot 10^{-9}$
119	Min α_x	Kevlar 49 / AS4-Epoksi	$[0_5/9/1/0]_s$	$2,7186 \cdot 10^{-8}$	$1,1507 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[28/42/62/48/87/36/82/52]_s$	$1,1550 \cdot 10^{-5}$	$-1,6255 \cdot 10^{-8}$
120	Min α_x	Kevlar49- Aramid/Epoksi	$[64/19/29/35/73/7/67/37]_s$	$-1,7384 \cdot 10^{-8}$	$4,5559 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[2/87/28/50/23/70/20/63]_s$	$4,5636 \cdot 10^{-5}$	$-9,3683 \cdot 10^{-8}$
121	Min α_x	Kevlar 49- Boron/Epoksi	$[42_4/-35/28_3]_s$	$3,4501 \cdot 10^{-6}$	$4,0778 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[52_4/71_4]_s$	$4,0927 \cdot 10^{-6}$	$3,5109 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.18’e bakıldığında termal genleşme katsayılarının $10^{-8} - 10^{-9}$ mertebesinde olduğu pek çok tasarım elde edilmiştir. Bunlar gri renk ile tabloda vurgulanmıştır. Özellikle, Spektra/Epoksi, E-cam /Epoksi ve AS4/Epoksi kompozit malzemeleri ile elde edilen hibrit kompozit plakaların model tasarımlarının (Bkz. model problem 115, 116 ve 119) diğer tasarımlara göre boyutsal kararlılık yönünden daha iyi olduğu görülmektedir.

Öte yandan, model problem 115-116 min α_x , problem 117 min α_y , problem 120 min α_x ve min α_y optimum tasarımlarının sonuçları daha düşük değerlerde kalmıştır.

Tablo 7.5’de verilen (A-Kevlar 49/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. Kevlar 49 /Epoksi ’nin $[A / B]_{45}$ ve $[4A / 4B]_{45}$ tasarımlarından elde edilen sonuçların başarılı olduğu görülmektedir.

IM6/Epoksi hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin sürekli açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo 7.19’da gösterilmiştir.

Tablo 7.19. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-IM6/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
122	Min α_x	IM6-Spektra Epoksi	$[4/0/47/50/54/25/55/60]_s$	$4,6056 \cdot 10^{-8}$	$1,4826 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[83/82/60/80/61/50/87/80]_s$	$1,4886 \cdot 10^{-5}$	$-1,484 \cdot 10^{-8}$
123	Min α_x	IM6-Kevlar 49/ Epoksi	$[80/88/54/65/78/14/21/54]_s$	$1,2139 \cdot 10^{-5}$	$3,8571 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[20/5/29/5/30/0/14/67]_s$	$1,9222 \cdot 10^{-8}$	$1,2159 \cdot 10^{-5}$
124	Min α_x	IM6-E- cam//Epoksi	$[44_2/26/40/66/81/82/86]_s$	$1,0241 \cdot 10^{-8}$	$2,2028 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[58/41/57/49/9/7/29/4]_s$	$2,2083 \cdot 10^{-6}$	$7,7378 \cdot 10^{-9}$
125	Min α_x	IM6/GY70- Epoksi	$[50/12/80/67/0/53/4/22]_s$	$-4,3021 \cdot 10^{-8}$	$1,1440 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[30/31/16/5/76/35/80_2]_s$	$1,1429 \cdot 10^{-5}$	$-3,2209 \cdot 10^{-8}$
126	Min α_x	IM6/AS4- Epoksi	$[-1_2/2/1/0/1/2_2]_s$	$-1,4599 \cdot 10^{-9}$	$7,9938 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[6/50/36/76/64/44/82/86]_s$	$7,9914 \cdot 10^{-6}$	$9,3575 \cdot 10^{-10}$
127	Min α_x	IM6- Aramid/Epoksi	$[0/16/31/0/56/0/38/61]_s$	$-4,5567 \cdot 10^{-8}$	$3,6776 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[50/39/81/60/32/71/61/83]_s$	$3,4059 \cdot 10^{-5}$	$2,6722 \cdot 10^{-6}$
128	Min α_x	IM6- Boron/Epoksi	$[47_4/78_3/90]_s$	$1,0166 \cdot 10^{-6}$	$3,2745 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_3/\pm 21_4]_s$	$3,4216 \cdot 10^{-6}$	$9,7190 \cdot 10^{-7}$

Tabloya bakıldığında en iyi sonucun model problem 126’da ,bulunan tasarım ile α_x değerinin en çok 10^{-9} mertebesine ve α_y değeri 10^{-10} mertebesine kadar indiği tespit edilmiştir. Model problem 122-124-125 ’de ise elde edilen tasarım ile α_x ve α_y değeri

10^{-8} mertebesine kadar minimize edilmiş ve her iki yönde de boyutsal kararlı hale gelmiştir. Diğer taraftan genel olarak bulunan optimum tasarımlar ile termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-5} - 10^{-7} merteye aralığında olabilmektedir.

Tablo 7.9’da verilen (A-IM6/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. Kevlar 49 /Epoksi ’nin $[A / B]_{45}$ ve $[4A / 4B]_{45}$ tasarımlarından elde edilen sonuçların başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.20’de A malzemesinin GY70/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.20. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
129	Min α_x	GY70-Spektra Epoksi	$[4 / 23 / 11 / 36 / 38 / 32 / 43 / 67]_s$	$-3,9410 \cdot 10^{-8}$	$-1,5974 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[55 / 72 / 83 / 88 / 19 / 45 / 70 / 62]$	$1,5961 \cdot 10^{-5}$	$-2,6662 \cdot 10^{-8}$
130	Min α_x	GY70- Kevlar49/ Epoksi	$[1_2 / 0 / 29 / 1 / 2_2 / 1]_s$	$4,3532 \cdot 10^{-9}$	$1,4127 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[84 / 84 / 56 / 52 / 42 / 63 / 5 / 57]_s$	$1,4114 \cdot 10^{-5}$	$1,6471 \cdot 10^{-8}$
131	Min α_x	Gy70-E- Cam/Epoksi	$[25 / 80 / 57 / 45 / 36 / 16 / 57 / 71]_s$	$-7,4635 \cdot 10^{-8}$	$1,6722 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0 / 84 / 89 / 36 / 49 / 46 / 48 / 5]_s$	$1,6799 \cdot 10^{-6}$	$3,3555 \cdot 10^{-9}$
132	Min α_x	Gy70- IM6/Epoksi	$[5 / 58 / 6 / 0_2 / 83 / 56 / 38]_s$	$4,1138 \cdot 10^{-8}$	$1,1356 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[73 / 80 / 77 / 53 / 36 / 72 / 89 / 28]_s$	$1,1334 \cdot 10^{-5}$	$6,3394 \cdot 10^{-8}$
133	Min α_x	Gy70/ AS4- Epoksi	$[82 / 10 / 37 / 9 / 84 / 54 / 83 / 48]_s$	$8,0163 \cdot 10^{-7}$	$-1,2367 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[1 / 0 / 1 / 2 / 0_3 / -1]_s$	$3,1808 \cdot 10^{-8}$	$5,3994 \cdot 10^{-6}$
134	Min α_x	GY70- Aramid/Epoksi	$[37 / 21 / 48 / 61 / 82 / 6 / 50 / 37]_s$	$1,1212 \cdot 10^{-7}$	$2,8088 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[56 / 65 / 15 / 78 / 35 / 85 / 75 / 36]_s$	$2,8290 \cdot 10^{-5}$	$-8,9561 \cdot 10^{-8}$
135	Min α_x	Gy70- Boron/Epoksi	$[45 / 32 / 60 / 48 / 0 / 21 / 16 / 12]_s$	$1,9348 \cdot 10^{-6}$	$1,1787 \cdot 10^{-8}$
	Min α_y		$[20 / 25 / 19 / 22 / 48 / 78 / 76 / 63]_s$	$1,4528 \cdot 10^{-6}$	$2,5505 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.20’de termal genleşme katsayılarının $10^{-7} - 10^{-9}$ mertebesinde olduğu pek çok tasarım elde edilmiştir. En düşük α_x değeri model problem 130 tasarımı ile $4,3532 \cdot 10^{-9}$ 1/°C olarak, en düşük α_y değeri de model problem 131’de min α_y tasarımı ile $3,3355 \cdot 10^{-9}$

1/°C olarak elde edilmiştir. Öte yandan model problem 133 'te min α_x optimizasyonunda α_x 'e göre α_y daha fazla ve min α_y optimizasyonunda α_y 'ye göre α_x daha fazla minimize edilmiştir.

Tablo 7.9'da verilen (A-GY70/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının yaklaşık olarak aynı seviyelerde olduğu görülmektedir. GY70/Epoksi 'nin $[A/B]_{45}$ ve $[4A/4B]_{45}$ tasarımlarından elde edilen sonuçların diğer tasarım modellerine göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.21'de A malzemesinin GY70/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.21. $[4A/4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-AS4/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
136	Min α_x	As4-Spektra Epoksi	$[61/56/88/88/7/36/88/34]_s$	$8,4239 \cdot 10^{-10}$	$1,4587 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[1/28/0/0/1/21/1/0]_s$	$1,4582 \cdot 10^{-5}$	$-3,7348 \cdot 10^{-9}$
137	Min α_x	AS4-Kevlar 49/ Epoksi	$[7/0/1_2/0/-1/0_2]_s$	$1,4736 \cdot 10^{-8}$	$1,1519 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[66/88/48/68/41/1/22/19]_s$	$1,1558 \cdot 10^{-5}$	$-2,3927 \cdot 10^{-8}$
138	Min α_x	As4- IM6/Epoksi	$[2/0/2_2/1/0/2/-1]_s$	$8,5961 \cdot 10^{-9}$	$7,9838 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[42/78/90/75/87/70/31/37]_s$	$8,2459 \cdot 10^{-6}$	$-2,5348 \cdot 10^{-7}$
139	Min α_x	AS4- GY70/Epoksi	$[31/22/14/6/39/72/1/18]_s$	$2,0431 \cdot 10^{-9}$	$5,3978 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[1/0_3/84/3/0_2]_s$	$-3,8115 \cdot 10^{-9}$	$5,4036 \cdot 10^{-6}$
140	Min α_x	AS4-E- Cam/Epoksi	$[40/43/40/40/88/83/76/87]_s$	$1,7913 \cdot 10^{-9}$	$2,6082 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[51/50/52/52/4/4/4/8]_s$	$2,6075 \cdot 10^{-6}$	$-3,7028 \cdot 10^{-9}$
141	Min α_x	AS4- Aramid/Epoksi	$[51/32/86/46/65/4/44/48]_s$	$1,1744 \cdot 10^{-8}$	$3,9374 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[36/57/43/77/69/52/90/80]_s$	$3,9461 \cdot 10^{-5}$	$-7,5021 \cdot 10^{-8}$
142	Min α_x	AS4- Boron/Epoksi	$[45_4/90/82_2/90]_s$	$1,7397 \cdot 10^{-6}$	$3,3066 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/-18_4]_s$	$1,7619 \cdot 10^{-6}$	$3,3415 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.21'e bakıldığında genellikle tüm model problemlerde, boyutsal kararlılık seviyelerinin beklenen performansı karşıladığı belirlenmiştir. $10^{-8} - 10^{-10}$ arası değerler

