

**İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TABAKALI BİYOKOMPOZİTLERİN KIRILMA PERFORMANSLARININ  
STOKASTİK YÖNTEMLER KULLANARAK OPTİMİZE EDİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aynur AYVALIK  
Y140102002**

**Biyokompozit Anabilim Dalı**

**Biyokompozit Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Levent AYDIN**

**HAZİRAN 2017**

İKÇÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün Y140102002 numaralı Yüksek Lisans/~~Doktora~~ öğrencisi, "Aynur AYVALIK", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TABAKALI BİYOKOMPOZİTLERİN KIRILMA PERFORMANSLARININ STOKASTİK YÖNTEMLER KULLANARAK OPTİMİZE EDİLMESİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Yrd. Doç. Dr. Levent AYDIN**  
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Mehmet Özgür SEYDİBEYOĞLU**  
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Bahar BOZKURT BAŞTÜRK**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 06.07.2017  
**Savunma Tarihi** : 06.06.2017

Hayat arkadaşım ve gurur kaynağım İsmet AYVALIK'a...



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her türlü yardımlarını esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Levent AYDIN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullandığım malzemenin patent sahibi, Ege Üniversitesi Ar.Gör. Dr.Burcu KARACA'ya yardımlarından dolayı çok teşekkür ediyorum.

Ayrıca tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan, desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, Yük. Makina Müh. Melih SAVRAN'a, Ar. Gör. Arda DEVECİ'ye, Ozan AYAKDAŞ'a ve Mehmet AKÇAIİR'e çok teşekkür ediyorum.

Son olarak çalışmam boyunca her türlü desteği sağlayan ve beni ayakta tutan çocuklarım Kübra ve Kerem AYVALIK'a özellikle en büyük destekçim ve yardımcıım, hayat arkadaşım, sevgili eşim İsmet AYVALIK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2017

Aynur AYVALIK



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY.....	ix
<b>BÖLÜM 1 GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Literatür Çalışması.....	1
1.2. Amaç.....	4
<b>BÖLÜM 2 KOMPOZİT MALZEMELER.....</b>	<b>6</b>
2.1. Giriş.....	6
2.2. Biyokompozit Malzemeler.....	15
<b>BÖLÜM 3 KOMPOZİT MALZEME MEKANİĞİ.....</b>	<b>21</b>
3.1. Klasik Laminasyon Teorisi.....	22
3.2. Tabakalı Kompozitlerin Burkulma Analizi.....	27
<b>BÖLÜM 4 TABAKALI KOMPOZİTLERDE HASAR TEORİLERİ..</b>	<b>30</b>
4.1. Maksimum Gerilme Hasar Teorisi.....	30
4.2. Tsai-Wu Hasar Teorisi.....	31
4.3. Hashin-Rotem Hasar Teorisi.....	32
<b>BÖLÜM 5 OPTİMİZASYON.....</b>	<b>33</b>
5.1. Optimizasyon Yöntemleri.....	34
5.1.1. Nelder-Mead Algoritması(NM).....	35
5.1.2. Genetik Algoritma(GA).....	38
5.1.3. “Simulated Annealing” Algoritması (SA).....	39
5.2. Mathematica Programı.....	40
5.2.1 NMinimize Komutu.....	40
<b>BÖLÜM 6 BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>44</b>
6.1. Problem Tanımı.....	44
6.2. Optimizasyon Sonuçları.....	46
6.3. Grafit/epoksi Tabakalı Kompozitlerde Optimum Lif Açılış Dizilimlerinin Nelder-Mead Algoritması Kullanılarak Bulunması.....	51
6.4. Grafit/Epoksi Malzeme İçin Kırılma Hasar Analizi.....	66
6.5. Keten / Polipropilen Tabakalı Kompozitlerde Optimum Lif Açılış Dizilimlerinin Nelder-Mead Algoritması Kullanılarak Bulunması.....	69
6.5.1. Keten/Polipropilen Prepreg Üretimi.....	69
6.5.2. Keten /Polipropilen malzemenin optimizasyonu.....	70
6.5.3. Keten / Polipropilen Malzeme Kırılma Hasar Analizi....	74
<b>BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>77</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>78</b>

## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Tablo 2.1:</b> Geleneksel malzemelerin çeşitli özellikleri.....	6
<b>Tablo 2.2:</b> Çeşitli metal,elyaf ve kompozitlere ait özgül modül ve özgül mukavemet değerleri.....	8
<b>Tablo 2.3:</b> Termoplastikler ile termosetler arasındaki farklılıklar.....	9
<b>Tablo 2.4:</b> Metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri.....	10
<b>Tablo 2.5:</b> Seramik matris kompozitlerin mekanik özellikleri.....	11
<b>Tablo 2.6:</b> Cam, Kuvarz, Bor, Karbon, Kevlar elyaf türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması.....	14
<b>Tablo 2.7:</b> Doğal liflerin kimyasal bileşenleri.....	17
<b>Tablo 2.8:</b> Bazı doğal liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	18
<b>Tablo 2.9:</b> Otomotiv sektöründe kullanılan farklı malzemelerle biyokompozitlerin karşılaştırılması.....	20
<b>Tablo 5.1:</b> Biyolojik evrim terimlerin, Genetik Algoritma'daki karşılıklar....	38
<b>Table 6.1:</b> Grafit/epoksi ve karbon/epoksi laminaların elastik özellikleri.....	45
<b>Tablo 6.2:</b> Grafit/epoksi laminanın maksimum dayanım değerleri .....	45
<b>Tablo 6.3:</b> Kompozit tabakanın yükleme durumları ve geometrileri.....	47
<b>Tablo 6.4:</b> Grafit/epoksi malzeme için kritik burkulma yük indeksi Doğrulaması.....	47
<b>Tablo 6.5:</b> $N_x=10000$ ve $N_x=-10000$ yükleme durumunda Karbon/epoksi malzeme için hasar kriterleri doğrulaması.....	48
<b>Tablo 6.6:</b> $N_x=3000$ N/mm , $N_y=3000$ N/mm yükleme durumunda Karbon /epoksi malzeme için hasar kriterleri doğrulaması.....	49
<b>Tablo 6.7:</b> $N_x=-3000$ N/mm; $N_y=-3000$ N/mm yükleme durumunda Karbon /epoksi malzeme için hasar kriterleri doğrulaması.....	49
<b>Tablo 6.8:</b> Grafit/epoksi, $N_x/N_y=1$ ve $a/b=2$ yükleme durumu için, Differential Evolution Algoritması optimizasyon sonuçları.....	50
<b>Tablo 6.9:</b> Grafit/epoksi, $N_x/N_y=1$ ve $a/b=2$ yükleme durumu için, Simulated Annealing Algoritması optimizasyon sonuçları.....	51
<b>Tablo 6.10:</b> Nelder-Mead Algoritması kullanılarak $0^\circ$ , $\pm 45^\circ$ $90^\circ$ yönelimlerinde farklı yükleme koşulları ve geometriler için, Grafit/epoksi malzeme için bulunan kritik burkulma yük indeksi değerleri ve açı örnekleri.....	52
<b>Tablo 6.11:</b> $N_x/N_y=1$ ve $a/b=2$ yükleme koşullarında Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	52

<b>Tablo 6.12:</b> $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 1$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	52
<b>Tablo 6.13:</b> $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 1/2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	54
<b>Tablo 6.14:</b> $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	55
<b>Tablo 6.15:</b> $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 1$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	57
<b>Tablo 6.16:</b> $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 1/2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	57
<b>Tablo 6.17:</b> $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	57
<b>Tablo 6.18:</b> $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 1$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	58
<b>Tablo 6.19:</b> $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 1/2$ yükleme koşullarında Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.....	58
<b>Tablo 6.20:</b> LC1 ve $0_2, \pm 45, 90_2$ kullanılarak elde edilen global optimumların literatür çalışmalarıyla karşılaştırılması.....	62
<b>Tablo 6.21:</b> Önceki çalışmalarda GA, HA, GPSA ile elde edilen $\lambda cb$ ve konfigürasyon sonuçların NM sonuçlarıyla karşılaştırılması...	64
<b>Tablo 6.22:</b> Grafit/Epoksi Malzemenin (Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem kullanılarak) kırılma hasar analizi.....	68
<b>Tablo 6.23:</b> Keten/polipropilen malzeme özellikleri.....	70
<b>Tablo 6.24:</b> Keten/polipropilen malzemenin maksimum dayanım değerleri...	70
<b>Tablo 6.25:</b> Nelder-Mead Algoritması kullanılarak $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ yönelimlerinde farklı yükleme ve $a/b$ oranlarında Nelder-Algoritması kullanılarak bulunan kritik burkulma yük indeksleri ve açı örnekleri.....	71
<b>Tablo 6.26:</b> $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar.....	71
<b>Tablo 6.27:</b> $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 1$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar.....	72

<b>Tablo 6.28:</b> $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 1/2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar .....	72
<b>Tablo 6.29:</b> $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar .....	73
<b>Tablo 6.30:</b> $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 1$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar .....	73
<b>Tablo 6.31:</b> $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 1/2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar .....	73
<b>Tablo 6.32:</b> $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için Bulunan optimum tasarımlar .....	73
<b>Tablo 6.33:</b> $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 1$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar .....	74
<b>Tablo 6.34:</b> $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 1/2$ yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar .....	74
<b>Tablo 6.35:</b> Keten /Polipropilen Malzemenin (Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem kullanılarak) kırılma hasar analizi kırılma hasar analizi .....	76



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Farklı zamanlarda kullanılan geleneksel malzemelerin ve kompozitlerin özgül mukavemet değerleri.....	7
Şekil 2.1: Takviye formuna göre kompozitler.....	11
Şekil 2.3: Karbon liflerinin alanlarına göre kullanım miktarları.....	14
Şekil 2.4: Lif takviyeli kompozit malzemelerin 2002 yılı kullanım oranları	15
Şekil 2.5: Biyokompozitlerin yıllara göre pazar payı (milyon dolar). ....	19
Şekil 3.1: Tabakalı kompozit malzeme.....	21
Şekil 3.2: Kompozit malzemeler için analiz tipleri ve aşamaları.....	22
Şekil 3.3: Düzlem yüklemeye tabi tutulmuş, kompozit laminatta lokal ve global eksenler.....	23
Şekil 3.4: Laminat kompozitte tabaka koordinatları.....	23
Şekil 3.5: Kompozit laminat üzerindeki kuvvet ve moment bileşenleri.....	26
Şekil 3.6: Çift eksenli yükleme yapılmış, basit mesnetli tabakalı kompozit..	27
Şekil 5.1: Amaç fonksiyonunun ( $f(x)$ ) minimum ve maksimumu.....	34
Şekil 5.2: Üç boyutlu uzayda değişken boyutlu simpleksler.....	35
Şekil 5.3: İki boyutlu simpleksin hareket olasılıkları.....	36
Şekil 5.4: Simpleksin optimum noktayı bulmak için ilerleme basamakları.	37
Şekil 5.5: Nelder-Mead Algoritması akış şeması.....	37
Şekil 5.6: Mathematica Programında NMinimize komutunun Kullanılması ile ilgili ekran görüntüsü.....	41
Şekil 5.7: "Simulated Annealing" çözücüsü seçenekleri.....	42
Şekil 5.8: "Differential Evolution" çözücüsü seçenekleri.....	42
Şekil 5.9: "Nelder-Mead" çözücüsü seçenekleri.....	43
Şekil 6.1: Çift eksenli yükleme yapılmış, basit mesnetli tabakalı kompozit..	44
Şekil 6.2: $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 2$ yükleme durumu için seçilen Nelder-Mead parametreleri - $\lambda cb$ durum grafiği.....	63
Şekil 6.3 $N_x/N_y = 1$ ve $a/b = 1/2$ yükleme durumu için seçilen Nelder-Mead parametreleri - $\lambda cb$ durum grafiği.....	65
Şekil 6.4 $N_x/N_y = 2$ ve $a/b = 2$ durumu için seçilen Nelder-Mead parametreleri - $\lambda cb$ durum grafiği.....	65
Şekil 6.5 $N_x/N_y = 1/2$ ve $a/b = 1/2$ yükleme durumu için seçilen Nelder-Mead parametreleri - $\lambda cb$ durum grafiği.....	66
Şekil 6.6: Keten /polipropilen lif.....	69

# TABAKALI BİYOKOMPOZİTLERİN KIRILMA PERFORMANSLARININ STOKASTİK YÖNTEMLER KULLANARAK OPTİMİZE EDİLMESİ

## ÖZET

Son yıllarda lif takviyeli, tabakalı kompozit malzemeler, dayanıklılık ve hafiflik gibi avantajlarından dolayı mühendislik uygulamalarında artarak kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde çevreci yaklaşımlar; tarımsal sürdürülebilir ve hafif malzemeler olan doğal liflerin cam liflerine alternatif takviye malzemesi olarak kullanılmasının büyük önem taşıdığını ifade etmektedirler. Doğal lifler arasında, düşük yoğunluk ve diğerlerine nazaran yüksek özgül mukavemet özellikleri ile keten lifleri en çok ilgi çeken liflerdir. Kompozit malzemelerde kullanılan doğal liflerin standart sentetik liflere nazaran dayanımları düşük olduğundan kırılma performanslarının artırılmaya ihtiyacı vardır. Bu tezde, iki eksenli düzlem içi bası yükleri altında ve dört taraftan basit mesnetli 64 tabakalı Keten/polipropilen biyokompozit ve 64 tabakalı Grafit/epoksi plakaların burkulma karşıtı davranışlarının optimum tasarımı Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin - Rotem kriteri esas alınarak stokastik yöntemlerden Nelder-Mead Algoritması ile araştırılmıştır. Tabakalar, simetrik ve balans olarak alınmıştır. Amaç fonksiyonu olarak kritik burkulma indeksi ve tasarım değişkenleri olarak fiber oryantasyonları alınmıştır. Çeşitli yükleme durumları ve plaka  $a/b$  boyut oranları için kritik burkulma indeksi maksimize edilmiştir. Elde edilen optimum tasarımlar Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem kırılma kriterinden yararlanılarak tabaka tabaka kontrol edilmiştir. Sonuç olarak, tabakalı biyokompozitlerin burkulma ve kırılma dayanımı göz önüne alınarak optimum tasarımlarının plaka  $a/b$  boyut oranına, yük ve yük oranına bağlı olduğu bulunmuştur.