koyu gri ile 10^{-7} mertebesindeki değerler açık gri renk ile vurgulanmıştır. Özellikle, Spektra/Epoksi Kevlar 49/Epoksi ve E-Cam/Epoksi kompozit malzemeleri ile elde edilen hibrit kompozit plakaların model tasarımlarının (Bkz. model problem 136, 137 ve 140) diğer tasarımlara göre boyutsal kararlılık yönünden daha iyi olduğu görülmektedir. Tablo 7.8’de verilen (A-AS4/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. AS4 /Epoksi ’nin $[A/B]_{4S}$ ve $[4A/4B]_{4S}$ tasarımlarından elde edilen sonuçların AS4 /Epoksi ’nin diğer tasarım modellerine göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.22’de A malzemesinin Boron/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.22. $[4A/4B]_{4S}$ hibrit kompozit plakaların (A-Boron/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açık Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
143	Min α_x	Boron-Spektra Epoksi	$[32_4/45_4]_S$	$2,9275 \cdot 10^{-6}$	$7,9372 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[77_4/56_4]_S$	$8,4880 \cdot 10^{-6}$	$3,7591 \cdot 10^{-6}$
144	Min α_x	Boron- Kevlar 49/ Epoksi	$[32_2/-32_2/45_3/-45]_S$	$3,4334 \cdot 10^{-6}$	$4,0769 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[71_4/53_4]_4$	$4,0876 \cdot 10^{-6}$	$3,5108 \cdot 10^{-6}$
145	Min α_x	Boron- E- Cam/Epoksi	$[-35/35/27/-7/74/76/78/83]_S$	$2,5736 \cdot 10^{-9}$	$4,2653 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[69/-38/57/56/18/25/20/31]_S$	$3,4076 \cdot 10^{-6}$	$3,2086 \cdot 10^{-10}$
146	Min α_x	Boron- IM6/Epoksi	$[32/74/85/86/89/23/25/13]_S$	$1,7694 \cdot 10^{-6}$	$2,8203 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[77_4/47_4]_S$	$1,0143 \cdot 10^{-6}$	$3,2934 \cdot 10^{-6}$
147	Min α_x	Boron/GY70- Epoksi	$[54/28/44/10/0/37/0]_S$	$-3,1722 \cdot 10^{-8}$	$1,5894 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[82/76/80/65/78/79/86/76]_S$	$1,6498 \cdot 10^{-5}$	$2,6678 \cdot 10^{-8}$
148	Min α_x	Boron/ AS4- Epoksi	$[0_2/56/0_3/52/0]_S$	$1,0253 \cdot 10^{-8}$	$1,4408 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[43/31/90/78/87/86/90/86]_S$	$1,3946 \cdot 10^{-5}$	$-3,6564 \cdot 10^{-8}$
149	Min α_x	Boron- Aramid/Epoksi	$[60/56/62/7/1/0_2/50/0]_S$	$1,0830 \cdot 10^{-7}$	$5,1011 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[46/89/75/68/39/63/75/88]_S$	$5,2071 \cdot 10^{-5}$	$-1,2844 \cdot 10^{-5}$

Tabloda, en iyi optimizasyon sonucu model problem 145’te α_x tasarımının 10^{-9} mertebesinde ve α_y tasarımının 10^{-10} mertebesinde olduğu görülmektedir.

Bu tasarım modeli x ve y yönünde boyutsal kararlı hale gelmiştir. Diğer tüm model tasarımların termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-5} - 10^{-8} merteye aralığında kaldığı görülmektedir. $[A/B]_{45}$ hibrit tasarım modeliyle karşılaştırıldığında yine Boron/Epoksi-E-Cam, Boron/Epoksi-GY70 ve Boron/Epoksi-AS4 tasarım sonuçlarıyla boyutsal kararlı hale geldiği görülmektedir.

Tablo 7.10’da verilen (A-AS4/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. AS4 /Epoksi ’nin $[A/B]_{45}$ ve $[4A/4B]_{45}$ tasarımlarından elde edilen sonuçların AS4 /Epoksi ’nin diğer tasarım modellerine göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.23’te A malzemesinin Spektra/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.23. $[4A/4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Spektra-Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
150	Min α_x	Spektra-E-Cam/ Epoksi	$[45_4/90_4]_s$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/0_4]_s$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$
151	Min α_x	Spektra-Kevlar 49/ Epoksi	$[25/40/3/52/27/21/52/49]_s$	$-3,9418 \cdot 10^{-7}$	$3,2203 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[63/12/86/79/80/50/38/34]_s$	$3,1871 \cdot 10^{-5}$	$-6,2533 \cdot 10^{-8}$
152	Min α_x	Spektra- IM6/Epoksi	$[5/61/39/44/73/59/48/5]_s$	$7,0918 \cdot 10^{-8}$	$1,6827 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[12/83/55/62/34/29/67/18]_s$	$1,6825 \cdot 10^{-5}$	$7,3039 \cdot 10^{-8}$
153	Min α_x	Spektra/GY70- Epoksi	$[12/67/29/53/6/22/29/7]_s$	$1,9363 \cdot 10^{-8}$	$1,5915 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[0/0/48/83/44/5/0/2]_s$	$1,9252 \cdot 10^{-8}$	$1,5915 \cdot 10^{-5}$
154	Min α_x	Spektra/AS4 - Epoksi	$[0_2/82/0/19/0_3]_s$	$3,4560 \cdot 10^{-9}$	$1,4580 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[27/17/75/50/63/64/76/90]_s$	$1,4609 \cdot 10^{-5}$	$-2,6099 \cdot 10^{-8}$
155	Min α_x	Spektra- Aramid/Epoksi	$[13/37/67/9/22/26/48/4]_s$	$2,5223 \cdot 10^{-8}$	$5,1329 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[37/67/62/50/72/70/24/90]_s$	$5,1830 \cdot 10^{-5}$	$-4,7503 \cdot 10^{-7}$
156	Min α_x	Spektra- Boron/Epoksi	$[53_4/74_3/90]_s$	$8,5321 \cdot 10^{-6}$	$3,7668 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[\pm 45_4/-32/32_2/-32]$	$2,9275 \cdot 10^{-6}$	$7,9372 \cdot 10^{-6}$

Tabloda en iyi tasarım sonucu model 153'te α_x tasarımlarının 10^{-9} mertebesinde ve α_y tasarımlarının 10^{-8} mertebesinde olduğu görülmektedir. Her iki tasarım modeli için, y yönü x yönü göre daha boyutsal kararlı haldedir. Model problem 151'de α_x ve α_y tasarımlarının diğer tüm model tasarımlara göre daha boyutsal kararlı haldedir. Diğer tüm model tasarımların termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-5} - 10^{-8} mertebe aralığında kaldığı görülmektedir. $[A/B]_{45}$ Tablo 7.10'da verilen A-Spektra/Epoksi hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. Spektra /Epoksi 'nin $[A/B]_{45}$ ve $[4A/4B]_{45}$ tasarımlarından elde edilen bazı sonuçların Spektra /Epoksi 'nin diğer tasarım modellerine göre başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.24'te A malzemesinin Aramid/Epoksi olduğu hibrit kompozit tasarımları ve minimum termal genleşme katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 7.24. $[4A/4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-Aramid/Epoksi) optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/°C)	α_y (1/°C)
157	Min α_x	Aramid-Spektra Epoksi	$[1/0/34/49/0/0/39/0]_s$	$1,1079 \cdot 10^{-7}$	$5,1244 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[88/82/53/53/36/19/83/72]_s$	$5,1232 \cdot 10^{-5}$	$1,2263 \cdot 10^{-7}$
158	Min α_x	Aramid-Kevlar 49/Epoksi	$[5/61/82/60/24/70/36/18]_s$	$2,5621 \cdot 10^{-5}$	$1,9921 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[29/6/13/7/13/28/87/57]_s$	$-1,9059 \cdot 10^{-6}$	$4,7448 \cdot 10^{-5}$
159	Min α_x	Aramid-E-cam/Epoksi	$[5/12/15/73/65/67/53]_s$	$4,6841 \cdot 10^{-7}$	$8,411 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[53/49/79/47/12/11/10/1]_s$	$1,3130 \cdot 10^{-6}$	$-7,8266 \cdot 10^{-9}$
160	Min α_x	Aramid-IM6/Epoksi	$[19/30/5/36/77/75/11/54]_s$	$2,6055 \cdot 10^{-7}$	$3,6470 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[84/77/81/52/48/10/82/10]_s$	$3,6843 \cdot 10^{-5}$	$-1,1208 \cdot 10^{-7}$
161	Min α_x	Aramid/GY70-Epoksi	$[86/72/60/7/4/37/44/10]_s$	$5,0314 \cdot 10^{-8}$	$8,6997 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[34/19/76/22/44/79/65/50]_s$	$8,7790 \cdot 10^{-6}$	$-2,8988 \cdot 10^{-8}$
162	Min α_x	Aramid/ AS4-Epoksi	$[1/35/29/41/82/85/71/58]_s$	$-2,6349 \cdot 10^{-7}$	$3,9650 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[73/68/53/75/46/48/3/14]_s$	$3,9415 \cdot 10^{-5}$	$-2,9393 \cdot 10^{-8}$
163	Min α_x	Aramid-Boron/Epoksi	$[32/36/18/30/79/67/62/53]_s$	$-2,1286 \cdot 10^{-9}$	$2,6725 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[67/60/54/51/40/33/39/14]_s$	$2,7687 \cdot 10^{-6}$	$-1,7092 \cdot 10^{-8}$