# **FAILURE PERFORMANCE OPTIMIZATION OF LAMINATED BIOCOMPOSITES BY USING STOCHASTIC METHODS**

## **SUMMARY**

In decades years fiber-reinforced, layered composite materials have been acceleratingly used in engineering practises due to their advantages such as durability and weightlessness. Environmentalist approaches in the automotive industry is expressed that the use of natural fibers, which are agricultural sustainable and light materials, as an alternative reinforcing material to glass fibers is of utmost importance. In the natural fibers, flax fibers are the most attractive lifes with low density and high specific strength properties compared to others. Since the strength of natural fibers used in composite materials is lower than that of standard synthetic fibers, it is necessary to improve the fracture performances. In this study, optimum design of anti-buckling behaviors of 64 layered flax/ polypropylene biocomposite and 64 layered Graphite /epoxy plates that subject to biaxial compressive in-plane loads and simply suportted on four sides are examined take into the Maximum Stress, Tsai-Wu and Hashin-Rotem criteria, Nelder-Mead Algorithm The plates are symmetrical and balanced. Fiber orientations are taken as design variables and critical buckling index are taken as objective function. The critical buckling index for various loading situations and plate aspect ratios have been maximized. As a result, it is obtained that the optimum designs of laminated composites taking into buckling and ply failure strength subjected to load and loading ratio. Also it is related with plate aspect ratio.

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

### 1.1 Literatür Çalışması

Son yıllarda lif takviyeli kompozitler, hafiflik, sertlik, yüksek mukavemet ve diğer malzemelerden daha iyi mekanik özelliklere sahip olmak gibi avantajlarından dolayı uzay, hava, otomotiv ve deniz gibi birçok modern mühendislik sektöründe artarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin yapıları kullanım yerlerine göre kiriş, plak, kabuk şeklinde olabilirler. **Plak**; boyut olarak yan yüzeylerin paralel yüzeylere oranla daha küçük olduğu yapılardır. Kompozit plaklar **katman** ya da **tabaka** halindeki yapıların birleştirilmesiyle oluşturulur (Aydoğdu 2003). Bu çalışmada kullanılacak kompozit plağın, tabakalardan ve sürekli liflerden oluştuğu kabul edilmiştir.

Bir ürünün piyasada rekabet edebilmesi, ürünün dayanıklı, kaliteli, ucuz olmasını gerektirir. Bu kompozit malzemeler için de geçerli bir kuraldır, dolayısıyla en uygun ürün tasarımının yapılması gerekir. Optimizasyon çalışmalarıyla en uygun tasarımlar en kısa zamanda yapılabilir.

Lif takviyeli kompozitlerin bir başka avantajı ise, lif oryantasyonları, kat kalınlığı, takviye hacmi gibi bir çok parametrenin tasarımcının ihtiyacına göre değiştirilebilir olmasıdır. Bu parametreler kompozit malzemenin mekanik ve termal özelliklerini de değiştirir. Tabakaların dizilimi, ağırlığın ve maliyetin minimize edilmesinde, çevre etkileri ve burkulmaya karşı dayanımın belirlenmesinde önemli rol oynar. Bu nedenle, amaç fonksiyonu ve tasarım değişkenleri optimizasyon işlemleri için çok önemlidir.

Pek çok araştırmacı, tabakalı kompozit malzemelerin optimizasyonu için literatürdeki değişik teknikleri kullanarak birçok çalışma gerçekleştirmiştir. Literatürde çokça kullanılan optimizasyon yöntemleri, Genetik Algoritma(GA), Benzetimli Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm (SA) ), Tabu Arama(Tabu Search), Model Arama(Pattern Search) ve Karınca Koloni Optimizasyonudur (Ant Colony Optimization (ACO)).

Tabakalı kompozitlerin ağırlık (kalınlık) minimizasyonu araştırmacılar tarafından kullanılan tasarım konularından biridir. Riche ve Haftka stokastik optimizasyon metodlarından olan Genetik Algoritmayı geliştirerek kullanmış ve tabakalı kompozit plakanın kalınlığını minimize etmek için çalışmıştır (Le Riche ve Haftka, 1995). Tabakalı kompozitlerin minimum ağırlık tasarımında, tasarım değişkeni olarak farklı düzlem içi yüklemeler ve kat oryantasyonu, kısıt olarak hasar faktörlerinden, Maksimum Gerilme ve Tsai-Wu hasar kriterleri alınmış ve Genetik Algoritma kullanılarak optimizasyon yapılmıştır (Naik ve diğ, 2008). Lopez ve diğ, (2009) düzlem içi yüklemelere maruz bırakılan tabakalı kompozitlerin minimum ağırlık ve minimum malzeme maliyeti Genetik Algoritma ile araştırmıştır. Maksimum Gerilme, Tsai-Wu, ve Puck hasar kriterleri optimizasyon probleminde kısıtlamalar olarak dikkate alınır. Tasarım değişkenleri olarak, kat oryantasyonları, tabaka sayısı ve malzeme kullanılmıştır. Kompozit tasarımında sıklıkla kullanılan bir başka optimizasyon yöntemi de Doğrudan Benzetimli Tavlama (DSA-Direct Simulated Annealing) Algoritması olup, güvenilir bir global arama algoritmasıdır. Akbulut ve Sönmez, (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı düzlem yüklemelere tabi tabakalı kompozitlerde, tasarım değişkeni olarak lif oryantasyon açıları ve tabaka kalınlığı kullanılmış, kalınlık (ağırlık) minimize edilmiştir. Çalışmalarında, Maksimum Gerilme ve Tsai-Wu hasar kriterleri hasar kontrolünde kullanılmıştır. Aynı ekip yakın zamanda Benzetimli Tavlama Yönteminin yeni bir biçimini geliştirerek benzer bir çalışma yapmışlardır (Akbulut ve Sönmez, 2011).

Kompozit plaklarda karşılaşılan problemlerden biri de burkulmadır. Burkulma hasarı, düzlem içi yüklerin etkisiyle ortaya çıkar ve yüklerin artması sonucu, plağın düzlemselliğini kaybetmesi olarak tanımlanır. Burkulmanın gerçekleşmesine sebep olan en küçük yük kritik burkulma yükü olarak isimlendirilir (Aydoğdu, 2003).

Kompozitlerin tasarımında plakaların, düzlem içi yükler altındaki burkulma yük kapasitesi çok önemlidir. Burkulma yapının erken hasara uğramasına sebep olabilir. Bu nedenle kritik burkulma indeksi maksimizasyonu araştırmacıların önem verdiği kritik bir konudur. Haftka ve Le Riche, (1993) Şekil Değiştirme hasar kriterini dikkate alarak, kritik burkulma indeksi maksimizasyonu için tabakalı kompozitin istif sırası tasarımı Genetik Algoritma kullanarak incelemişlerdir. Bir başka çalışmada düzlem içi basınç yüklerine maruz bırakılan kompozit bir panelin istiflenme tasarımı, Genetik Algoritma ve Genelleştirilmiş Model Arama Algoritması (Generalized Pattern Search Algorithm-GPSA) kullanılarak bulunmuştur.

Çeşitli yükleme durmlarında ve farklı en boy oranında kritik burkulma indeksi maksimize edilmiş ve yayınlanan diğer araştırma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Karakaya, 2007; Karakaya ve Soykasap, 2009). Benzer şekilde, tek eksenli basma, kayma, çift eksenli basma, kayma gibi birkaç farklı yükleme durumunda, maksimum burkulma yükü altındaki kompozit tabakaların en uygun istif sırasını belirlemek için Genetik Algoritma kullanılmıştır. Kritik burkulma indeksi amaç fonksiyonu olarak, lif oryantasyonları tasarım değişkenleri olarak alınmıştır (Kim and Lee, 2005).

Bazı araştırmacılar, kompozit yapıların optimum tasarımında daha güvenilir sonuçlar elde etmek için Genetik Algoritmaları revize edip geliştirdiler. Soremekun ve diğ., (2001) simetrik, balans ve basit mesnetli varsaydıkları plakanın en iyi tasarımı için, Genelleştirilmiş En İyinin Seçimi (Generalized Elitist Selection (GES)) ile Genetik Algoritma uygulayarak kritik burkulma indeksini maksimize etmişlerdir. Kompozitin kritik burkulma indeksi optimizasyonu Permütasyonlu Genetik Algoritma ile yapıp Permütasyonsuz Genetik Algoritma ile karşılaştırılmıştır (Liu ve diğ., 2000). Rao ve Arwind,(2005) Yayararak Arama Algoritması (Scatter Search(SS)) ile standart Genetik Algoritma kullanılarak tabakalı kompozitlerin optimizasyonu yapıp, sonuçları karşılaştırmışlardır. Yayararak Arama Algoritmasının(SS) daha iyi sonuç verdiğini görmüşlerdir. Ağırlığın minimize edildiği tasarım problemlerinde olduğu gibi kritik burkulma indeksinin maksimize edildiği problemlerde de farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Erdal ve Sönmez, (2005) Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing Algorithm) Algoritmasının geliştirilmiş bir versiyonu olan Doğrudan Benzetimli Tavlama (Direct Simulated Annealing (DSA)) algoritmasını, düzlem içi yüklere tabi tabakalı kompozitlerin kritik burkulma indeksinin maksimizasyonu ve fiber oryantasyon açısını bulmak için kullanmışlardır. Aymerich ve Serra, (2008) dayanımı, kısıt olarak kullanıp kritik burkulma indeksini maksimize etmek için, Karınca Koloni Optimizasyonu kullanmış, plakların yığın sırası tasarlamış, Genetik Algoritma ve Tabu Arama Algoritmaları kullanılan çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Vosoughi ve diğ.,(2017), kalın tabakalı kompozit plakaların burkulma yükünü optimize etmek için Sonlu Elemanlar (Finite Element), Genetik Algoritma (Genetic Algorithms), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization (PSO)) Algoritmalarının karışımı bir hybrid algoritma kullanmışlardır.

Nelder-Mead Algoritması kullanılarak yapılan, tabakalı kompozit yapılarda burkulma çalışması literatürde bulunamamakla birlikte, Manne ve Tsai, (1998)

ağırlığı optimize etmek için Nelder-Mead Algoritmasını ve Sonlu Elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Luersen ve Le Riche, (2004) Nelder-Mead Algoritmasını geliştirerek Globalized Bounded Nelder-Mead (GBNM) Algoritması olarak adlandırmışlar. Bu metot özellikle global optimizasyonun sağlanabileceğinden emin olunmadığı problem çözümünde kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında Karakaya-Soykasap tarafından 2009 yılında ,64 tabakalı Grafit/Epoksi kompozit malzeme ile yapılan çalışma referans alınmış olup, Grafit/Epoksi ve Keten/polipropilen 64 tabakalı kompozitin lif dizilim tasarımı Nelder-Mead Algoritması kullanarak yapılmıştır. Simulated Annealing ve Differential Evolution Algoritmaları ile elde edilen kritik burkulma yük indeksinin Nelder-Mead Algoritması ile elde edilen kritik burkulma yük indeksi ile aynı olduğu görülmüştür.

## 1.2.Amaç

Literatür çalışmaları göz önüne alındığında tasarım kriterlerinin tabaka performansı, malzeme hasarı, ağırlık, sertlik vb. çalışmaları içerdiği görülmektedir. Yani iyi bir tasarım için, tabaka sayısı (kalınlık) ve lif yönelim açıları optimize edilebilir. Aynı şekilde düzlem içi bası yükleri altında tabakalı kompozit ve biyokompozit malzemelerin, burkulma yük kapasitelerinin belirlenmesi kompozit yapıların tasarımında kritik öneme sahiptir. Çünkü burkulma, yapıda erken hasara neden olabilir. Buna göre tezin amacı şu şekilde sıralanabilir.