Tablo 7.24'e bakıldığında genellikle tüm model problemlerde, boyutsal kararlılık seviyelerinin beklenen performansı karşıladığı belirlenmiştir. $10^{-8} - 10^{-9}$ arası değerler koyu gri ile 10^{-7} mertebesindeki değerler açık gri renk ile vurgulanmıştır. Özellikle, GY70/Epoksi AS4/Epoksi ve Boron/Epoksi kompozit malzemeleri ile elde edilen hibrit kompozit plakaların model tasarımlarının (Bkz. model problem 161, 162 ve 163) diğer tasarımlara göre boyutsal kararlılık yönünden daha iyi olduğu görülmektedir. Tablo 7.6'da verilen (A-Boron/Epoksi) hibrit kompozit plakaların optimizasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında boyutsal kararlılık performansının benzer seviyelerde olduğu görülmektedir. Boron /Epoksi 'nin $[A / B]_{4S}$ ve $[4A / 4B]_{4S}$ tasarımlarından elde edilen sonuçların Boron/Epoksi 'nin diğer tasarım modellerine göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 7.25'de E-Cam/Epoksi ile yapılan hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 7.25. $[4A / 4B]_{4S}$ hibrit kompozit plakaların (A-E-cam/Epoksi) geleneksel optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
164	Min α_x	E-Cam - Spektra/ Epoksi	$[0_4/45_4]_S$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_4/45_4]_S$	$4,1783 \cdot 10^{-6}$	$3,6699 \cdot 10^{-6}$
165	Min α_x	E- Cam - Kevlar 49/ Epoksi	$[45/90_3/45_2/90/45]_S$	$3,9265 \cdot 10^{-8}$	$5,0943 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0/45_6/90]_S$	$5,8601 \cdot 10^{-6}$	$3,5277 \cdot 10^{-8}$
166	Min α_x	E-Cam-IM6 /Epoksi	$[90_2/45/90/45_4]_S$	$-8,2011 \cdot 10^{-8}$	$2,3212 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0_3/45_4]_S$	$2,3212 \cdot 10^{-6}$	$-8,2011 \cdot 10^{-8}$
167	Min α_x	E-Cam- GY70 /Epoksi	$[45_3/90/45_4]_S$	$7,9853 \cdot 10^{-8}$	$1,2666 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0_4/45_3/90]_S$	$1,2028 \cdot 10^{-6}$	$1,1590 \cdot 10^{-7}$
168	Min α_x	E-cam -AS4/ Epoksi	$[0_6/45/0]_S$	$3,7172 \cdot 10^{-8}$	$1,6428 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_7/45]_S$	$1,6428 \cdot 10^{-5}$	$3,7172 \cdot 10^{-8}$
169	Min α_x	E-cam - Aramid/ Epoksi	$[90/45_3/0_2/45/0]_S$	$3,8332 \cdot 10^{-8}$	$4,4893 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90/45/90_2/45_2/90_2]_S$	$1,8096 \cdot 10^{-5}$	$5,0556 \cdot 10^{-7}$
170	Min α_x	E-cam - Boron/ Epoksi	$[90_5/0_2/90]_S$	$5,3894 \cdot 10^{-6}$	$4,3050 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/90_4]_S$	$9,9865 \cdot 10^{-6}$	$4,1962 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.25'ten genel olarak optimizasyon sonuçlarının 10^{-7} ve 10^{-8} mertebelerinde minimum α_x ve α_y değerlerine ulaşılmıştır. Yani ısı genleşme katsayı her iki yönde istenilen seviyededir. Sürekli açı kullanılarak yapılan optimizasyon sonuçları (Tablo 7.17) ile kıyaslandığında ise geleneksel açılı tasarımlar ile genel olarak daha düşük α_x ve α_y değerleri elde edildiği ve $10^{-7} - 10^{-8}$ mertebe aralığında kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 7.26'da Kevlar 49/Epoksi ile yapılan hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açıları kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 7.26. $[4A / 4B]_{4S}$ hibrit kompozit plakaların (A-Kevlar 49 /Epoksi) geleneksel optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
171	Min α_x	Kevlar-Spektra / Epoksi	$[0/45_3/90/45_3]_S$	$1,9861 \cdot 10^{-6}$	$3,8949 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45/90/45/90_2/45/90/45]_S$	$3,9169 \cdot 10^{-5}$	$-2,1883 \cdot 10^{-7}$
172	Min α_x	Kevlar 49-GY70/ Epoksi	$[90/45_3/0/45_3]_S$	$2,8727 \cdot 10^{-7}$	$1,3844 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[0_4/45/90_3]_S$	$3,8510 \cdot 10^{-8}$	$1,4092 \cdot 10^{-5}$
173	Min α_x	Kevlar 49-IM6/ Epoksi	$[45/90_3/45_2/90/45]_S$	$3,9265 \cdot 10^{-8}$	$5,0943 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[0/45_6/90]_S$	$5,8601 \cdot 10^{-6}$	$3,5277 \cdot 10^{-8}$
174	Min α_x	Kevlar 49-E-cam / Epoksi	$[45_4/90_4]_S$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/0_4]_S$	$3,4135 \cdot 10^{-6}$	$7,2920 \cdot 10^{-7}$
175	Min α_x	Kevlar-As4/ Epoksi	$[45_4/0_3]_S$	$-5,5543 \cdot 10^{-5}$	$1,2090 \cdot 10^{-7}$
	Min α_y		$[90_8]_S$	$1,1608 \cdot 10^{-5}$	$-7,3619 \cdot 10^{-8}$
176	Min α_x	Kevlar 49-Boron/ Epoksi	$[90_5/0_2/90]_S$	$3,6813 \cdot 10^{-6}$	$3,6813 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/90_4]_S$	$4,1167 \cdot 10^{-6}$	$3,5451 \cdot 10^{-6}$
177	Min α_x	Kevlar 49-Boron/ Epoksi	$[90_5/0_2/90]_S$	$3,6813 \cdot 10^{-6}$	$3,6813 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/90_4]_S$	$4,1167 \cdot 10^{-6}$	$3,5451 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.27’de GY70/Epoksi ile yapılan hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 7.27. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-GY70/Epoksi) geleneksel optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açılı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
178	Min α_x	Gy70- Spektra / Epoksi	$[0/45_7]_s$	$-2,1054 \cdot 10^{-7}$	$1,6145 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45/90_2/45/90/45/90_2]_s$	$1,5838 \cdot 10^{-5}$	$9,6472 \cdot 10^{-8}$
179	Min α_x	GY70-Kevlar 49/ Epoksi	$[0 / 45_3 / 90 / 45_3]_s$	$2,8727 \cdot 10^{-7}$	$1,3844 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45 / 90_3 / 0_4]_s$	$1,4092 \cdot 10^{-7}$	$3,851 \cdot 10^{-8}$
180	Min α_x	Gy70- E- cam / Epoksi	$[90_2 / 45_5 / 90]_s$	$6,5897 \cdot 10^{-9}$	$1,7011 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_6 / 90 / 45]_s$	$1,4399 \cdot 10^{-6}$	$3,9905 \cdot 10^{-8}$
181	Min α_x	Gy70- IM6 / Epoksi	$[0_3/45/90_4]_s$	$2,8254 \cdot 10^{-7}$	$1,1114 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45_2/90_3/45_2/90]_s$	$1,1504 \cdot 10^{-5}$	$-1,0670 \cdot 10^{-7}$
182	Min α_x	Gy70-As4/ Epoksi	$[45_8]_s$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$5,3640 \cdot 10^{-6}$	$3,5850 \cdot 10^{-8}$
183	Min α_x	Gy70- Aramid / Epoksi	$[90_2/45/90/0_4]_s$	$-4,3333 \cdot 10^{-7}$	$1,4868 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_2/45/90_5]_s$	$1,4868 \cdot 10^{-5}$	$-4,3333 \cdot 10^{-7}$
184	Min α_x	Gy70- Boron / Epoksi	$[45_4/90/45/90/45]_s$	$1,5102 \cdot 10^{-6}$	$2,8872 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_3/90/0_4]_s$	$1,8574 \cdot 10^{-6}$	$3,6559 \cdot 10^{-7}$

Tabloda GY70-Boron/Epoksi hibrit tasarımı (model problem 183) haricinde diğer tüm tasarım modellerinde boyutsal kararlılık performansının iyileştirildiği görülmektedir. Sürekli açı kullanılarak yapılan optimizasyon sonuçları (Tablo 7.20) ile kıyaslandığında ise geleneksel açılı tasarımlar ile genel olarak daha düşük α_x ve α_y değerleri elde edildiği ve $10^{-7} - 10^{-8}$ merteye aralığında kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 7.28’de AS4/Epoksi ile yapılan hibrit kompozit plakalarına ait model problemlerin geleneksel açılar kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 7.28. $[4A / 4B]_{45}$ hibrit kompozit plakaların (A-AS4/Epoksi) geleneksel optimizasyon sonuçları

#	Opt.	Malzemeler	Fiber Açı Dizilimi	α_x (1/ °C)	α_y (1/ °C)
185	Min α_x	AS4-Spektra /Epoksi	$[0_2/45_2/90/45_3]_s$	$1,4565 \cdot 10^{-8}$	$1,8388 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[45/90_2/45/90/45_3]_s$	$1,8388 \cdot 10^{-5}$	$1,4565 \cdot 10^{-8}$
186	Min α_x	AS4Kevlar 49/ Epoksi	$[0 / 45_7]_s$	$-5,5543 \cdot 10^{-7}$	$-1,2090 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$1,1608 \cdot 10^{-5}$	$-7,3619 \cdot 10^{-8}$
187	Min α_x	AS4- E-cam / Epoksi	$[45/90/45/90/45/90/45/90]_s$	$-3,9553 \cdot 10^{-8}$	$2,6416 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45/0/45/0/45/0/45/0]_s$	$2,6416 \cdot 10^{-6}$	$-3,9553 \cdot 10^{-8}$
188	Min α_x	AS4-IM6 /Epoksi	$[0/45_3/90/45_3]_s$	$8,0512 \cdot 10^{-7}$	$7,1873 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$8,0123 \cdot 10^{-6}$	$-1,9915 \cdot 10^{-8}$
189	Min α_x	AS4-GY70 /Epoksi	$[45_8]_s$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$	$2,6999 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$5,3640 \cdot 10^{-6}$	$3,5850 \cdot 10^{-8}$
190	Min α_x	AS4-Aramid /Epoksi	$[90_4/0_4]_s$	$8,8268 \cdot 10^{-7}$	$2,4118 \cdot 10^{-5}$
	Min α_y		$[90_8]_s$	$2,4118 \cdot 10^{-5}$	$8,8268 \cdot 10^{-7}$
191	Min α_x	AS4-Boron /Epoksi	$[45_4/90_4]_s$	$1,7403 \cdot 10^{-6}$	$3,2993 \cdot 10^{-6}$
	Min α_y		$[45_4/0_4]_s$	$3,2993 \cdot 10^{-6}$	$1,7403 \cdot 10^{-6}$

Tablo 7.28’e bakıldığında AS4/Epoksi hibritlerinin termal genleşme katsayısı değerleri 10^{-8} mertebesinde elde edilmiştir. En minimum değere $\alpha_x = -3,9553 \cdot 10^{-8}$ 1/°C ile model problem 186’da ulaşılmıştır. Problemlerde y yönü ve x yönü boyutsal kararlı haldedir. Öte yandan geleneksel açılı hibrit olmayan tasarımlarla (Tablo 7.3) $[4A/4B]_s$ tüm geleneksel açılı hibrit tasarımları karşılaştırıldığında, hibrit tasarımlarla elde edilen α_x ve α_y değerlerinin boyutsal kararlılık performanslarının daha iyi seviyede olduğu yorumu yapılabilir.

$[A/B]_{45}$ hibrit tasarımları ve $[4A/4B]_{45}$ hibrit tasarımları kıyaslandığında, bu iki hibrit tasarıma ait α_x ve α_y ısı genleşme katsayılarının 10^{-10} mertebesine kadar minimize edilebildiği görülmüştür. Ayrıca, $[A/B]_{45}$ hibrit tasarımlarının boyutsal kararlılık performansının $[4A/4B]_{45}$ hibrit tasarımlarına göre biraz daha iyi bir seviyede olduğu sonucuna varılmıştır.

7.3. Optimum Hibrit Kompozit Tasarımların Sıcaklık Değişimi Altındaki Performansı

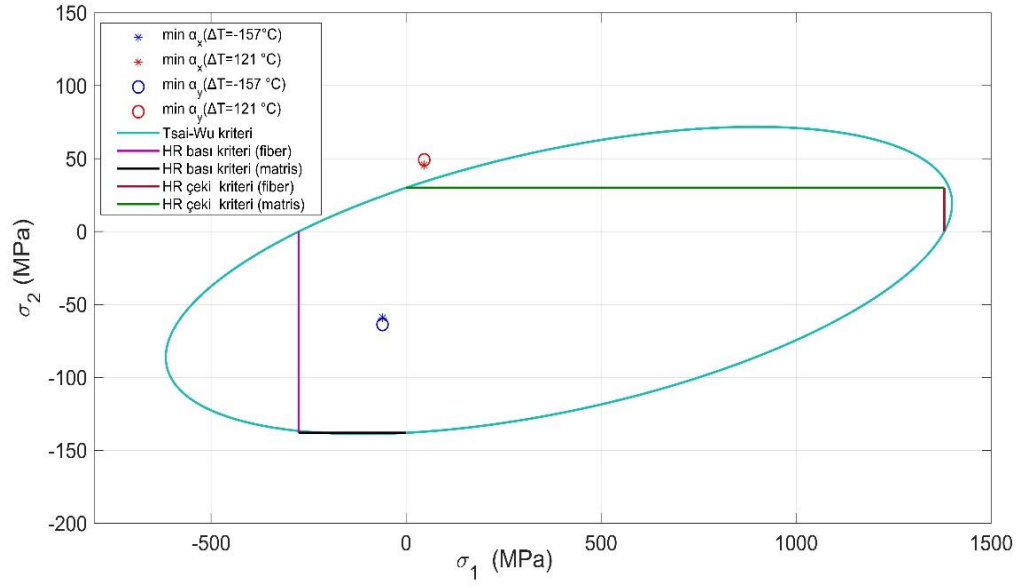
A-B fiber açılı dizilimine sahip hibrit kompozit plakaların optimizasyonu sonucunda sürekli açılı tasarımlar arasından model problem 17-18-20 seçilerek ($\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$) boyutsal kararlılık performansı, $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ termal yükleme değerleri için test edilmiştir. Tasarımda, Tsai-Wu (TW) ve Hashin-Rotem (HR) hasar kriterleri temel alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.4 – 7.7 arasında sunulmuştur. Simetrik kompozit plakaların sıcaklık değişimi altındaki dayanım performansları sırasıyla sürekli açılı tasarımlar için Şekil 7.4-7.6’da gösterilmiştir.

Şekil 7.4’de , $[A/B]_{45}$ E-cam-(Kevlar/Epoksi) hibrit kompozit plakanın tasarımı, mavi renkle ifade edilen yani $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve kırmızı renkle ifade edilen $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende olduğu görülmektedir. Öte yandan $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ ’de ise kırmızı renkle ifade edilen $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende değildir. HR hasar kriterinde yeşil ve siyah renkler, sırasıyla matris yönünde çeki ve bası gerilmesini temsil etmekte, mor ve bordo renkler ise sırasıyla fiber yönünde bası ve çeki gerilmesini temsil etmektedir. Tasarımların bası kriterine göre de güvende olduğu görülmektedir.

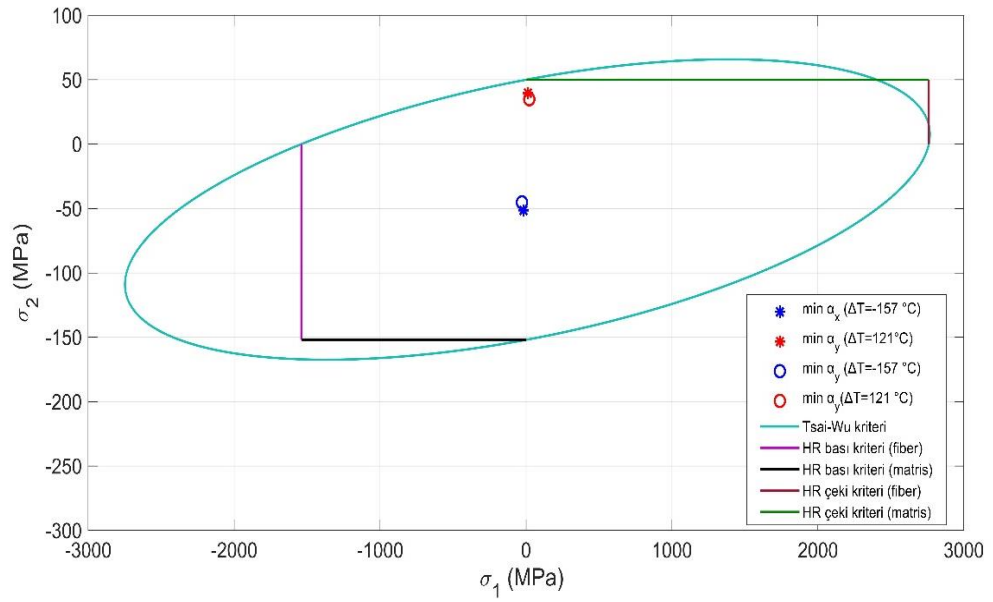
Şekil 7.5’de ise $[A/B]_{45}$ E-cam-IM6/Epoksi hibrit kompozit plakanın tasarımında, mavi renkle ifade edilen yani $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve kırmızı renkle ifade edilen yani $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ ’de $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende olduğu görülmektedir. Aynı renklerle ifade edilen HR kriterlerine göre güvende olduğu görülmektedir.

Geleneksel açılı tasarımlar için Şekil 7.7’de gösterilmiştir.

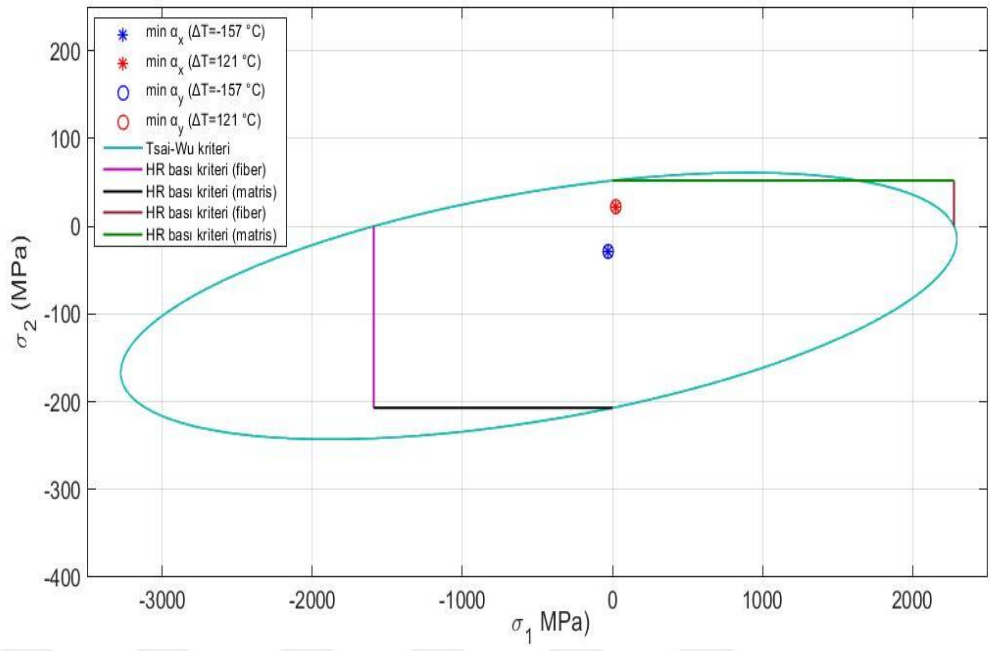
$[A/B]_{45}$ AS4-E-cam/Epoksi ve $[A/B]_{45}$ Aramid-E-cam/Epoksi hibrit kompozit plakaların tasarımında, iki farklı termal sıcaklıkta $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin yine aynı renklerle ifade edilen hem TW hasar kriteri hem de HR çeki kriterlerine göre güvende olduğu görülmektedir.