1. Grafit/Epoksi 64 tabakalı kompozitin, farklı geometri oranlarında ( $a/b$ ) ve farklı düzlem içi bası yükleri oranı ( $N_x/N_y$ ) altında, burkulma ve kırılma hasarına karşı, en dayanıklı lif dizilim tasarımını Nelder-Mead Algoritması kullanarak elde etmek,
2. Keten/polipropilen 64 tabakalı kompozitin, farklı geometri oranlarında  $a/b$  ve farklı düzlem içi bası yükleri oranları ( $N_x/N_y$ ) altında, burkulma ve kırılma hasarına karşı, en dayanıklı lif dizilim tasarımını Nelder-Mead Algoritması kullanarak elde etmek,
3. Çalışılan her iki malzeme tipi için; kompozit tabakaların optimum tasarımlarında amaç fonksiyonu olarak kullanılan burkulma yük indeksinin her bir yükleme durumu için belirlenmesi,

4. Çalışılan her iki malzeme tipi için; üç farklı yaklaşımdan- etkileşimli hasar kriterlerinden Tsai-Wu, etkileşimsiz hasar kriterlerinden Maksimum Gerilme ve kısmi etkileşimli hasar kriterlerinden Hashin-Rotem-birer hasar teorisi kullanılarak, kompozit tabakaların kırılma hasar faktör indeksinin belirlenmesi.

Literatürde burkulma ile alakalı pek çok çalışma olmasına rağmen, katı cisimler mekaniği açısından ihmal edilen kısım, burkulma yükleri hesaplanan malzemelerin burkulmadan önce kırılma mukavemeti açısından değerlendirilmemesidir. Malzeme burkulma açısından güvenli kırılma teorilerine göre güvensiz olabilir ve malzeme burkulmadan önce kırılabilir.

Bu çalışma 2005-2016 yılları arasında literatürde benzer problemi ele alan, elde edilmiş en iyi beş çalışma sonuçlarından daha iyi tasarımlar üretebilmiştir. Aynı zamanda bu tasarımları üreten optimizasyon kodu sadece lokal optimumları bulabildiği düşünülen ve pek önemsenmeyen Nelder-Mead Algoritması kullanılarak «MATHEMATICA» ortamında geliştirilmiştir.



## BÖLÜM 2

### KOMPOZİT MALZEMELER

#### 2.1. Giriş

Mühendislikte genellikle malzemeler, metal, seramik ve plastik şeklinde sınıflandırılırlar (Aran, 1990). Bu malzemelerin birbirine göre üstün ya da zayıf yönleri olabilmektedir. Geleneksel malzemelerin bazı özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir. Bilindik bu malzemelerden istenilen özelliklere göre, kompozit malzeme denilen yeni bir grup malzeme türü üretilmiştir.

**Tablo 2.1:** Geleneksel malzemelerin çeşitli özellikleri (Aran, 1990).

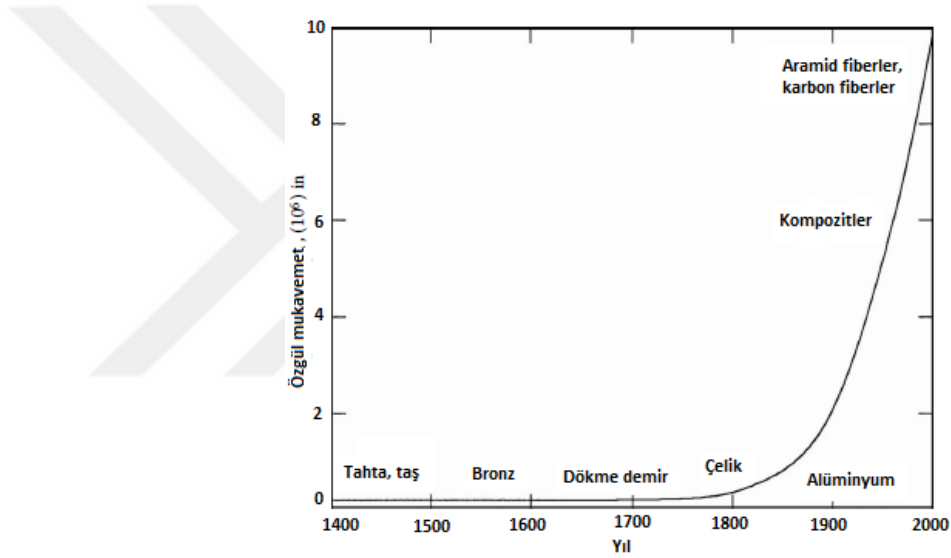
Malzeme Grubu	Yoğunluk	Mukavemet	Tokluk	Isıl Kararlılık	Şekillendirme	Birleştirme
SERAMİKLER	düşük yüksek	yüksek	düşük	yüksek	kötü	kötü
METALLER	Orta yüksek	orta	iyi	orta	orta	orta
PLASTİKLER	düşük	düşük	düşük	düşük	iyi	iyi

**Kompozit malzeme**, makroskopik seviyede, belirli bir amaca yönelik olarak birleştirilebilen ve birbiri içinde çözünmeyen, en az iki farklı malzemedan oluşan yeni özellikte bir malzemedir (Kaw, 2006). Amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan, istenilen özelliklerde malzeme üretmektir. Kompozit malzemeye, “Çok Fazlı Malzeme”, “Donatılı Malzeme” , “Çok Bileşenli Malzeme”, ve “Pekiştirilmiş Malzeme” gibi adlar da verilmektedir (Ersoy, 2001).

Mühendislikte, en iyi tasarımın en az kaynakla yapılması hedeflenir. İyi bir tasarım yapabilmek için mukavemeti yüksek, ağırlığı ve maliyeti düşük malzemeler tercih edilmektedir. Bu özelliklerin çoğu kompozit malzemelerde mevcuttur. Hafif ve yüksek mukavemetli olmalarından dolayı tasarımlarının kolay yapılabilmesi, daha fazla yük taşıyabilmeleri, az deforme olmaları kompozit malzemeleri daha

tercih edilir bir konuma getirmektedir. Özellikle ağırlığın kritik olduğu endüstrilerde metallerin yerine kullanılmaya başlanmıştır (Mallick, 2007).

İnsan, tarih boyunca malzemeleri birleştirerek, yeni malzemeler üretmiştir. Örneğin, eski Mısırlı işçiler yapısal bütünlüğü iyileştirmek adına, kullandıkları tuğlaların içine kırılmış saman ekliyorlardı. Japon Samuray savaşçıları da tabakalar halindeki metalleri döverek istedikleri özelliklerde kılıçlar yapmışlardır. 20.yy inşaat mühendisleri çimentonun içine kum ve demir koyarak, en iyi bilinen kompoziti, betonarmeyi üretmişlerdir (Vinson ve Sierakowski, 2004). Şekil 2.1’de geleneksel malzemelerin ve kompozitlerin özgül mukavemet değerleri yıl bazında görülmektedir.



**Şekil 2.1:** Farklı zamanlarda kullanılan geleneksel malzemelerin ve kompozitlerin özgül mukavemet değerleri (Kaw, 2006).

Tanımından da anlaşıldığı gibi kompozit malzemede dört koşul aranır.

- 1) Doğal bir malzeme olmaması gerekir
- 2) Farklı malzemelerin, çok boyutlu bir araya getirilmesi gerekir.
- 3) Matris ve elyaf malzemenin tek bir malzeme gibi davranması gerekir.
- 4) Bileşenlerin sahip olmadığı, üstün özelliklere sahip olması gerekir.

Kompozit üretiminde amaç; mekanik dayanım, rijitlik, ağırlık, korozyona karşı direnç, yüksek sıcaklığa dayanım göstermek, kırılma tokluğu, ısı iletkenliği, ses tutuculuğu, görünüm vb. özelliklerin birini ya da bir kaçını iyileştirip, amaç doğrultusunda malzeme üretmektir. Bunun için de matris ve elyaf elemanlarının

doğru seçilmesi gerekir. Tablo 2.2’de bazı metal, elyaf ve kompozitlere ait mekanik değerler görülmektedir.

**Tablo 2.2:** eşitli metal, elyaf ve kompozitlere ait özgül modül ve özgül mukavemet değerleri (Kaw, 2006).

	Özgül ağırlık	Young modülü (GPa)	Maksimum mukavemet (MPa)	zgl modül (GPa-m <sup>3</sup> /kg)	zgl mukavemet (MPa-m <sup>3</sup> /kg)
Birim sistemi (SI)					
Grafit elyaf	1.8	230.0	2067	0.1278	1.148
Aramid elyaf	1.4	124.0	1379	0.08857	0.9850
Cam elyaf	2.5	85.0	1550	0.0340	0.6200
Tek yönlü grafit/epoksi	1.6	181.0	1500	0.1131	0.9377
Tek yönlü cam/epoksi	1.8	38.60	1062	0.02144	0.5900
Çapraz tabakalı grafit/epoksi	1.6	95.98	373.0	0.06000	0.2331
Çapraz tabakalı 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
elik	7.8	206.84	648.1	0.02652	0.08309
Alüminyum	2.6	68.95	275.8	0.02652	0.1061

Kompozit malzemeler, mukavemeti sağlayan takviye (elyaf) malzeme ile takviye malzemeyi bir arada tutmayı sağlayan ana malzemedenden (matris) oluşur. Takviye malzemenin geometrisine göre tanecik takviyeli, lif takviyeli, tabakalı kompozit ve hibrid kompozit olarak ya da polimer, metal, seramik, gibi matris malzemenin türüne göre sınıflandırılabilir (Kaw, 2006).

Matris malzemeler, kompozit malzeme bileşenlerinin ana malzemesi olup c ana görevi vardır. Takviye malzemeyi bir arada tutar, bu malzemeyi dış etkilerden korur ve uygulanan yükün takviye malzemeye eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Enine modül ve dayanım, kayma modülü ve dayanımı, basma dayanımı, ısıl genleşme katsayısı, ısıl direnç gibi mekanik özellikler matrise bağlıdır (Kaw 2006).

Kompozitler matris malzeme tipine göre c gruba ayrılırlar:

Polimer (plastik) matrisli kompozitler (PMK)

Metal matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler

Kompozitlerde polimer matris çok yaygın kullanılır. Monomer denilen basit moleküllerin kimyasal bağlarla birleşmesiyle oluşan, yüksek molekül ağırlıklı yapılara polimer denir. Polimerler genelde karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot

(N), klor (Cl), kükürt (S), flor (F) gibi elementlerin tepkimeye girmesiyle oluşur (Yalçın ve Gürü 2002).

Fiziksel özelliklerine göre polimerler üç gruba ayrılır;

**Termoplastikler;** Doğrusal yada dallanmış zincirlerden oluşurlar, eritilip yeniden şekil verilebilirler, uygun çözücülerde çözünebilirler. Polietilen (PE) , Polivinil klorür (PVC), Polipropilen (PP), Poliamidler (Naylonlar) en çok kullanılan termoplastiklerdir.

**Elastomerler(Kauçuk):** Elastik malzemelerdir. Bu özellikleri polimer zincirleri arasındaki çapraz bağların azlığından kaynaklanır. Bu bağların oluşumundan sonra malzemenin erimesi söz konusu değildir.

**Termosetler:** Yoğun çapraz bağlar içerir ve ısı etkisiyle yapıları parçalanarak bozunur, yani erimeleri ya da yeniden şekillendirilmeleri mümkün değildir. Polimer matrisli kompozitlerde (PMC) epoksi, fenolik ve polyester gibi termoset polimerler en çok kullanılan matris reçinelerdir. Termoplastikler ile termosetlerin farklı yönleri Tablo 2.3’de verilmiştir

**Tablo 2.3:** Termoplastikler ile termosetler arasındaki farklılıklar (Kaw, 2006).

Termoplastikler	Termosetler
Isı ve basınç altında yumuşar ve kolay tamir edilebilirler	Isımayla ayrıştırılmaz
Yüksek kopma şekil değiştirmeleri	Düşük kopma şekil değiştirmeleri
Belirsiz raf ömrü	Kesin raf ömrü
Yeniden işlenebilir olmak	Tekrar işlenemez
Kolay işlenebilme ve yapışkan olmama	Yapışkan
Kısa kür süresi	Uzun kür süresi
Yüksek üretim sıcaklığı ve viskozitenin üretimi zorlaştırması	Düşük üretim sıcaklığı
Mükemmel çözücü direnci	Düşük çözücü direnci

Polimer matrisli kompozitlerin avantajları;

- Özgül ağırlıkları düşüktür.
- Şekillendirilmeleri kolaydır.
- Maliyeti düşüktür.
- Yalıtıcıdır (ısı, ses, elektrik).
- Mekanik dayanımı yüksektir.

- Çevresel koşullara dayanıklıdır.
- Kimyasallara karşı dayanıklıdır.

#### Polimer matrisli kompozitlerin dezavantajları

- Çalışma sıcaklıkları düşüktür.
- Termal ve nem genleşme katsayıları yüksektir.
- Elastik özellikleri her yönde aynı değildir (Kaw, 2006).

Metal matrisli kompozitlerde matris malzeme, metaldir ve dayanımları, toklukları ve kullanım sıcaklıkları, termal ve elektrik iletkenlikleri, organik reçinelere göre daha yüksektir. Ancak, üretimleri zordur, işlem sıcaklıkları ve yoğunlukları yüksektir, ayrıca her takviye malzemeye birlikte kullanılamazlar. 6061 ve 2024 alüminyum alaşımları, 1010 saf alüminyum en çok kullanılan metal matrislerdir.

Metal matris kompozitler genellikle uzay ve havacılıkta kullanılır. Boron /alüminyum tüpler roketin gövde iskeletini desteklerken kütleyi ve termal izalasyon gereksinimini azaltır. Askeri alanda, füze güdüm sistemlerinde SiC/Alüminyum kompozit, “mikro akma mukavemetine” (mikro akma mukavemeti; 1µm plastik şekil değişimi oluşturmak için gerekli gerilme ) sahip olduğundan boyutsal kararlılık için kullanılır. Ulaşım da düşük ağırlık ve yüksek mukavemetten dolayı tercih edilir. Bazı metal matris kompozitlerin mekanik özelliklerine ait bilgiler Tablo 2.4’te görülmektedir.

**Tablo 2.4:** Metal matris kompozitlerin mekanik özellikleri (Kaw, 2006).

Özellik	Birim	SiC/ alüminyum	Grafit/ alüminyum	Çelik	Alüminyum
Birim sistemi SI					
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	µm/m/°C	12.4	18	11.7	23

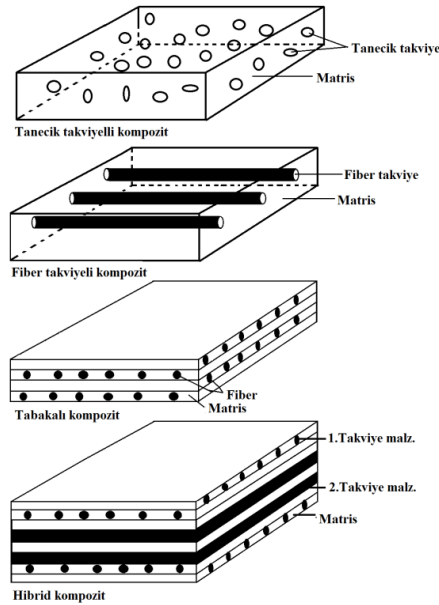
Seramik matrisli kompozitler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için kullanılırlar. Matris malzemesi olarak Alumina (Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>), Silisyum Karbür (SiC), Silisyum Nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), Zirkonya ( ZrO<sub>2</sub> ) ve Boron Nitrür (BN) yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak genellikle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiC

seramik malzemeler fiber formuna getirilerek kullanılmaktadır. Seramikler matris olarak kullanıldığında, malzeme yüksek servis sıcaklık limitine, kimyasal durgunluk ve düşük yoğunluğa sahip olabilir. Ayrıca iyi bir yalıtıcıdır. Fakat, plastik deformasyon göstermeden kırılabilirler. Bazı seramik matris kompozitlerin mekanik özellikleri Tablo 2.5’te verilmiştir

**Tablo 2.5:** Seramik matris kompozitlerin mekanik özellikleri (Kaw 2006).

Özellik	Birim	SiC/LAS	SiC/CAS	Çelik	Alüminyum
Birim sistemi SI					
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

Kompozitler, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi takviye malzemenin geometrisine göre tanecik takviyeli, lif takviyeli, tabakalı ve hibrid kompozitler olarak sınıflandırılabilirler.



**Şekil: 2.2:** Takviye formuna göre kompozitler

1) **Tanecik takviyeli kompozit:** Bu kompozit türünde, matris malzeme içerisinde gömülü milimetrik düzeyde tanecikler vardır. Tanecikler matris içerisinde izotropik olarak dağılmıştır. Kompozitin mukavemetini, çalışma sıcaklığını ve oksidasyon direncini arttırmak için kullanılabilirler. Bu türe örnek olarak, beton (çakıl+kum+çimento) gösterilebilir (Kaw 2006).

2) **Lif (elyaf) takviyeli kompozit:** Bu tip kompozitler uzun yada kısa boyutlardaki küçük çaplı liflerin takviye ettiği matrislerden oluşur. Bir malzemenin lif olarak kabul edilmesi için ASTM'ye (American Society for Testing and Materials) göre :

- Boy/en ortalama boyutu  $\geq 10/1$
- En büyük kesit  $\leq 0.05\text{mm}^2$
- En büyük genişlik  $\leq 0.25$  mm koşullarını sağlamalıdır.

Sürekli liflere de filament ya da fitil denir. Metal liflere de tel denir (Aran, 1990).

Lif takviyeli kompozitin mekanik performansı, lifin boyutlarına, şekline, yönelimine ve malzeme cinsine bağlıdır. Lif takviyesinde uzun ya da kısa lifler kullanılabilir. Uzun ve sürekli liflerin, yönlendirilmesi kolaydır ve lif doğrultusunda dayanım yüksekken life dik doğrultuda düşüktür. Fakat kısa lifler düşük maliyetlidir, imalatları hızlıdır, daha az kusur içerdiklerinden dayanımları yüksektir. Ancak kısa liflerin, uygun açılarda yönlendirilmeleri çok zordur.

Kompozitlerde, liflerin uzunluk /çap oranı arttıkça malzeme dayanımı artar, çünkü çap küçüldüğünde malzemenin doğasındaki kusurlar azalır. Matristen fibere yük iletiminin daha iyi olabilmesi için fiber-matris ara yüzey alanının büyük olması gerekir. Bir kompozitte sabit lif hacim oranı için ara yüzey alanı ile çap ters orantılıdır. Lif çapı azaldığında malzeme kırılmaz eğilir ve bu esneklik olarak ölçülür (Kaw, 2006). Cam, karbon gibi inorganik lifler, aramid ve HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) gibi performansı yüksek sentetik lifler en çok kullanılan lif takviye malzemeleridir.

Kompozit malzemelerde kullanılan lifler, doğal lifler ve kimyasal lifler olmak üzere iki çeşittir. Doğal liflerle takviye edilen kompozitlere **biyokompozit** denir.

## **Doğal lifler**

### a) Bitkisel lifler

Tohum lifleri (Pamuk, kapok)

Gövde lifleri (Keten, kenevir, jüt, rami)

Yaprak lifleri (Sisal kendiri, Manila keneviri, Yeni Zellanda keteni)

Meyve lifleri (koko)

b)Hayvansal lifler

Kıl kökenli lifler (Yün, moher, kaşmir, alpaka, angora)

Salgı kökenli lifler (ipek)

Madensel lifler (Asbest lifi, cam lifi, kuvars)

### **Kimyasal lifler**

a)Hammaddesi doğal olan lifler (rejenere lif)

Rejenere selülozik lifler (viskoz ipeği, bakır ipeği)

Selüloz esterleri (selüloz asetat, selüloz triasetat)

Rejenere protein lifler (vicara, ardil, aralac, lanital)

Alginat lifler

Elastomer lifler (kauçuk)

b)Hammaddesi sentetik olan lifler (sentetik lifler)

Poliolefin lifler (Polietilen, polipropilen, PTFE)

Polivinil lifler (Akrilik, modakrilik, PVC, PVA)

Poliüretan lifler (Spandex, lycra)

Poliester lifler (Trevira, treylen)

Poliamid lifler (nylon)

Polisopren lifler (sentetik kauçuk)

3)**Tabakalı kompozit:** Farklı takviye yönlendirmeleriyle elde edilen tabakaların bileşiminden oluşan kompozitlerdir. Bu tip kompozitler en eski ve kullanım alanı en fazla malzemelerdir. Takviye malzemenin farklı yönlendirilmesiyle çok yüksek mukavemet elde etmek mümkündür.

4) **Hibrid kompozit:** Bu tip kompozitlerde iki yada daha fazla takviye eleman çeşidi bulunur. Örneğin, basma mukavemeti düşük olan keklar, ucuz ve tok bir elyafıdır. Grafit ise basma mukavemeti yüksek, pahalı ve tokluğu düşük bir elyaf çeşididir. Bu iki tip elyafın kullanıldığı hibrid kompozit, grafit takviyeli kompozitten daha iyi tokluğa sahip ve ucuz, keklar kompozitten daha iyi basma mukavemetine sahip olacaktır (Kılıç, 2014.).

Kompozit malzemelerin çağdaş zamanlarının, II. Dünya Savaşı sırasında, cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerle başladığı söylenebilir (Vinson ve Sierakowski, 2004). Cam elyafların yüksek dayanımları, iyi yalıtım özelliklerine

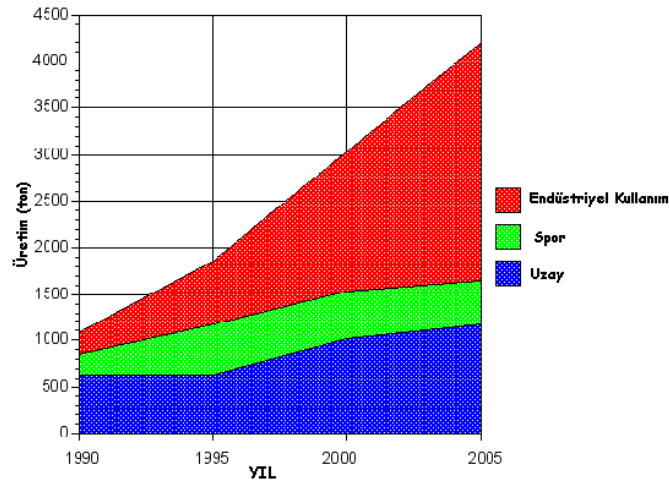


sahip olmaları, yüksek kimyasal direnç ve düşük maliyete sahip olmaları avantaj sağlar. Dezavantajları ise düşük elastik modül, düşük yorulma mukavemeti, yüksek özgül ağırlık, polimerlere zayıf yapışma ve sürtünme hassasiyeti (çekme mukavemetini düşürür) dir (Kaw, 2006). En yaygın, E-cam(E-glass) ve S-cam(s-glass) türleri kullanılır. E-cam fiberler elektrik uygulamaları için üretilmiştir. S-cam ise yüksek mukavemet için üretilmiştir. Alüminyum ve magnezyum oksit içerir, mekanik özellikleri daha iyidir. Tablo 2.6'da çeşitli elyaf türlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

**Tablo 2.6:** Cam, Kuvarz, Bor, Karbon, Kevlar elyaf türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması (Kılıç, 2014).

Elyaf	E-Camı	S-Camı	Kuvarz	Bor	Karbon	Kevlar
Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	2.54	2.48	2.2	2.68	1.85	1.44
Çekme dayanımı(MPa)	3448	4585	3100	3448	2900	2706
d <sub>c</sub> (mm)	0.003-0.02	0.0030-0.13	0.01	0.1-0.2	0.005-0.013	0.012
Isıl genişleme kat. cm/cm.°C <sup>-1</sup> (x10 <sup>-6</sup> )	5	2.9	2.9	3	-1	-2
Kopma uzaması(%)	2.75	-	-	0.7	0.5-1.3	2.5

Karbon elyaflar kompozit malzemeler içinde büyük bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle düşük yoğunluk, yüksek young modülü ve yüksek sıcaklık dayanımından dolayı çok tercih edilir.

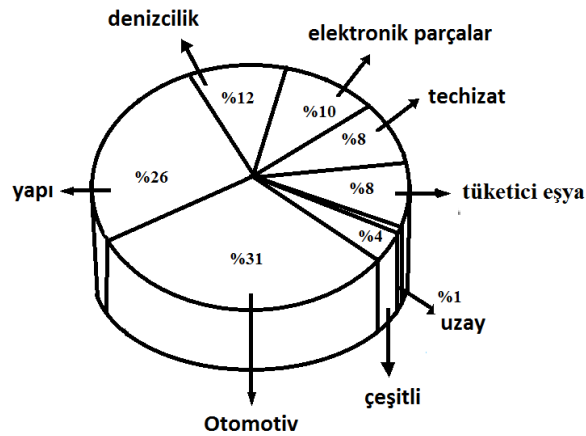


**Şekil 2.3:** Karbon liflerinin alanlarına göre kullanım miktarları (Yaman ve diğ.,2006)

1960'lı yıllarda üretilen Bor elyaf, karbon elyaf kadar yaygın kullanım alanına sahip değildir. Bor elyaf özellikle metal matrisli kompozitlerde kullanılır. Tungusten bir çekirdek flamanın üstüne bor kaplanarak üretildiğinden bor elyaf kendisi bir kompozittir. Erime sıcaklığı 2040°C dir.

Bir başka elyaf türü de, aramid'dir ve iki tür aramid elyaf vardır. Meta Aramid ve Para Aramid olarak adlandırılırlar. Ancak yaygın olarak kullanılan türü Para Aramid'lerdir. Aramid elyafı piyasada daha çok ticari isimleri Kavlar 29 ve kavlar 49 (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir.(1) Düşük ağırlık, yüksek darbe direnci, yüksek çekme mukavemeti ve düşük yoğunluk özelliklerine sahiptir.

Kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları; uzay, havacılık (uzay araçlarında, helikopter parçaları, uçak modelleri, planör gövdesi, uçak gövde ve iç dekorasyonu..), otomotiv (bazı motor parçaları, kaporta parçaları, tamponlar, iç donanım, oto lastikleri..) gibi ağırlığın kritik olduğu endüstrilerde metallerin yerine kullanılmaya başlanmıştır (Mallick, 2007). Ayrıca iş makinelerinde, inşaat sektöründe (soğuk hava depoları, büfeler, otobüs durakları, tatil evleri, cephe korumaları ), tarım sektöründe (tahıl toplama siloları, seralar, su boruları ve sulama kanalları..), deniz sektöründe (gemi, yat, deniz botları, yolcu feribotları, can simidi..), tüketici eşya sektöründe (dikiş makineleri, küvetler, masalar, kapılar, bilgisayarlar..), yakıt tanklarında ve spor malzemeleri yapımında da kompozitler sıkça kullanılmaktadır.