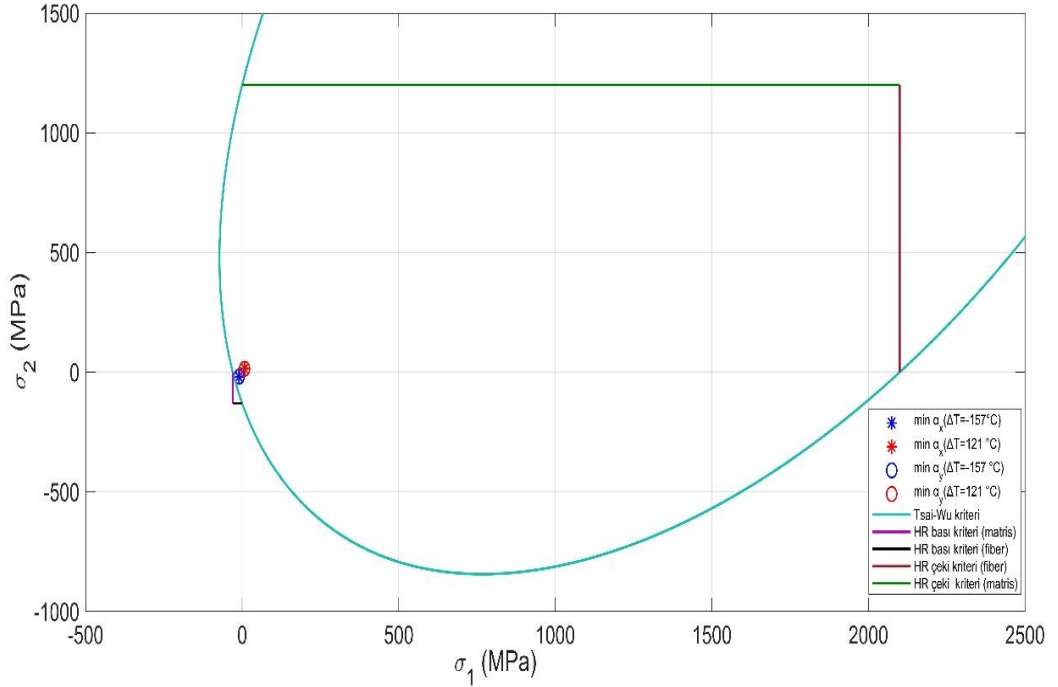
Şekil 7.4. Optimum $[A/B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [68/29/55/82/44/27/65/11]_S$, $\min \alpha_y [69/60/5/20/27/56/8/75]_S$ E-cam-Kevlar/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 7.5. Optimum $[A/B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [84/26/74/32/59/21/75/28]_S$, $\min \alpha_y [11/60/7/47/39/59/5/55]_S$ E-cam-IM6/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 7.6. Optimum $[A/B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [39/89/42/83/42/84/39/83]_s$, $\min \alpha_y [50/4/53/4/50/4/50/4]_s$, AS4-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 7.7. Optimum $[A/B]_{45}$ dizilimindeki $\min \alpha_x [45_7/90]_s$, $\min \alpha_y [45/0/45/0/45/0/90/0]_s$, Aramid-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı

4A-4B istifleme dizinli hibrit kompozit plakaların optimizasyonu sonucunda sürekli açılı tasarımlar arasından model problem 90-92-97-146 seçilerek ($\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$) boyutsal kararlılık performansı, $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ termal yükleme değerleri için test edilmiştir. Tasarımda, Tsai-Wu (TW) ve Hashin-Rotem (HR) hasar kriterleri temel alınmıştır.

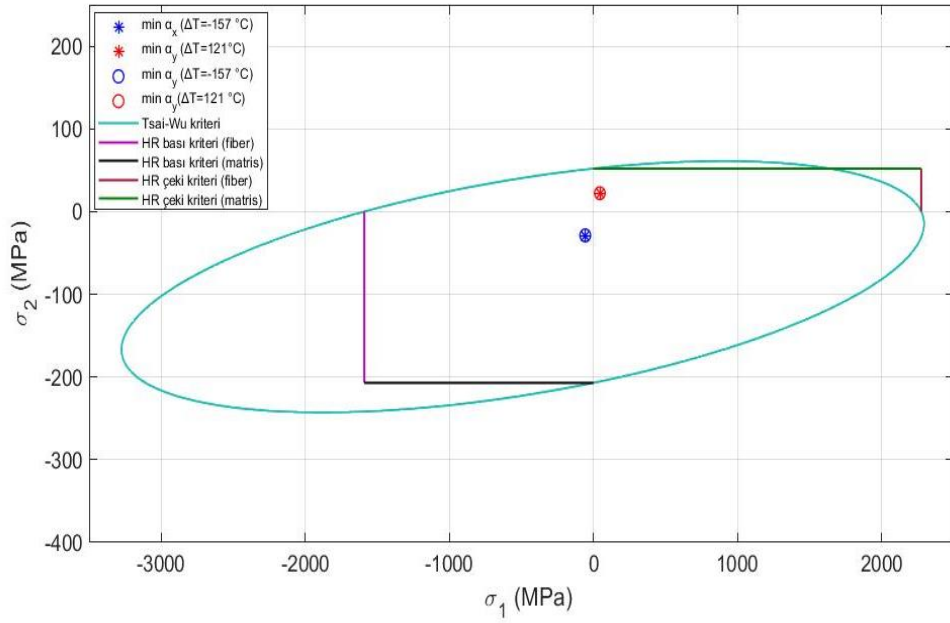
Sürekli açılı tasarımlar için termal performanslar Şekil 7.8-7.9 ve Şekil 7.10 'da gösterilmiştir.

$[4A / 4B]_{45}$ Boron-E-cam/Epoksi ve $[4A / 4B]_{45}$ AS4-E-cam/Epoksi hibrit kompozit plakaların tasarımında, mavi renkle ifade edilen yani $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve kırmızı renkle ifade edilen yani $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ 'de $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende olduğu görülmektedir. HR hasar kriterinde yeşil ve siyah renkler, sırasıyla matris yönünde çeki ve bası gerilmesini temsil etmekte, mor ve bordo renkler ise sırasıyla fiber yönünde bası ve çeki gerilmesini temsil etmektedir. Tasarımların bası kriterine göre de güvende olduğu görülmektedir.

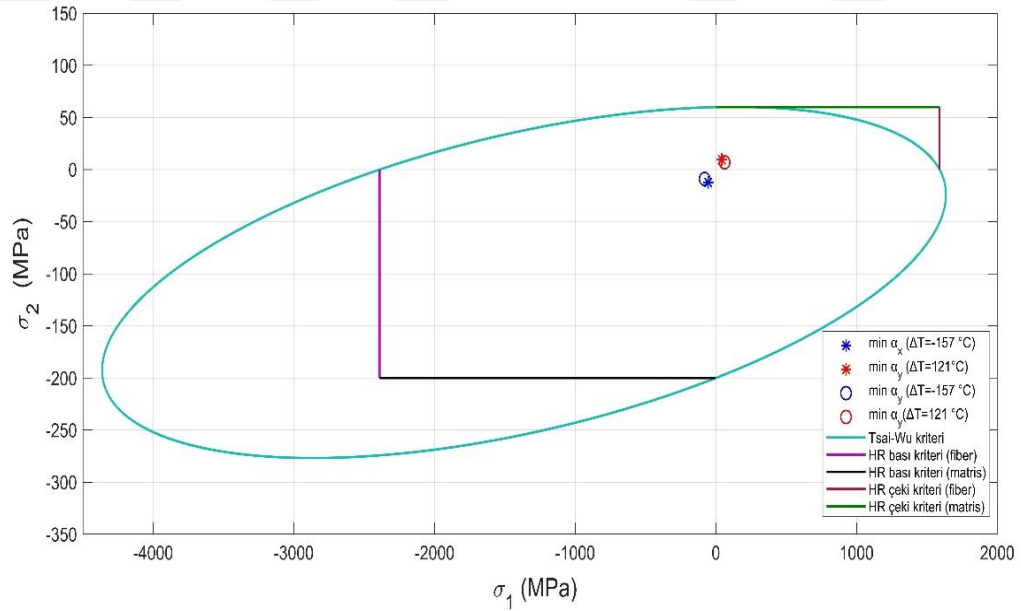
Geleneksel açılı tasarımlar için termal performanslar Şekil 7.11'de gösterilmiştir.

$[4A / 4B]_{45}$ (As4-Spektra/Epoksi) mavi renkle ifade edilen yani $\Delta T = -157^\circ\text{C}$ ve kırmızı renkle ifade edilen $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende olduğu görülmektedir. Öte yandan $\Delta T = 121^\circ\text{C}$ 'de ise kırmızı renkle ifade edilen $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin Tsai-Wu (TW) hasar teorisine göre güvende değildir. Yine HR hasar kriterinde çeki gerilmesinde güvende olmadığı görülmektedir.

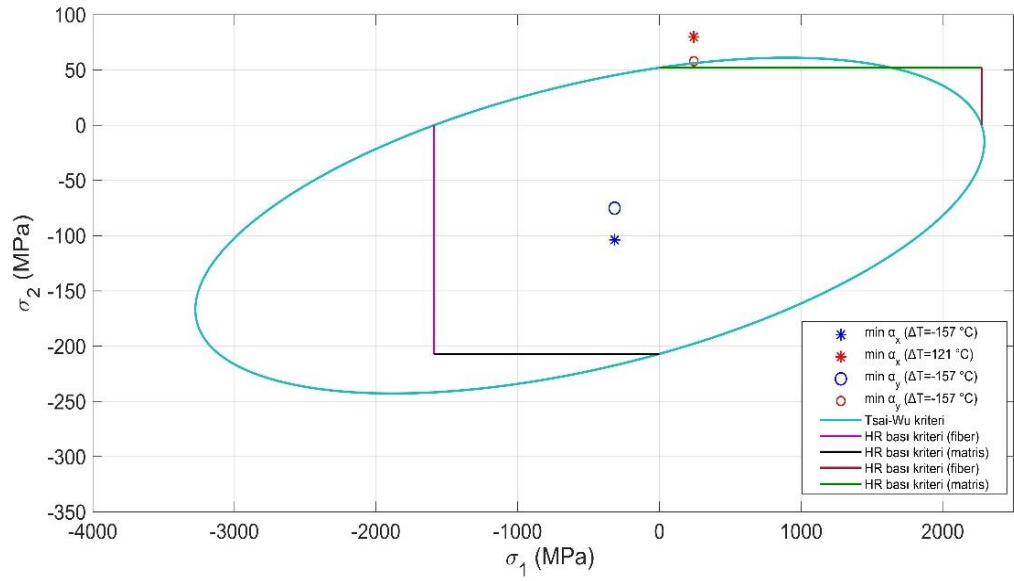
Şekil 7.11'de $[4A / 4B]_{45}$ AS4-E-cam/Epoksi hibrit kompozit plakaların tasarımında, iki farklı termal sıcaklıkta $\min \alpha_x$ ve $\min \alpha_y$ değerlerinin yine aynı renklerle ifade edilen hem TW hasar kriteri hem de HR çeki kriterlerine göre güvende olduğu görülmektedir.