**Şekil 2.4:** Lif takviyeli kompozit malzemelerin 2002 yılı kullanım oranları (Material Thoughts, 2002)

## 2.2 Biyokompozit Malzemeler

Özellikle termoset matrisin cam ya da karbon elyaf takviyesiyle çok yüksek mekanik özelliklerde kompozit malzemeler elde edilebilmektedir. Ancak günümüzde mekanik özelliklerin yanında geri kazanım ve geri dönüşüm özelliği de önem kazanmaktadır. Son zamanlarda doğayı ve ekolojik yaşamı korumak için başlayan sürdürülebilir üretim ve geri dönüşüm, artık yasal zorunluluk olmaya başlamıştır.

Petrol ürünlerinin yaygın kullanımı, hem petrol rezervlerinin tükenmesine hem de ekolojik yaşamın ve doğanın yok edilmesine sebep olmaktadır. Petrol türevi plastikler sebebiyle artan kirlilik, yiyecek, su, havayı ve sağlığı tehdit ederek canlıların yaşama hakkını elinden almaya başlamıştır. Dolayısıyla da biyolojik olarak parçalanabilir plastikler üretmek için çalışmalar artmıştır. Şu anda petrol esaslı ürünlerin hakim olduğu pazarda, yenilenebilir ve doğal malzemelerden üretilmiş ürünlerin de yer alması gerekir. Ancak % 100 biyobazlı malzeme üretimi, ekonomik bir çözüm değildir. Mükemmel uygulamaları olan uygun maliyetli bir ürün geliştirmek için, petrol ve biyolojik kaynakları birleştirmenin daha uygun bir çözüm olacağını düşünen bilim adamları, sisal, keten, kenevir, jüt, muz, odun ve çeşitli bitkilerden elde ettikleri biyolojik elyaf yenilenebilir ya da yenilenemez kaynaklardan elde edilen, polimer matrislerle birleştirmenin yollarını araştırarak, biyokompozit malzeme devrini açmış oldular. (Mohanty, Drzal, ve Misra, 2002).

Biyokompozitler, doğal/biyolojik elyaf ile takviye edilmiş, petrol türevli, biyolojik olarak bozunmayan polimerlerden (PP, PE) veya bozunabilen polimerlerden (PLA, PHA) oluşan kompozit malzemelerdir. Bitki türevi elyaflardan ve biyopolimerlerden üretilen biyokompozitler çevre dostudurlar ve yeşil kompozit (green composite) olarak adlandırılırlar.

Uzun zamandır mucizevi bir ürün olarak hayatımıza giren plastikler şimdilerde itibarını kaybetmeye başlamıştır. Çünkü, plastik kopolitlere alternatif, çevre dostu biyokompozitler, düşük maliyetlidirler ve üretim, kullanım ve geri dönüşüm aşamalarında neredeyse hiç kirlilik emisyonu vermeyerek hem üreticiyi hem de tüketiciyi ek maliyetten kurtarmaktadırlar. Biyofiber takviyeli kompozitler binyılın malzemesi olarak nitelendirilmektedirler (John, 2008).

Biyokompozit malzeme üretiminde genellikle selüloz esaslı bitki lifleri ve zirai esaslı bitkisel atıklar (pirinç ve buğday sapı gibi) kullanılır ve bu malzemeler biyobozunurdur, geri dönüşebilir, toksik de değildirler. Bitki lifleri ucuz, düşük

yoğunluklu, özgül mukavemeti ve young modülü yüksek, yüzey modifikasyonu kolay, üretimi kolay, aşınma direnci yüksek, biyobozunur, sürdürülebilir, çevre dostu, üretim esnasında az enerji kullanılan, kolay şekillendirilebilen, soğurduklarından daha az CO<sub>2</sub> salımı yapan, yüksek spesifik mekanik özelliklere sahip takviye malzemeleridir. (Puglia ve Kenny, 2009; Joshi ve diğ, 2004; Njuguna ve diğ, 2011)

Bitkisel lifler selüloz, hemiselüloz, lignin ve pektin bileşenlerinden oluşur. Lifin özellikleri bu bileşen özelliklerine bağlıdır. Tablo 2.7’de bitkisel liflerin bileşenleri görülmektedir. Selüloz lifleri hidrofil özelliğe sahiptir yani nem absorpsiyonu yüksektir. Hemiselüloz, lifin termal bozunma özelliğini, lignin ise UV dayanımını belirler. Bitki liflerinin, hidrofil özelliği, polimer matrisin hidrofob özelliğinden kaynaklanan uyumsuzluklar ve bozunmaya engel olmak için işlem sıcaklığının düşük tutulmak zorunda olması (<200°C) doğal lif kullanımında sınırlayıcı etkilerdir (Mohanty, 2000).

**Tablo 2.7:** Doğal liflerin kimyasal bileşenleri  
(Mohanty ve diğ, 2002).

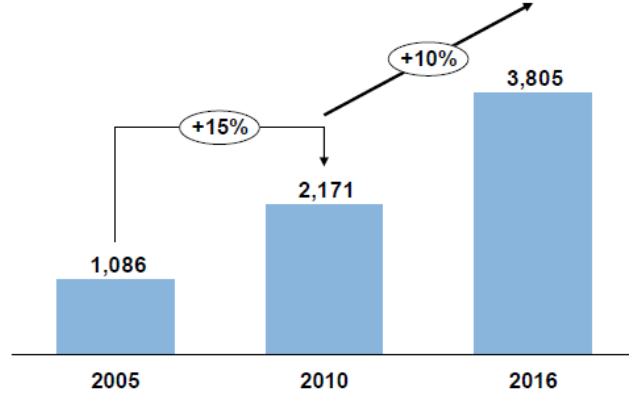
Lif	Selüloz(%)	Lignin(%)	Hemiselüloz(%)	Pektin(%)
<b>Jüt</b>	61-71.5	12-13	13.6- 20.4	0.2
<b>Keten</b>	71	2.2	18.6- 20.6	2.3
<b>Kenevir</b>	70.2- 74.4	3.7- 5.7	17.9- 22.4	0.9
<b>Rami</b>	68.6-76.2	0.6-0.7	13.1-16.7	1.9
<b>Kenaf</b>	31-39	15-19	21.5	2
<b>Sisal</b>	67-78	8-11	10.0-14.2	10.0
<b>Hindistan cevizi</b>	36-43	41-45	0.15-0.25	3-4
<b>Pamuk</b>	82-96	0.5-1	2-6	5-7
<b>Abaca</b>	61-64	12	21	0.8
<b>Ananas yaprağı</b>	80-81	4.6-12	16-19	2-3
<b>Muz lifi</b>	60-65	5-10	6-19	3-5

Bitkisel liflerin mekanik özellikleri, liflerin fiziksel özelliklerinden (kristalin ve amorf bölge oranı, morfolojik yapı gibi) ve kimyasal bileşenlerinden etkilenmektedir. Tablo 2.8’de bazı doğal liflerin mekanik özellikleri görülmektedir.

**Tablo 2. 8:** Bazı doğal liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri  
(Mohanty ve diğ, 2002).

Lif	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Kopma mukavemeti (MPa)	Young modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Çap (µm)	Fibriller açı (°)	Polimerizasyon dercesi	Nem içeriği (%)
<b>Pamuk</b>	1.5-1.6	287-800	5.5-12.6	7.0-8.0	11.5- 17	20-30	2020-4700	8.5
<b>jüt</b>	1.3-1.45	393-773	13-26.5	1.16-1.5	15.9- 20.7	8.0	1920-4700	12.6
<b>Keten</b>	1.50	345-1100	27.6	2.7-3.2	17.8- 21.6	10.0	2190-4700	10.0
<b>Kenevir</b>	1.48	690	70	1.6	17.0- 22.8	6.2	2200-4800	10.8
<b>Rami</b>	1.50	400-938	61.4-128	1.2-3.8	28.1- 35.0	7.5	2660-5800	8.0
<b>Sisal</b>	1.45	468-640	9.4-22.0	3-7	18.3- 23.7	20.0	2160	11.0
<b>Hindistan cevizi</b>	1.15	131-175	4-6	15-40	16.2- 19.5	39-49	-	8.0
<b>Ananas yaprağı</b>	1.52-1.56	413-1627	34.5- 8251	1.6	20-80	14	-	11.8

Bitki liflerinden elde edilen kompozitler, otomotiv ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İnşaat sektöründe odun plastik kompozitler (WPC), otomotiv sektöründe ise keten, kenevir gibi gövde liflerinden elde edilen odun dışı biyolifler tercih edilir (Lucintel, 2011). İnşaat ve yapı sektöründe, kapı, pencere ve çerçevesi, çatı, merdiven, dış cephe kaplaması, dekoratif profiller, raf, yer kaplaması, tırabzan, tabla, çit, park-bahçe mobilyası, kamelya, yürüyüş parkurları, çocuk parkı, bank, iskele gibi kullanım alanı bulurken, otomotiv sektöründe, kapı paneli, yedek lastik bölümünün kapakları, koltuk arkalıkları, araç altı panelleri, motor ve vites kutusu kapağı, tavan döşemesi, radyatör deposu altı, çamurluk parçaları, arka panel rafları, hoparlör, bagaj bölmesi gibi otomobil iç aksamalarında kullanılmaktadır. (Ashori, 2008; Hill ve diğ, 2012; Biron, 2014)



**Şekil 2.5:** Biyokompozitlerin yıllara göre pazar payı (milyon dolar)  
(Lucintel, 2011).

Özellikle kuzey Amerika inşaat sektöründe WPC kullanımı konusunda liderken, Avrupa odun dışı biyoliflerin kullanıldığı otomotiv sektöründe başı çekmektedir. Ömrünü Tamamlamış Araçlar (ÖTA-End of Life Vehicles ) yönetmeliği ile ulaşım araç atıklarının yeniden kullanım ve geri dönüşüm işlemleriyle çevreye zarar vermemesi, Avrupa Birliği tarafından zorunlu hale getirilmiştir. 2015'ten sonra araç ağırlığının %85'i yeniden kullanılabilir ve %95'ide geri dönüştürülebilir olmak zorundadır (Avrupa Birliği,2000/53/EC numaralı yönerge)(2).

Son yıllarda, özellikle otomotiv sektöründe araç atıklarının azaltılmasının yanı sıra, araçların hafifletilerek yakıt tasarrufu sağlanması, dolayısıyla da CO<sub>2</sub> emisyon miktarının azaltılması hedeflenmektedir (Khan&Mehmood,2016; Koronisve ark,2013; Pradeep ve diğ, 2017). 2021 yılında CO<sub>2</sub> emisyon miktarı 95 g/kg olarak belirlenmiş ve sınır aşımında 1g/kg CO<sub>2</sub> için araç başına para cezası getirilmiştir (Avrupa Birliği, emisyon standartları 443/2009 numaralı düzenleme)(3). Dolayısıyla araçların hafifletilmesi noktasında daha hafif malzeme arayışı başlamıştır. Özgül ağırlığı 2.5 gr/cm<sup>3</sup> olan cam elyafa alternatif olabilecek 1.4 gr/cm<sup>3</sup> özgül ağırlığında ki keten elyafın, cam elyaf ile aynı hacimsel oranda kullanıldığı takviye malzeme ile üretilen kompozit malzemenin ağırlığının %30 oranında azalacağı belirtilmektedir (Joshi ve diğ, 2004). Şekil 2.5'te son yıllarda biyokompozitlerin pazar paylarındaki düzenli artışı görülebilmektedir. Tablo 2.9'da otomobil sektöründe kullanım miktarı olarak çelik ve alüminyum malzemeler ilk sırayı alırken performans/ fiyat açısından bakıldığında, bu malzemelerin biyokompozitlerin gerisinde kaldığı görülmektedir (Lucintel, 2011).

**Tablo 2.9:** Otomotiv sektöründe kullanılan farklı malzemelerle biyokompozitlerin karşılaştırılması (Lucintel, 2011).

<b>Malzeme</b>	<b>Otomotiv sektörü kullanım miktarı(kg)</b>	<b>Performans/fiyat oranı (özgül direnç/dolar)</b>
<b>Çelik</b>	907.2	0.15
<b>Alüminyum</b>	272.2	0.08
<b>Cam lifi kompozitler</b>	34.9	0.36
<b>Biyokompozitler</b>	15.97	1.15

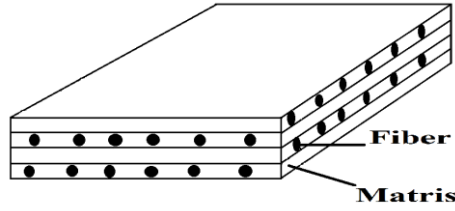
Lignoselülozik gövde liflerinden olan keten lifleri doğal lifler arasında nispeten yüksek mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı kompozit sektöründe çok ilgi görmektedir (Avérous ve Le Digabel, 2006; Liu ve diğ, 2007; Minson ve diğ, 2014). Keten lifleri %70 oranında selüloz, %16-19 oranında hemiselüloz, %2 pektin, %2 lignin, çeşitli pigmentler ve suda çözünebilen maddeler içermektedir (Müssig ve diğ, 2005).

Yıllık bir bitki olan ketenin, hasattan sonra yaprakları ve sapları ayrılır. Saplar bir süre bekletilerek çürütülür, sonra havuzlama işlemiyle lifler saplardan ayrılır. 20-140 cm uzunluğunda lifler elde edilebilir. Bu lifler, iplik ya da kumaş şeklinde biyokompozit malzeme üretmek için kullanılmaktadır. Keten liflerin takviye malzeme olarak kullanılmasının en büyük avantajı; kompozitin ağırlığının azaltılmış olmasıdır. Cam lifi kullanılmış kompozite göre ağırlığın %30 azalacağı belirtilmektedir (Johsi ve diğ, 2004; Wambua ve diğ, 2003). Keten lifleri üretilirken kullanılan enerji ve CO<sub>2</sub> salımı, 1200-1500°C 'de cam lifleri üretilirken kullanılan enerjiden ve CO<sub>2</sub> salımından çok daha azdır. Ayrıca üretim esnasında kullanılan ekipmana ve insan sağlığına da zarar vermez. Fakat 170°C'nin üzerindeki sıcaklık uygulamalarında ısıl bozulma oluşmakta ve mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir (Gassan ve Bledzki, 2001; Van de Velde ve Baetens, 2001). Termoplastik polimerler arasında matris malzeme olarak kullanılacak polipropilen (PP)'in keten lifine en uygun malzeme olduğu belirtilmiştir (Van de Velde ve Kiekens, 2001).

## BÖLÜM 3

### KOMPOZİT MALZEME MEKANİĞİ

Kompozit malzemenin tek bir (genellikle 0.125mm kalınlıkta olan) tabakasına lamina denir (Kaw, 2006). Lamina kalınlığı yönünde, laminaların üst üste dizilmesiyle oluşan yapıya da laminat denir. Laminayı oluşturan fiber ve matris homojen ve izotrop olmasına rağmen, elde edilen lamina homojen ve izotrop değildir. Çünkü mekanik özellikler, noktadan noktaya farklılık gösterir. Bu malzemeyi modellemek ise çok karmaşıktır. Dolayısıyla kompozit malzemelerin makromekanik analizi yapılırken laminaların homojen olduğu kabul edilerek işlem yapılır (Kaw,2006).



Şekil 3.1: Tabakalı kompozit malzeme.

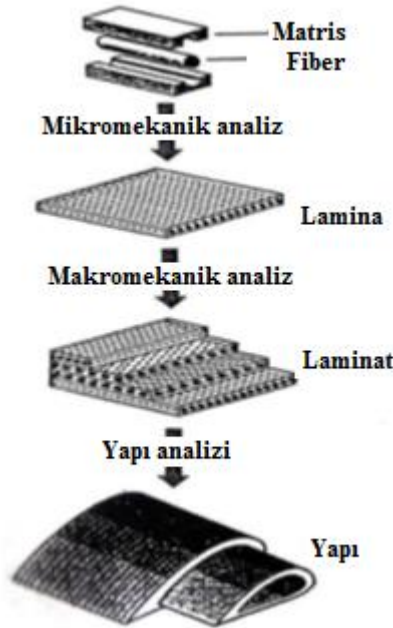
Kompozit malzemelerin mekanik davranışları Şekil 3.2’de görüldüğü gibi mikromekanik analiz ve makromekanik analiz olmak üzere iki grupta incelenir. Mikromekanik Analiz: Fiber ve matrisin (mikroskopik boyutta) özellikleri kullanılarak kompozit tabakanın rijitlik, mukavemet ve nem genişleme katsayısı gibi özellikleri bulunur. Bu özelliklere etki eden faktörler;

- Fiber ve matrisin hacim oranları, geometrik biçim ve büyüklükleri ve yönlendirmeleri
- Fiber ve matrisin özellikleri
- Fiber ve matris arayüzey bağı

Makromekanik Analiz: Tabakaların homojen olduğu varsayılarak, ortalama malzeme özellikleri temel alınır (makroskopik boyutta). Kompozit yapının servis koşullarındaki mekanik davranışı incelenir. Örneğin; dışarıdan uygulanan



gerilmelerinin oluşturacağı deformasyonlar, yapı bileşenlerinin ayrı ayrı deformasyonları yerine kompozitin deformasyonu olarak ifade edilebilir.



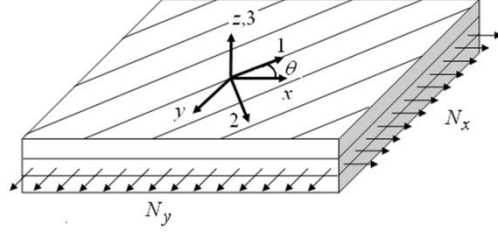
Şekil 3.2: Kompozit malzemeler için analiz tipleri ve aşamaları. (Daniel ve Ishai, 1994)

### 3.1 Klasik Laminasyon Teorisi

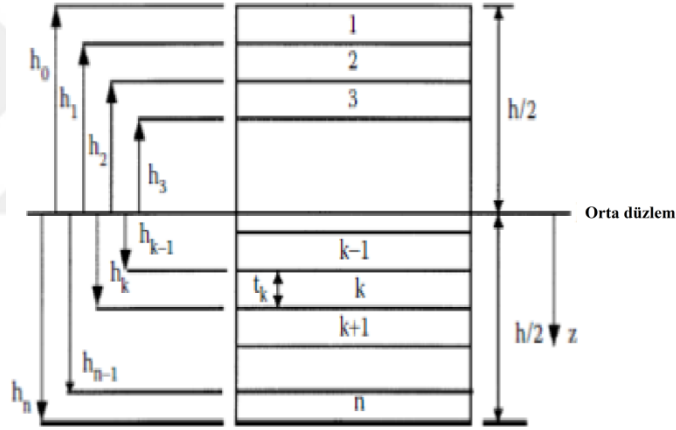
İnce tabakalı kompozitlerin mekanik davranışlarını belirlemek için Klasik Laminasyon Teorisi (KLT) kullanılır. Bu teorinin kabulünde aşağıdaki varsayımlar esas alınır;

- Laminatın her bir tabakası homojen ve ortotropiktir.
- Lamina çok incedir (kalınlık/ boy  $< 1/20$ ). Dolayısıyla tabakannın düzlem gerilme altında olduğu kabul edilir ve alt ve üst yüzeylerindeki yükler yok sayılır ( $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$ ).
- Enine kayma gerinmesi ihmal edilebilir (Transverse shear strains  $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ ).
- Tüm yer değiştirmeler laminatın kalınlığına kıyasla çok küçüktür ve laminat boyunca devamlıdır.
- Laminatın her tabakası elastiktir (The transverse normal strain  $\epsilon_z = 0$ ).
- Laminatı oluşturan tabakaların ara yüzleri arasında kayma yoktur.

Kartezyen koordinat sistemi  $x$ ,  $y$ , ve  $z$  laminanın genel koordinatlarını tanımlar (Global eksen). Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, lif doğrultusunda  $1$  yönü (boylamasına yön) ve lif doğrultusuna dik  $2$  yönü (enine yön) ise malzeme eksenleri (lokal eksen) olarak adlandırılır ve  $\theta$  açısı, bu iki koordinat sistemi arasında bulunur. Toplam kalınlığı  $h$  olan  $n$  tabakalı bir laminada tabaka koordinatları temsili olarak Şekil 3.4'te verilmiştir.



**Şekil 3.3:** Düzlem yüklemeye tabi tutulmuş, kompozit laminatta lokal ve global eksenler ( Aydın, 2011).



**Şekil 3.4:** Laminat kompozitte tabaka koordinatları ( Kaw, 2006).

Sonuç olarak, laminat kompozitlerin düzlem gerilme koşulları altında olduğu ve düzlem dışı yönde (3 yönü) tüm gerilme bileşenlerinin sıfır olduğu kabul edilebilir. Laminat kompozitin şekil değiştirmeleri, denklem 3.1 şeklinde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Klasik Laminasyon Teorisine dayanan, kompozit laminanın  $k$ 'inci tabakası için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left( \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \varepsilon_{xy}^o \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \right) \quad (3.2)$$

Burada  $[\bar{Q}_{ij}]_k$ , (indirgenmiş  $[Q_{ij}]$  rijitlik matrisi yerine) dönüştürülmüş ve indirgenmiş rijitlik matrisini simgeler. Sırasıyla,  $[\varepsilon^o]$  ve  $[K]$  orta düzlem şekil değiştirmeleri ve eğrilikleridir. Lokal (1,2) ve global (x,y) eksen gerilmeleri arasındaki ilişkilendirme  $\theta$  (lamina açısı) aracılığıyla yapılır,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ve  $[T]$  dönüşüm ( transformasyon) matrisi denklem 3.4 gibidir.

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad c = \cos \theta, \quad s = \sin \theta \quad (3.4)$$

Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı denklem 3. 5 şeklinde yazılır

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q_{ij}] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Benzer şekilde, lokal ve global şekil değiştirmeler arasındaki ilişki denklem 3.6 gibidir;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Burada  $[R]$ 'ye Reuter matrisi denir.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Denklem 3.2’de verilen indirgenmiş rijitlik matrisi  $[\bar{Q}_{ij}]$  elemanları aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (3.8)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \quad (3.9)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (3.10)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \quad (3.11)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 \quad (3.12)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(c^4 + s^4) \quad (3.13)$$

Burada;

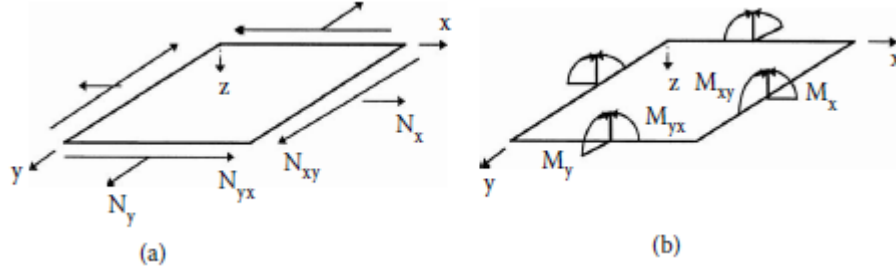
$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (3.14)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (3.15)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (3.16)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (3.17)$$

Görüldüğü gibi, indirgenmiş rijitlik matrisi  $[\bar{Q}_{ij}]$  elemanları malzemenin lokal eksen doğrultusundaki elastik özelliklerine ( $E_1, E_2, G_{12}$  ve  $\nu_{21}$ ) bağlıdır.



**Şekil 3.5:** Kompozit laminat üzerindeki kuvvet ve moment bileşenleri (Kaw, 2006).

Tabakalı kompozite uygulanan normal bileşke kuvvetler ( $N_x$ ,  $N_y$ ), kayma bileşke kuvvet ( $N_{xy}$ ) ve momentler ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_{xy}$ ) ile orta düzlem şekil değiştirmeleri ve orta düzlem eğrilikleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Denklem 3.18 ve 3.19'da görülen  $[A]$ ,  $[B]$  ve  $[D]$  matrisleri şu şekilde tanımlanabilir.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (3.20)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (3.21)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (3.22)$$

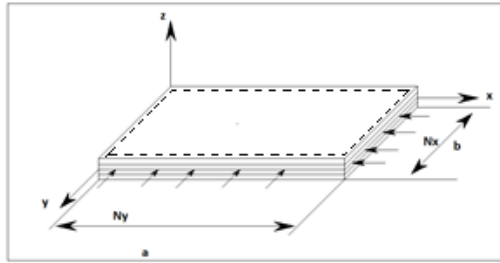
$[A]$ , genişleme rijitlik matrisi,  $[B]$ , bağlantı rijitlik matrisi  $[D]$  ise eğilme rijitlik matrisi olarak adlandırılır (Kaw,2006). Denklem 3.18 ve 3.19 birleştirildiğinde denklem 3.23'te görüldüğü gibi altı eşzamanlı lineer denklemi ve altı bilinmeyeni verir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

[A] matrisi, düzlem şekil değiştirmelerle bileşke düzlem kuvvetler arasında bağlantı kurar. [B] matrisi orta düzlem şekil değişimleri ve eğrilikleri ile kuvvet ve moment terimleriyle bağlantı kurar. [D] ise tabaka eğriliği ile eğilme momenti bileşenleri arasında bağlantı kuran matristir (Kaw, 2006).

### 3.2 Tabakalı Kompozitlerin Burkulma Analizi

Burkulma, ince ve uzun tabakalarda dikkat edilmesi gereken önemli bir hasar konusudur. Burkulma analizinde sadece düzlem içi basma yükleri dikkate alınır, diğer mekanik ve termal yüklerin sıfır olduğu kabul edilir (Reddy, 2004).



**Şekil 3.6:** Çift eksenli yükleme yapılmış, basit mesnetli tabakalı kompozit.

Klasik Laminasyon Teorisinde, göz önüne alınan, dört tarafından basit mesnetli, ortotropik kompozit plakanın (şekil 3.6), düzlem içi basma yükleri ile ( $\lambda N_x$ ,  $\lambda N_y$  ve  $\lambda N_{xy}$ ) yüklendiği varsayılırsa, denge denklemi aşağıdaki gibi olur;

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \lambda \left( N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.24)$$

Burada  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$  ve  $D_{66}$  eğilme rijitlik terimleridir,  $w$  ise düşey yöndeki yer değişimi simgeler.