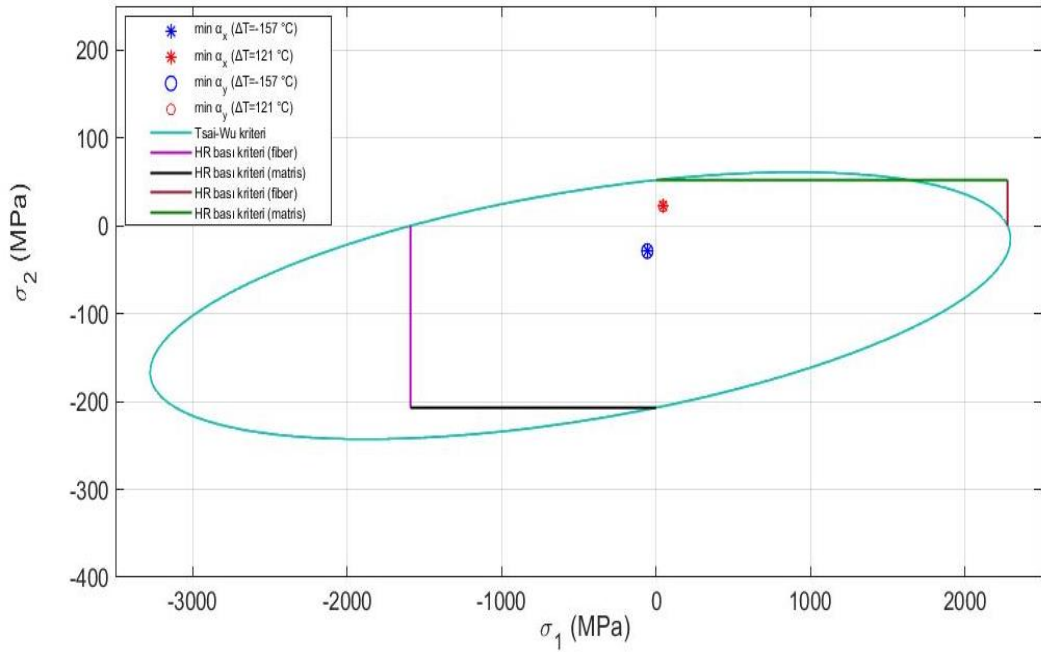
Şekil 7.8. Optimum $[4A / 4B]_{4S}$ dizilimindeki min α_x $[42/84/33/64/33/82/10/80]_S$, min α_y $[51/1/59/7/79/11/60/42]_S$, As4-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 7.9. Optimum $[4A / 4B]_{4S}$ dizilimindeki min α_x $[-35/35/27/-7/74/76/78/83]_S$, min α_y $[69/-38/57/56/18/25/20/31]_S$, Boron-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 7.10. Optimum $[4A/4B]_{4S}$ dizilimindeki min α_x $[61/56/88/88/7/36/88/34]_S$, min α_y $[1/28/0/0/1/21/1/0]_S$, AS4-Spektra /Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı



Şekil 7.11. Optimum $[4A/4B]_{4S}$ dizilimindeki min α_x $[45/90/45/90/45/90/45/90]_S$, min α_y $[45/0/45/0/45/0/45/0]_S$, AS4-E-cam/Epoksi kompozit plakanın farklı hasar teorilerine göre termal performansı

8.SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, hibrit olmayan ve hibrit tabakalı kompozit plakaların GA/GPSA hibrit algoritma kullanılarak boyutsal olarak kararlı tabakalı kompozit plaka tasarımı amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda iki çalışma gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, hibrit algoritma kullanılarak karbon/epoksi kompozit plakaların boyutsal kararlılık tasarımı yapılmıştır. Hibrit olmayan (tek malzemeli) 12 ve 16 tabakalı simetrik ve dengeli karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin optimum fiber açı dizilimleri, düşük termal genleşme katsayıları elde edebilmek için GA/GPSA hibrit algoritma yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Toplamda 32 farklı model problem oluşturulmuştur. Her bir problem, MATLAB programı ile oluşturulan hibrit algoritma ile 100 bağımsız çalıştırmada en az 10 kez çözülmüştür. Bu çalışma sonucunda optimum açı dizilimli karbon/epoksi kompozit plakalar ile x ve y global koordinatlarında kısıtsız veya E_x , E_y elastisite modülleri kısıtları altında, α_x ve α_y ısı genleşme katsayılarının 10^{-11} mertebesine kadar minimize edilebildiği ve E_x , E_y elastisite modüllerinin de verilen kısıtları sağladığı ve hatta çok daha yüksek değerlerin elde edilebildiği görülmüştür.

Bu çalışmaya ek olarak, seçilen boyutsal kararlı tasarımların sıcaklık değişimi karşısındaki mukavemeti, pozitif ve negatif sıcaklık değişimleri ($\Delta T = -157$ °C ve $\Delta T = 121$ °C) altında Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar kriterleri dikkate alınarak test edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, belirli sıcaklık değişimlerinde optimum kompozit plaka tasarımlarının Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar kriterlerine göre güvenli bölgede olduğu bulunmuştur. Bu çalışma sayesinde hibrit olmayan kompozit malzeme ile ulaşılabilecek en yüksek boyutsal kararlılık seviyesi tespit edilmiştir ve bu durum, hibrit tabakalı kompozit plakaların tasarımında elde edilebilecek daha yüksek boyutsal kararlılık için bir öncül oluşturmaktadır.

İkinci olarak, hibrit kompozit malzemeler ile boyutsal kararlılık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kullanılan hibrit kompozit malzemeler; Aramid/Epoksi, AS4/Epoksi, Boron/Epoksi, E-Cam/Epoksi, IM6/Epoksi, GY70/Epoksi, Kevlar49/Epoksi ve Spektra/Epoksi'dir. 16 tabakalı hibrit kompozit laminatların optimum fiber açı dizilimleri, düşük termal genleşme katsayıları elde edebilmek için iki malzeme içeren iki farklı simetrik dizilimde GA/GPSA hibrit algoritma yöntemi

kullanılarak araştırılmıştır. Toplamda 191 optimizasyon problemi içerisinde, hibrit olmayan tabakalı kompozitlere ait 16 problem, hibrit tabakalı kompozitlere ait 175 problem çözülmüştür. Her bir problem, MATLAB programı ile oluşturulan hibrit algoritma ile 100 bağımsız çalıştırmada en az 5 kez çözülmüştür. Bu çalışma sonucunda elde edilen $[A/B]_{4S}$ hibrit tasarımları ve $[4A/4B]_{4S}$ hibrit tasarımları kıyaslandığında, bu iki hibrit tasarıma ait α_x ve α_y ısı genleşme katsayılarının 10^{-10} mertebesine kadar minimize edilebildiği görülmüştür. Ayrıca, $[A/B]_{4S}$ hibrit tasarımlarının boyutsal kararlılık performansının $[4A/4B]_{4S}$ hibrit tasarımlarına göre biraz daha iyi bir seviyede olduğu sonucuna varılmıştır. Hibrit olmayan tasarımlarla tüm hibrit tasarımlar karşılaştırıldığında, hibrit olmayan tasarımlarda boyutsal kararlılık düzeylerinin 10^{-9} mertebesine kadar minimize edebildiği, hibrit tasarımlarda ise boyutsal kararlılık düzeylerinin 10^{-10} mertebesine kadar minimize edebildiği yani boyutsal kararlılık performanslarının daha iyi seviyeye geldiği yorumu yapılabilir. Hibrit kompozit malzemeler ile boyutsal kararlılık optimizasyonu sonucunda elde edilen sürekli ve geleneksel aç tasarımlarına bakıldığında, AS4/Epoksi, GY70/Epoksi, IM6/Epoksi ile elde edilen çoğu optimum tasarım ile minimum termal genleşme katsayılarına ulaşıldığı ve böylece boyutsal kararlılık performanslarının diğer hibrit tasarımlara kıyasla daha iyi olduğu söylenebilir. Ayrıca, iki malzeme dizilimi için de elde edilen tüm hibrit tasarımlarda boyutsal kararlılık düzeylerinin 10^{-7} ile 10^{-10} arasında olduğu ve birbirine yakın olduğu ifade edilebilir.