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3.25)$$

Dört tarafından basit mesnetli dikdörtgen plakanın sınır şartları aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$w(x,0) = 0, \quad w(x,b) = 0, \quad w(0,y) = 0, \quad w(a,y) = 0 \quad (3.26)$$

$$M_{xx}(x,0) = 0, \quad M_{yy}(x,b) = 0, \quad M_{yy}(0,y) = 0, \quad M_{xx}(a,y) = 0 \quad (3.27)$$

Denklem 3.25 denklem 3.24'de yerine konulursa, burkulma indeksi ( $\lambda_b$ ) elde edilir.

$$\lambda_b = \frac{\pi^2 \left[ D_{11} \left( \frac{m}{a} \right)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left( \frac{m}{a} \right)^2 \left( \frac{n}{b} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n}{b} \right)^4 \right]}{N_x \left( \frac{m}{a} \right)^2 + N_y \left( \frac{n}{b} \right)^2 + N_{xy} \left( \frac{m}{a} \right) \left( \frac{n}{b} \right)} \quad (3.28)$$

Tabakaların simetrik yerleştirilmiş olmasından dolayı  $[B]=0$  olur. Malzeme ortotropik kabul edildiğinden  $D_{16}$ ,  $D_{26}$  terimleri sıfırdır ve formülde yoktur. Burkulma indeksi ( $\lambda_b$ ) kritik değere ulaştığında  $x$  ve  $y$  doğrultusunda  $m$  ve  $n$  yarım dalgaları oluşur (Spallino ve Thierauf, 2000). Denklem 3.22'de  $m$  ve  $n$ , burkulma yüklemesiyle oluşan dalga sayılarıdır ve en az birinin 1 olması gerekir. Burkulma yükü kapasitesinin iyi bir tahmin ile sonuçlanabilmesi için  $m$  ve  $n$  değerleri 1 veya 2 olarak alınır. Böylece,  $\lambda_b(1,1)$ ,  $\lambda_b(1,2)$ ,  $\lambda_b(2,1)$  ve  $\lambda_b(2,2)$ 'nin en küçük olanı kiritik burkulma indeksi  $\lambda_{cb}$  olarak tanımlanabilir (Gurdal ve diğ., 1999). Kritik burkulma indeksi  $\lambda_{cb}$  laminatın burkulma olmadan dayanabileceği maksimum yükü belirler.  $\lambda_{cb}$ , tabakanın  $a$ - $b$  oranına, yükleme oranına, malzemeye göre değişir ve ani bir kırılmayı önlemek için  $l$ 'den büyük olmalıdır.

$$\lambda_{cb} = \min \lambda_b(m, n) \quad (3.29)$$

Bu tez çalışmasında ele aldığımız optimizasyon problemi, maksimum kritik burkulma indeksine sahip kompozit tabakaların optimum konfigürasyonlarını bulmaktır. Bu çalışma için  $m$  ve  $n$  değerleri 1 veya 2 olarak alınmıştır.

Kritik burkulma indeksi, bir kez elde edildikten sonra, kritik burkulma yükleri  $N_{x,cr} = \lambda_{cb} N_x$  ve  $N_{y,cr} = \lambda_{cb} N_y$  olarak belirlenir.





## BÖLÜM 4

### TABAKALI KOMPOZİTLERDE HASAR TEORİLERİ

Tabakalı kompozitlerin ağırlığının minimuma indirgenmesi için tabaka sayılarının azaltılması gerekir fakat bu durum, dayanımı sınırlar ve hasara sebep olur. Kompozit yapılar uygulanan yükler karşısında herhangi bir hasara uğramadan dayanabilmelidir. Son yıllarda birçok araştırmacı, lif takviyeli tabakalı kompozitlerin hasar kriterlerinin araştırılması konusuna dikkat çekmiştir. Literatürde, lif takviyeli kompozitlerin hasar kriterlerini doğrulayan çeşitli yaklaşımlar ve bu konuda yapılmakta olan pek çok çalışma vardır.

Tabakalı kompozit malzemelerin hasar teorileri için üç yaklaşım kabul edilmiştir;

1. Etkileşimsiz (Non-Interactive) hasar teorileri (Maksimum Gerilme ve Maksimum Şekil Değiştirme)
2. Etkileşimli (Interactive ) hasar teorileri (Tsai-Hill, Tsai-Wu yada Hoffman)
3. Kısmi etkileşimli (Partially Interactive) hasar teorileri (Puck, Hashin-Rotem)

Kompozitlerde kullanılan hasar teorilerinden hiç birisi, tasarımda, tek başına performans tahminine yetecek kadar güvenilir değildir. Bu yüzden, her bir yaklaşımdan en az bir hasar teorisinin aynı problem için eş zamanlı olarak kullanarak tahminde bulunmak gerekir. Bu tez çalışmasında; Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar teorileri kullanılacaktır.

#### 4.1 Maksimum Gerilme Hasar Teorisi

Tabakalı kompozitlerin hasar analizi, her bir tabakanın malzeme eksenindeki (lokal eksen) gerilmelerine dayanır. Malzeme eksenlerindeki (lokal eksen) normal yada kayma gerilmelerinden herhangi birisi, bu eksenlerdeki normal yada kayma dayanımına ulaşır yada aşarsa tabakanın hasara uğrayacağı düşünülür.

$$-\sigma_{1ult}^C < \sigma_1 < \sigma_{1ult}^T \quad (4.1)$$

$$-\sigma_{2ult}^C < \sigma_2 < \sigma_{2ult}^T \quad (4.2)$$

$$-\tau_{12_{ult}} < \tau_{12} < \tau_{12_{ult}} \quad (4.3)$$

Beş dayanım parametresi pozitif sayı gibi işleme tabi tutulur. Normal gerilmeler basma durumunda negatif, çekme durumunda pozitif alınır. Gerilme elemanları, kendi eksenlerindeki dayanım parametresiyle karşılaştırılır, kendi aralarında etkileşimleri yoktur. Burada ;

$\sigma_1$ : Malzemenin elyaf doğrultusuna paralel yöndeki normal gerilme

$\sigma_2$ : Malzemenin elyaf doğrultusuna dik yöndeki normal gerilme

$\tau_{12}$ : kayma gerilmesi

$\sigma_{1_{ult}}^T$ : Malzemenin elyaf doğrultusuna paralel yöndeki maksimum çekme dayanımı

$\sigma_{1_{ult}}^C$ : Malzemenin elyaf doğrultusuna paralel yöndeki maksimum basma dayanımı

$\sigma_{2_{ult}}^T$ : Elyaf doğrultusuna dik yöndeki maksimum çekme dayanımı

$\sigma_{2_{ult}}^C$ : Elyaf doğrultusuna dik yöndeki maksimum basma dayanımı

$\tau_{12_{ult}}$ : Maksimum kayma dayanımı

(Kaw, 2006).

## 4.2 Tsai-Wu Hasar Teorisi

Bu teori düzlem içi gerilmeye maruz bırakılmış tabakalarda uygulanır. Aşağıdaki denklem ihlal edilirse tabakanın hasara uğradığı düşünülür.

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (4.4)$$

Burada;

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}}, \quad H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}}$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}}, \quad H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2}, \quad H_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{H_{11}H_{22}}$$

Bu teorinin iki önemli avantajı vardır;

- Gerilme bileşenleri arasında etkileşim vardır
- Hesaplama basma ve çekme mukavemet değerlerinin her ikisi kullanılır.

### 4.3 Hashin-Rotem Hasar Teorisi

Bu teori kısmi etkileşimli bir hasar kriteridir ve iki hasar mekanizması içerir;

- Basma ve çekme gerilmesi altında fiber hasarı
- Basma ve çekme gerilmesi altında matris hasarı

$$\sigma_1 = \sigma_{1ult}^T \quad (4.5)$$

(Çekme gerilmesinde fiber hasarı ;  $\sigma_1 > 0$ )

$$-\sigma_1 = \sigma_{1ult}^C \quad (4.6)$$

(Basma gerilmesinde fiber hasarı ;  $\sigma_1 < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2ult}^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12ult}}\right)^2 = 1 \quad (4.7)$$

(Çekme gerilmesinde matris hasarı ;  $\sigma_2 > 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2ult}^C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12ult}}\right)^2 = 1 \quad (4.8)$$

(Basma gerilmesinde matris hasarı ;  $\sigma_2 < 0$ )

## BÖLÜM 5

### OPTİMİZASYON

Optimizasyon, mevcut seçeneklerin arasından istenilen özellikleri sağlayan en uygun seçeneğin bulunmasıdır. Geçmişten günümüze kadar, mühendislik tasarımından finans piyasalarına, günlük faaliyetlerimizden tatilimizi planlamaya, bilgisayar bilimlerinden endüstriyel uygulamalara kadar hayatımızın her alanında yaygın olarak kullanılmıştır. Mühendislik açısından optimizasyon probleminin sistematik bir matematik alt yapısının olması gerekir. Optimizasyonda daima bir şeyi maksimuma çıkarmak ya da minimuma indirmek amaç edinilmiştir. Verimin maksimuma çıkarılması, fiyatın minimuma indirilmesi yada dayanımın maksimum olması gibi. Bu konudaki çalışmalar son kırk yıl içerisinde artarak, etkin bir biçimde sürdürülmektedir.

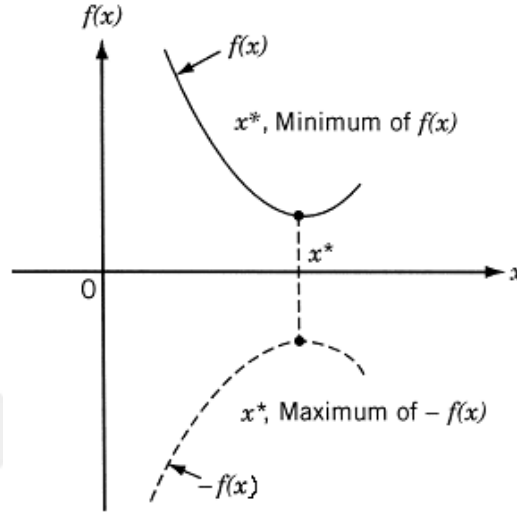
Optimizasyon uygulamasına, amaç fonksiyonunu, maksimum veya minimum yapacak tasarım değişkenlerinin ve kısıtlayıcıların (sınırlayıcılar) tanımlanmasıyla başlanır. Sonra, en uygun optimizasyon yöntemi seçilir. Amaç fonksiyonu  $f(x)$ , tasarımın verimliliğini belirleyen, minimize ya da maksimize edilecek büyüklüktür ve iki grupta sınıflandırılabilir; tekli amaç fonksiyonu, çoklu amaç fonksiyonu. Optimizasyon probleminde tasarım süreci boyunca aldıkları değeri değiştirilen parametrelere tasarım değişkenleri ( $x$ ) denir. Tasarım değişkenlerinin sınırlarına ( $x^L$ ,  $x^U$ ) bound denir.  $x^L$  ve  $x^U$  tasarım değişkeninin alt ve üst sınırlarını tanımlar.  $x$  ile alakalı bir sınırın konulmadığı optimizasyona ‘sınırsız optimizasyon problemi’, sınırlamanın olduğu optimizasyona ise ‘sınırlı optimizasyon problemi’ denir. Eşitlik ve eşitsizlik kısıtları olabilir. Standart bir optimizasyon problemi matematiksel olarak denklem 5.1 gibi tanımlanabilir (Karaboğa, 2004; Elmas, 2007; Akça, 2005).

$$\text{Minimum yada maksimum} \quad f(x) \quad x \in \mathbf{X}$$

$$h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, n_e \quad (5.1)$$

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

Denklem 5.1'de görüldüğü gibi, bir minimizasyon problemini maksimizasyon problemine dönüştürmek için amaç fonksiyonunun işareti değiştirilmelidir. Başka bir deyişle,  $f(x)$ 'i minimize etmek için,  $-f(x)$  maksimize edilebilir (Gürdal ve diğ, 1999).



**Şekil 5.1:** Amaç fonksiyonunun ( $f(x)$ ) minimum ve maksimumu (Rao, 2009).

Tabakalı kompozitlerde en iyi tasarımı elde etmek için çeşitli optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir

## 5.1 Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemleri deterministik ve stokastik yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılır.

**Deterministik optimizasyon yöntemleri:** Yerel maksimum veya minimuma yakınsayan ve modelleme yapmak için ileri derecede matematiksel altyapı gerektiren bir yöntemdir. Deterministik yöntemler analitiktir ve yalnızca sürekli ve türevlenebilir fonksiyonların optimum çözümünü bulabilirler (Rao,2009). Bu yöntemler çok sayıda tasarım değişkeniyle (örneğin ondan fazla değişkenle) problemleri çözmede etkin değildir. Bu gibi durumlar, çoğunlukla lif takviyeli kompozitlerde, lif oryantasyonları, tasarım değişkeni olarak seçildiğinde ortaya çıkar. Bu nedenle deterministik yöntemler tabakalı kompozitlerin rijitlik dizaynında çok kullanılmazlar (Ghiasi ve diğ, 2010).

**Stokastik Yöntemler:** Deneysel tasarıma dayalı, istatistiksel yöntemlerdir. Deterministik optimizasyon yöntemleri matematiksel optimizasyon problemlerini çözmeye başarısız olduklarında, “Genetic Algorithm”, “Differential Evolution”, “Simulated Annealing”, “Nelder-Mead” Algoritmaları gibi stokastik optimizasyon yöntemlerinin kullanılması uygun olur. Stokastik yöntemlerde sistem kara kutu gibi düşünülür, sistemin davranış mekanizması göz önüne alınmaz.