Bu çalışmaya ek olarak, seçilen boyutsal kararlı hibrit tasarımların sıcaklık değişimi karşısındaki dayanımı, belirli pozitif ve negatif sıcaklık değişimleri altında Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar kriterleri dikkate alınarak test edilmiştir. Sonuçlar dikkate alındığında, sıcaklık değişimleri altında hemen hemen seçilen bütün optimum hibrit kompozit plaka tasarımlarının hasar kriterlerine göre güvenli olduğu görülmektedir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, tabakalı kompozit plakalarda yüksek boyutsal kararlılık ve dolayısıyla minimum şekil değişimi elde edilmesinde farklı kompozit malzemeler kullanılarak optimum hibrit tabakalı kompozit plaka tasarımının önemli bir yer tuttuğu ortaya konmaktadır. Bu sonuç, özellikle hava ve uzay yapılarında kullanılabilecek tabakalı kompozit malzeme tasarımında gelecek optimizasyon çalışmalarına ışık tutmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abachizadeh, M., and Tahani, M. (2007)''Ant colony optimization of hybrid laminates for minimum cost and weight'', ***Proceedings of 6th international symposium on advanced composites***, Greece,1-9.
- Abachizadeh, M., and Tahani, M. (2009) ''An ant colony optimization approach to multi-objective optimal design of symmetric hybrid laminates for maximum fundamental frequency and minimum cost'', ***Structural and Multidisciplinary Optimization***, 37(4), 367–376.
- Adali, S. and Duffy, K. (1992) ''Minimum cost design of vibrating laminates by hybridization'', ***Engineering Optimization***, 19(4), 255–267.
- Adali, Verijenko and V. E. (2001) '' Optimum stacking sequence design of symmetric hybrid laminates undergoing free vibrations'', ***Composite Structures***, 54(2–3), 131–138.
- Aydin, L. (2011) ''Design of dimensionally-stable laminated somposites subjected to hygro-thermo-mechanical loading by stochastic optimization methods ''', Unpublished Master Thesis, ***Izmir Institute of Technology***, İzmir,20-120.
- Aydin, L., & Artem, H. S. (2011) ''Comparison of stochastic search optimization algorithms for the laminated composites under mechanical and hygrothermal loadings'', ***Journal of Reinforced Plastics and Composites***, 30(14), 1197–1212.
- Aydin, L., Aydin, O., Artem, H. S., and Mert, A. (2016) ''Design of dimensionally stable composites using efficient global optimization method'', ***Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications***, 0(0), 1-13.
- Aydin L., Artem H.S., 2010.'' Single and multi-objective genetic algorithm optimizations of the laminated composites used in satellite structures'', ***Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine Science***, İzmir, 219-226, 5-8.
- Ayvalık A.(2017)''Tabakalı biyokompozitlerin kırılma performanslarının stokastik yöntemler kullanarak optimize edilmesi'' Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, ***İzmir Kâtip Çelebi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmir,30-40.
- Bressan F., De Bona F., Soma A., (2004) ''Design of composite laminates with low thermal expansion'', ***Proc IMechE, Part L: Journal of Materials: Design and Applications***, 218, 201–209.
- Callister and Rethwisch (2006) Fundamentals of Materials Science and Engineering An Integrated Approach 3nd ed., United States , 617-656.
- Çakar K.(2009) '' Genetik Algoritmalar Yardımıyla Acil Servis İstasyonu Yerleşiminin Optimizasyonu'',Yayınlanmamış Doktora Tezi, ***Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü***, Erzurum,50-70.

Diaconu C.G., Sekine H., (2003) ‘‘Flexural characteristics and layup optimization of laminated composite plates under hygrothermal conditions using lamination parameters’’, **Journal of Thermal Stresses**, 26, 905–922.

Darıcık F.ve Kıratlı S.(2021).’’ Farklı Çevresel Şartlarda İki Eksenli Yüklemelelere Maruz Tabakalı Kompozit Malzemelerin Hasarı’’, **Dergi Park**, Cilt 36, Sayı 1, 219 – 234.

Deveci, A. (2011). ‘‘Optimum design of anti-buckling behaviour of the laminated composites considering puck failure criterion by genetic algorithm’’, Unpublished Master Thesis, **Izmir Institute of Technology**, İzmir,45-65.

Donald F., Adams Leif A., Carlsson R. and Byron P. (2002) Experimental Characterization of Advanced Composite Materials 3rd ed., New York, 1-10.

Gülmez S.(2018).’’ Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler’’,Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Pamukkale, 55-70.

Gurdal, Z., Haftka, R.T., & Hajela, P. (1999) Design and optimization of laminated composite materials, New York, 1-30.

Hashin Z., and Rotem A. (1973) ‘‘A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials’’, **Journal of Composite Materials** ,448-64.

Jones, R.M., (1975). Mechanics of composite materials, **McGraw-Hill Kogakusha Ltd.,Tokyo** 2nd ed., United States , 1-50.

Kaw, A. K. (2006) Mechanics of composite materials 2nd., Optics Express,1-270.

Kalemtaş A. (2014)’’ Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış’’ Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve **Malzeme Mühendisliği Bölümü Mühendislik Fakültesi Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla**,1-8.

Karaboğa, D. (2004) Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları, Atlas Yayıncılık, İstanbul, 1-4.

Karasoy, O. , Ballı, S.(2016) ’’İçerik Tabanlı İstenmeyen SMS Filtreleme için Mobil Uygulama Geliştirilmesi ve Sınıflandırma Algoritmalarının Karşılaştırılması’’, **International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium**, Muğla, 47-52.

Katunin A, Krukiewicz K, Turczyn R, Sul P, Bilewicz M (2017) ‘‘Electrically conductive carbon fibre-reinforced composite for aircraft lightning strike protection’’, **Presented at: 7th International Conference on Key Engineering Materials**, Malaysia,1-5.

Khalil M., Bakhiet E., El-Zoghby A., (2001) ‘‘Optimum design of laminated composites subjected to hygrothermal residual stresses’’, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F, Journal of rail and rapid transit**, 215, 175-186.

Koruvatan A.(2008) ‘‘Farklı kür sıcaklığı ve sürelerinde üretilen tabakalı kompozit plakaların pimli/cıvatalı bağlantılarının hasar analizinin incelenmesi’’, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir,50-80.

Kıyasöz A.(2018) ‘‘Alüminyum Matrisli Titanyumdiborür İn Situ Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu’’, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 45-55.

Le Rich R., Gaudin J., (1998) ‘‘Design of dimensionally stable composites by evolutionary optimization’’, **Composite Structure**, 41, 97-111.

Mallick, P. K. (2007). Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design **Taylor & Francis Group, LLC**, 3rd ed., Boca Raton, 1-50.

Mangalgiri, P.,D.(1999). ‘‘Composite materials for aerospace applications’’ **Indian Academy of Sciences**, 657-664.

NASA ‘uzayda malzemelerin dayanabileceği termal yüklemeler’
<https://www.nasa.gov/> son erişim tarihi :01.10.2021

Nemhauser, G.L., Rinnooy Kan, A.H.G., Todd, M.J. (1998) Handbooks in Operations Research and Management Science, **Elsevier Science** 3rd ed., Amsterdam, 200-220.

Okutan B. (2001) ‘‘ Stress And Failure Analysis Of Laminated Composite Pinned Joints’’, Unpublished Master Thesis, Dokuz **Eylül University**, İzmir, 60-65.

Rao, S. S. (2009) Engineering Optimization Theory and Practice, **Wiley** 5nd ed., United States , 200-240.

Spall, James C.,(2003) Introduction to Stochastic Search and Optimization ,**Wiley and Sons Inc.**, New Jersey.

Tsai S. W., and H. T. Hahn. (1980) Introduction to Composite Materials, **Technomic Publishing Company**, USA.

Vinson, J. R., & Sierakowski, R. L. (2004) The Behavior of Structures Composed of Composite Materials , **Kluwer Academic Publishers**, 5nd ed., Canada.

Weise, T., (2008) Global Optimization Algorithms Theory and Application **Journal of Computer And Communications**, 2nd ed., Canada.

Yang, Xin-She. (2010) Engineering optimization an introduction with metaheuristicapplications, Hoboken, NJ: **John Wiley**, Canada.

Zhu R.P., Sun C.T., (2003) ‘‘Effects of fiber orientation and Elastic constants on coefficients of thermal expansion in laminates ‘’, **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 10, 99-107.

EKLER

Ek-1. Matlab Bilgisayar programı (Tek malzeme için)

```
function f = alfaxx(x)
Nply = 16; % Tabaka sayısı
n4=Nply/4;
n2=Nply/2;
h_ply = 0.150; %[mm]

%--> Tek bir tabakanın kalınlığı [mm]
% elastik mühendislik sabitleri

E1 = 277.3*(10^3); %[MPa]
E2 = 7.1*(10^3); %[Pa]
G12 = 3.49*(10^3); %[Pa]
nu12 = 0.29;
nu21 = (nu12*E2)/E1;

% temel rijitlik matrisi%
Q11=E1/1-((nu12)*(nu21));
Q12=((nu12)*E2)/1-((nu12)*(nu21));
Q22=E2/1-((nu12)*(nu21));
Q66=G12;

%Toplam Kalınlık%
t = Nply*h_ply ; %Toplam Kalınlık
for j = 1:(Nply+1)
    h(j) = -(t/2-((j-1)*(t/Nply))); %H0,H1,H2,H3'ün bulunması
end

% 0-45-90 fiber angles %
% j=1;
% for i=1:n4
```

```

%
% if x(i)>=30
% x1(j)=90;
% x1(j+1)=90;
% j=j+2;
%
% elseif x(i)>=-30
% x1(j)=45;
% x1(j+1)=-45;
% j=j+2;
% else
%
% x1(j)=0;
% x1(j+1)=0;
% j=j+2;
% end
% end
%

```

```

% balance & symmetry
for i=1:n4
x1(j)=x(i);
x1(j+1)=-x(i);
j=j+2;
end

```

```

for i=1:n2
x(i)=x1(i);

end
for i=1:n2
x(n2+i)=x(n2-i+1);
end

```

```
% A matrisinin hesaplanması%
```

```
A=zeros(3,3);
```

```
%Dönüştürülmüşindirgenmiş rijitlik matrisi
```

```
%k=tabaka adı
```

```
% x_half=[x(1) -x(1) x(2) -x(2)];
```

```
% x_half=[x(1) -x(1) x(2) -x(2) x(3) -x(3)];
```

```
x_half=[x(1) -x(1) x(2) -x(2) x(3) -x(3) x(4) -x(4)];
```

```
x = [x_half fliplr(x_half)];
```

```
%
```

```
for k=1:Nply
```

```
    c=cos((x(k)*pi)/180);
```

```
    s=sin((x(k)*pi)/180);
```

```
    Qbar11 = Q11*c^4 + 2*(c^2)*(s^2)*(Q12+2*Q66) + Q22*s^4;
```

```
    Qbar12 = Q12*(c^4 + s^4) + (Q11+Q22-4*Q66)*(c^2)*(s^2);
```

```
    Qbar22 = Q11*s^4 + 2*(Q12+2*Q66)*(c^2)*(s^2) + Q22*c^4;
```

```
    Qbar16 = (Q11-Q12-2*Q66)*s*(c^3) + (Q12-Q22+2*Q66)*c*(s^3);
```

```
    Qbar26 = (Q11-Q12-2*Q66)*c*(s^3) + (Q12-Q22+2*Q66)*s*(c^3);
```

```
    Qbar66 = (Q11+Q22-2*Q12-2*Q66)*(c^2)*(s^2) + Q66*(c^4+s^4);
```

```
    eval(['Qbar_' num2str(k) '=[Qbar11 Qbar12 Qbar16;Qbar12 Qbar22 Qbar26;Qbar16  
        Qbar26 Qbar66];']);
```

```
    A(1,1)=A(1,1)+Qbar11*(h(1,k+1)-h(1,k));
```

```
    A(1,2)=A(1,2)+Qbar12*(h(1,k+1)-h(1,k));
```

```
    A(1,3)=A(1,3)+Qbar16*(h(1,k+1)-h(1,k));
```

```
    A(2,2)=A(2,2)+Qbar22*(h(1,k+1)-h(1,k));
```

```
    A(3,3)=A(3,3)+Qbar66*(h(1,k+1)-h(1,k));
```

```
    A(2,3)=A(2,3)+Qbar26*(h(1,k+1)-h(1,k));
```

```
end
```

```
A(2,1)=A(1,2);
```

```
A(3,2)=A(2,3);
```

```
A(3,1)=A(1,3);
```

```

A_ters=inv(A);
% Delta_t=1 sıcaklık değişimine karşılık gelen hayali termal kuvvetler

alfa_1 = -1*(10^-6); %[1/°C]
alfa_2 = 22.42*(10^-6); %[1/°C]
N_t=0;
for j=1:Nply
    c=cos((x(j)*pi)/180);
    s=sin((x(j)*pi)/180);
    Qbar_=eval(['Qbar_' int2str(j)]);
    alfax=(alfa_1*c^2)+(alfa_2*s^2);
    alfay=(alfa_2*c^2)+(alfa_1*s^2);
    alfaxy=2*((alfa_1-alfa_2)*c*s);
    alfa=[alfax;alfay;alfaxy];
    N_t = N_t + Qbar_*alfa*(h(j+1)-h(j));
end

N_x = N_t(1,1);
N_y = N_t(2,1);
N_xy = N_t(3,1);
alfa_x = A_ters(1,1)*(N_x) + A_ters(1,2)*(N_y) + A_ters(1,3)*(N_xy);

if alfa_x > 0
    f = min(alfa_x);
elseif alfa_x < 0
    f = -min(alfa_x);
end
% f = min(alfa_x);
% f = -min(alfa_x);
end

```

Ek-2. Matlab Bilgisayar programı (Hibrit malzeme için)

```
function f=as4_eglass_epoxy_alfayy_hbrd_objfun(x)
% Tabaka sayısı
Nkatman = 16;
T_T_K = 0.125; %[mm]

% n2 = Nkatman/2;
% n4 = Nkatman/4;

%%%%gy70/epoksi elastik mühendislik sabitleri
E1_as4 = 138*(10^9);
E2_as4 = 10.3*(10^9);
nu12_as4 = 0.30;
nu21_as4 = (nu12_as4*E2_as4)/E1_as4;
G12_as4 = 6.9*(10^9);

%%%%gy70 /epoksi temel rijitlik matrisi%
Q11_as4 = E1_as4/1-((nu12_as4)*(nu21_as4));
Q12_as4 = ((nu12_as4)*E2_as4)/1-((nu12_as4)*(nu21_as4));
Q22_as4 = E1_as4/1-((nu12_as4)*(nu21_as4));
Q66_as4 = G12_as4;

%%%%Eglass/epoksi elastik mühendislik sabitleri
E1_eg= 43*(10^9);
E2_eg= 9.7*(10^9);
nu12_eg=0.26 ;
nu21_eg= (nu12_eg*E2_eg)/E1_eg;
G12_eg =6.2 *(10^9);

%%%%eglass/epoksi temel rijitlik matrisi%
Q11_eg = E1_eg/1-((nu12_eg)*(nu21_eg));
Q12_eg = ((nu12_eg)*E2_eg)/1-((nu12_eg)*(nu21_eg));
```

```

Q22_eg = E2_eg/1-((nu12_eg)*(nu21_eg));
Q66_eg = G12_eg;

```

```

%%%%Toplam Kalınlık
t = Nkatman*T_T_K ;
for j = 1:(Nkatman+1)
    h(j) = -(t/2-((j-1)*(t/Nkatman))); %H0,H1,H2,H3'ün bulunması
end
% % 0-45-90 fiber angles %
%
% j=1;
% for i=1:n4
%
% if x(i)>=30
% x1(j)=90;
% x1(j+1)=90;
% j=j+2;
%
% elseif x(i)>=-30
% x1(j)=45;
% x1(j+1)=-45;
% j=j+2;
% else
%
% x1(j)=0;
% x1(j+1)=0;
% j=j+2;
% end
% end

% % balance & symmetry
%
% for i=1:n4
% x1(j)=x(i);

```

```

% x1(j+1)=-x(i);
% j=j+2;
% end
%
% for i=1:n2
% x(i)=x1(i);
% end
%
%
% for i=1:n2
% x(n2+i)=x(n2-i+1);
% end

```

```

%% %% A matrisinin bulunması %%

```

```

A_as4=zeros(3,3);
A_eg=zeros(3,3);

```

```

% % İstifleme sırası
% x_half=[x(1) -x(1) x(2) -x(2) x(3) -x(3) x(4) -x(4)];
% x_half=[x(1) x(2) x(3) x(4) x(5) x(6) x(7) x(8)];
% x = [x_half fliplr(x_half)];

```

```

% % dönüştürülmüş indirgenmiş rijitlik matrisi
for i=1:2:(Nkatman/2)-1
    c=cos((x(i)*pi)/180);
    s=sin((x(i)*pi)/180);
    Qbar11 = (Q11_as4*c^4 + 2*(c^2)*(s^2)*(Q12_as4+2*Q66_as4) + Q22_as4*s^4);
    Qbar12 = (Q12_as4*(c^4 + s^4) + (Q11_as4+Q22_as4-4*Q66_as4)*(c^2)*(s^2));
    Qbar22 = (Q11_as4*s^4 + 2*(Q12_as4+2*Q66_as4)*(c^2)*(s^2) + Q22_as4*c^4);
    Qbar16=(Q11_as4Q12_as4)2*Q66_as4)*s*(c^3)+(Q12_as4Q22_as4+2*Q66_as4)
    *c*(s^3);

```

```

Qbar26=(Q11_as4Q12_as42*Q66_as4)*c*(s^3)+(Q12_as4Q22_as4+2*Q66_as4)
*s*(c^3);
Qbar66=(Q11_as4+Q22_as42*Q12_as42*Q66_as4)*(c^2)*(s^2)+Q66_as4*(c^4+s^4);
eval(['Qbaras4_' num2str(i) ']=[Qbar11 Qbar12 Qbar16;Qbar12 Qbar22 Qbar26;Qbar16
Qbar26Qbar66];'])
end
for i=1:2:(Nkatman/2)-1
Qbaras4_=eval(['Qbaras4_' int2str(i)]);
A_as4= A_as4 + Qbaras4_*(((h(1,i+1))-(h(1,i)))));

end

A_as4 = 2* A_as4;

% % dönüştürülmüş indirgenmiş rijitlik matrisi
for i=2:2:(Nkatman/2)
c=cos((x(i)*pi)/180);
s=sin((x(i)*pi)/180);

Qbar11 = (Q11_eg*c^4 + 2*(c^2)*(s^2)*(Q12_eg+2*Q66_eg) + Q22_eg*s^4);
Qbar12 = (Q12_eg*(c^4 + s^4) + (Q11_eg+Q22_eg-4*Q66_eg)*(c^2)*(s^2));
Qbar22 = (Q11_eg*s^4 + 2*(Q12_eg+2*Q66_eg)*(c^2)*(s^2) + Q22_eg*c^4);
Qbar16=(Q11_egQ12_eg2*Q66_eg)*s*(c^3)+(Q12_egQ22_eg+2*Q66_eg)*c*(s^3);
Qbar26=(Q11_eg-Q12_eg-2*Q66_eg)*c*(s^3)+(Q12_egQ22_eg+2*Q66_eg)*s*(c^3);
Qbar66= (Q11_eg+Q22_eg-2*Q12_eg-2*Q66_eg)*(c^2)*(s^2) + Q66_eg*(c^4+s^4);

eval(['Qbareg_' num2str(i) ']=[Qbar11 Qbar12 Qbar16;Qbar12 Qbar22 Qbar26;Qbar16
Qbar26 Qbar66];'])

end
for i=2:2:(Nkatman/2)
Qbareg_=eval(['Qbareg_' int2str(i)]);
A_eg= A_eg + Qbareg_*(((h(1,i+1))-(h(1,i)))));

```

```

end

A_eg = 2* A_eg;

A_toplam=(A_as4 + A_eg);

A_ters=inv(A_toplam);

%as4 ısı genleşme katsayısı
alfa_1 = -0.1*(10^-6); %[1/°C]
alfa_2 = 18*(10^-6); %[1/°C]

% eglass ısı genleşme katsayısı
alfa_3 = 6.4*(10^-6); %[1/°C]
alfa_4 = 16*(10^-6); %[1/°C]

N_t_eg=0;

N_t_as4=0;

for j=1:2:(Nkatman/2)-1
    c=cos((x(j)*pi)/180);
    s=sin((x(j)*pi)/180);
    Qbaras4_=eval(['Qbaras4_' int2str(j)]);
    alfax=(alfa_1*c^2)+(alfa_2*s^2);
    alfay=(alfa_2*c^2)+(alfa_1*s^2);
    alfaxy=2*((alfa_1-alfa_2)*c*s);
    alfa=[alfax;alfay;alfaxy];

    Nt_as4 =N_t_as4 + Qbaras4_*alfa*(h(j+1)-h(j));

end

Nt_as4 = 2* N_t_as4;

```

```

for j=2:2:(Nkatman/2)

    c=cos((x(j)*pi)/180);
    s=sin((x(j)*pi)/180);
    Qbareg_=eval(['Qbareg_' int2str(j)]);

    alfax=(alfa_3*c^2)+(alfa_4*s^2);
    alfay=(alfa_4*c^2)+(alfa_3*s^2);
    alfaxy=2*((alfa_3-alfa_4)*c*s);
    alfa=[alfax;alfay;alfaxy];

    N_t_eg =N_t_eg + Qbareg_*alfa*(h(j+1)-h(j));

end

Nt_eg = 2* N_t_eg;

Nt= Nt_as4 + Nt_eg;

N_x = Nt(1,1);
N_y = Nt(2,1);
N_xy = Nt(3,1);

alfa_y = A_ters(2,1)*(N_x)+ A_ters(2,2)*(N_y)+ A_ters(2,3)*(N_xy);

if alfa_y > 0
    f = min(alfa_y);
elseif alfa_y < 0
    f = -min(alfa_y);
end
end

```