### 5.1.1. Nelder-Mead Algoritması (NM)

Nelder-Mead (simpleks arama) algoritması, öncelikle sınırsız optimizasyon problemi için tasarlanmış geleneksel bir lokal arama yöntemidir. Nelder-Mead global bir optimizasyon algoritması olmasa da, pratik kullanımda çok fazla lokal minimuma sahip olmayan problemler için oldukça iyi sonuçlar verir. Algoritmanın karakteristik özelliklerinden biri, Nelder-Mead Algoritmasının ilk birkaç iterasyonda önemli gelişmeler sağladığı, hızlı ve oldukça yeterli sonuçlar ürettiği yönündedir. Tasarım değişkenlerinin uzayı (bilinmeyen parametreler) simpleksin hareketiyle detaylı bir şekilde araştırılabilir. Optimizasyonunda, bir simpleks,  $k+1$  tane noktadan (köşeden) oluşan, düzgün  $k$  boyutlu geometrik şekildir. Yani, eşkenar üçgen iki boyutlu bir simpleks, düzgün dörtgen üç boyutlu bir simplekstir.

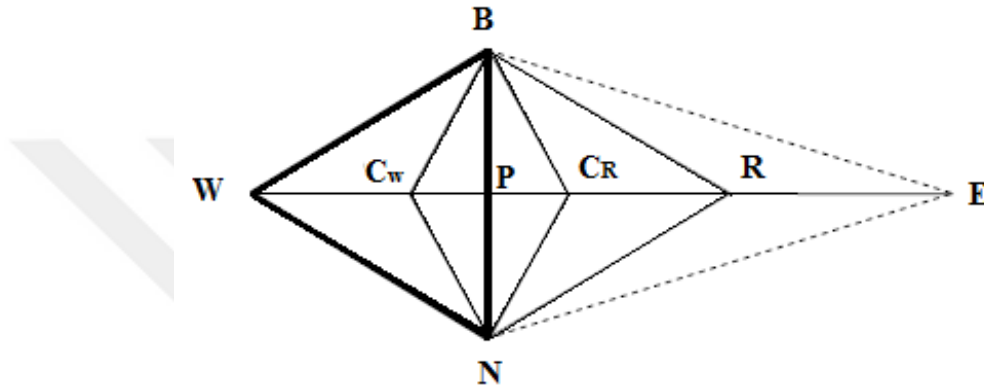


**Şekil 5.2:** Üç boyutlu uzayda değişken boyutlu simpleksler (Yıldız, 2011).

NM algoritmasının ilerleme prosedürü, araştırma uzayında hareket eden geometrik formun belirlenmesini içerir. Uzayın büyüklüğüne uygun simpleks oluşturmak için  $k+1$  tane nokta seçilir, köşelere gelen yanıtlarla simpleksin hareketleriyle optimum nokta yakalanmaya çalışılır. Algoritma seçeneklerinin ayarlanması dört temel işlemle kontrol edilir: yansıma, genişleme, daralma ve büzülme.

$BNW$  simpleksinin köşeleri  $Y_B$  (Best) en iyi yanıtı,  $Y_W$  (Worst) en kötü yanıtı, ve  $Y_N$  (Next) ikinci en kötü yanıtı simgeler. Algoritmanın prensibi, en kötü yanıt (köşe)

bulunur, elimine edilir. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi en kötü köşenin, diğer köşelerin orta noktasından yansıması alınarak yeni bir köşe ( $Y_R$ ) oluşturulur. Diğer hareketler; genişleme ( $Y_E$ ), daralma ( $Y_{CR}$ ), büzülmeyle ( $Y_{CW}$ ) noktaları bulunur.  $Y_R$  yanıtı  $Y_B$ 'den büyük ise yansıma iki katına çıkar ve  $Y_E$  noktası bulunur. Yeni simpleksin  $BNE$  olabilmesi için  $Y_E > Y_R$  olmalıdır. Şart sağlamazsa  $BNR$  yeni simpleks olarak alınır. Diğer taraftan,  $Y_R$  yanıtı  $Y_B$ 'den küçük olursa  $Y_N$  ile kıyaslanır.  $Y_R > Y_N$  ise simpleks  $BNR$ 'dir. Fakat,  $Y_R < Y_N$  ise  $Y_R$  ile  $Y_W$  kıyaslanır  $Y_R > Y_W$  durumunda yeni simpleks  $BNC_R$  (daralma),  $Y_R < Y_W$  durumunda ise  $BNC_W$  (büzülme) yeni simpleks olur

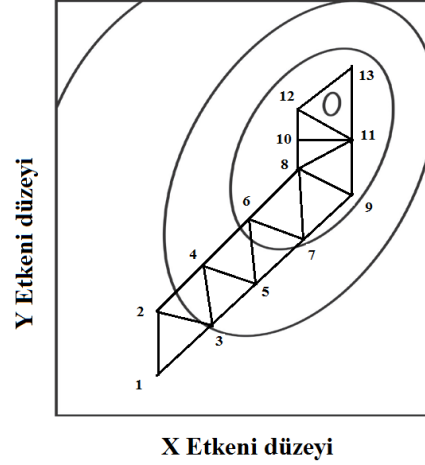


Şekil 5.3: İki boyutlu simpleksin hareket olasılıkları (Yıldız, 2011).

Algoritma, en kötü yanıtı sahip köşenin karşı yönünde bulunan köşelerden, daha iyi yanıt bulma olasılığına göre çalışır. İterasyon devam ettirildiğinde Şekil 5. 4' teki gibi optimum noktaya ilerlenecektir (Şener, 1988).

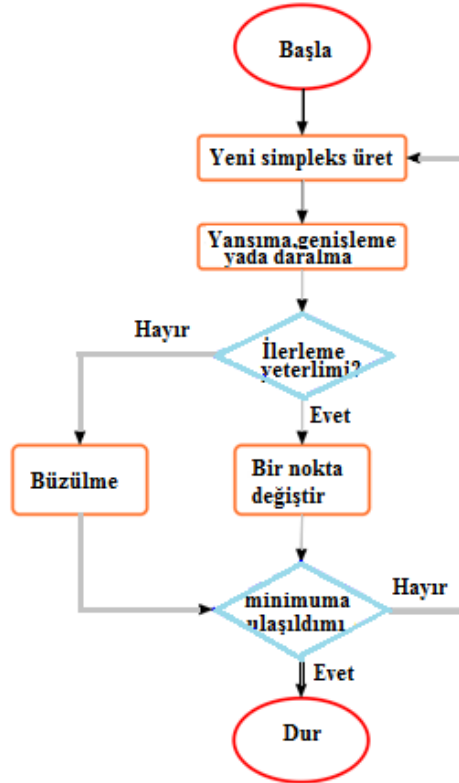
NM algoritması modelleme yapılamayan durumlarda kullanılacak bir yöntemdir. Her iterasyon için bir deneme yapılacağından optimumu bulmak oldukça hızlı olacaktır. Yani az sayıda deney ile optimum saptanabilir. Simpleksin köşe yanıtlarının sıralamasını yapabilecek kadar doğru bilgi deneyler için yeterlidir.

Bu tezde kullanılan “Mathematica” programında kullanılan Nelder-Mead Algoritması bu simpleks algoritmadan daha farklıdır. Simpleks algoritma kısıtsız ve lokal optimum bulabilirken, Stokastik Nelder-Mead Algoritması kısıtlı, ayrık, doğrusal olmayan problemleri çözebilir ve global optimumları bulabilir.



**Şekil 5.4:** Simpleksin optimum noktayı bulmak için ilerleme basamakları (Şener, 1988).

Algoritmanın ilerleme basamakları Şekil 5.5'te verilmiştir: amaç fonksiyonu seçilir, başlangıç simpleksi belirlenir, ilerletilir, sonlandırılır.



**Şekil 5.5:** Nelder-Mead algoritması akış şeması (Barati, 2011'den uyarlanmıştır).

Bu tez çalışması göstermiştir ki “Mathematica” programında Nelder-Mead Algoritması için uygun çalıştırma seçenekleri kullanıldığında (ShrinkRatio, ContactRatio, ReflectRatio, RandomSeed) "Differential Evolution", “Simulated Annealing” Algoritmaları kadar iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.



### 5.1.2.Genetik Algoritma(GA)

Karmaşık problemlerin çözülmesinde tercih edilen, popülasyon temelli, sezgisel bir optimizasyon metodudur. Genetik Algoritma uygulamalarında, önce problem için rastgele çözümler belirlenir, sonra bu çözümler aralarında eşleştirilerek daha iyi çözümler elde edilir. En iyi çözümü bulana kadar arama işlemi sürdürülür. Genetik Algoritma evrim teorisini temel alır. En iyinin hayatta kalması kuralına göre, sürekli daha iyi çözümler üretilir. Genetik Algoritma, popülasyonu geliştirerek, en uygun bireyi oluşturmayı amaçlar, evrim teorisine göre en iyi çözümü elde etmek için, zayıf çözümleri elimine eder. En iyi çözüm hayatta kalmayı başaran çözümdür. En iyiyi bulabilmek için, iyiler ve diğer bireyler eşleştirilerek üreme şansı verilir. Böylelikle önceki neslin bir kısım özelliklerini taşıyan, yeni bir nesil oluşturulur. Bu neslin bireylerinden en iyiler seçilip yeni topluluk elde edilir. Böylece iyi özellikler, nesiller boyunca topluluğa taşınır. Sonuç olarak topluluk, optimal çözüme yakınsanmış olur.

Problem çözümünde, uygunluk fonksiyonu, bireyler arası çaprazlama, mutasyon gibi operatörler kullanılır

**Tablo 5.1:** Biyolojik evrim terimlerin, Genetik Algoritma'daki karşılıkları  
(Yıldız, 2011).

<b>Biyolojik Evrim</b>	<b>Genetik Algoritma</b>
Birey	Model
Kromozom	Kodlanmış parametre kümesi
Gen	Parametreyi tanımlayan koddaki bir hane (ikili kodlamada 1 yada 0 değeri alabilir)
Doğal seçim	Daha uyumlu veriyi üreten çözüm kabul edilir.
Adaptasyon	İlerleyen nesillerde, yanıtları daha iyi olan sürece dahil edilir.
Mutasyon	Erken yakınsamayı ve yerel minimumlara takılmayı engeller.

Genetik Algoritma, parametre kümesinin kodlanmış şeklini kullanır, sadece amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyar, çözüm uzayının sadece belli bir bölümünü tarar,

böylece kısa sürede çözüme ulaşır, lokal optimumlara takılmazlar (Karaboğa, 2004; Altunkaynak ve Esin, 2004; Toğan ve Daloğlu, 2006 ).

### 5.1.3. “Simulated Annealing” Algoritması (SA)

Simulated Annealing Algoritması (SA), katıların ısıtıldıktan sonra, yavaş yavaş soğutulduğu tavlama sürecinin benzeri bir yaklaşımla optimum çözümü arar. Tavlama sıcaklığında, kristalin bütün molekülleri sıvı hale geçer sonra soğutulduğunda ise tekrar kristal yapı oluşur. Algoritmada mevcut kristal durumu verilir, rastgele seçilen molekülün kristal durumunda bozunma sağlanır, ilk durumla sonraki durumun, enerji seviyeleri arasındaki fark negatif ise son durumun enerji seviyesi düşük demektir. Yeni noktanın arama kapsamından uzaklığı Boltzmann olasılık dağılımına dayanır.

$$P(E) = e^{-E/kT} \quad (5.2)$$

$P(E)$  enerji seviyesinin,  $E$  olasılığını temsil eder.  $k$ , Boltzmann sabiti,  $T$  ise sıcaklıktır. Sıcaklık yüksekse amaç fonksiyonundaki hareketlerin kabul olasılığı yüksek, sıcaklık düşüğe bu olasılık düşük olacaktır (Rao, 2009).

Algoritma yüksek bir sıcaklıkla başlar ve her adımda sıcaklık düşürülmeden önce belli miktarda çözüm üretilir. Bu çözümlerin kabulü ya da reddi önceden belirlenmiş kriterlere göre yapılır. Sıcaklık, düşürüldüğünde yeni bir çözüm olasılığının azalmasına neden olur. Sıcaklık minimum seviyeye indiğinde ya da istenilen iterasyona gelindiğinde çalışma sonlandırılır.

Uygulama aşamasında, başlangıçta yüksek bir ( $T$ ) sıcaklık değeri seçilir. Soğutma oranı tanımlanır, sıcaklık değişimi belirlenen kurala ( belirlenen bir fonksiyon) göre yapılır. Her sıcaklıkta yapılacak iterasyon sayısı belirlenir ve buna göre arama sonlandırılır (4).

## 5.2 “Mathematica” Programı

Optimizasyon problemlerinde genellikle amaç fonksiyonu minimize edilir fakat, bazı mühendislik problemlerinde maksimize etmek gerekir(kritik burkulma yük faktörünü maksimize etmek gibi). Mathematica’da kullanılan global optimizasyon algoritmaları amaç fonksiyonunu hem minimize hem maksimize ederek global optimumları bulmaya çalışır. Bu algoritmalar genellikle daha fazla hesaplama yüküne sahiptir. Global optimizasyon problemleri genelde “Minimize” kullanılarak çözülür yada “NMinimize” kullanılır.

### 5.2.1 NMinimize komutu

“NMinimize” ve “NMaximize”, global optimumları belirli kısıtlar altında bulmak için çeşitli algoritmaları uygular. Yöntemler, diferansiyellenemez veya sürekli olmayan ve yerel optima tarafından kolayca yakalanmayan fonksiyonlarla baş edebilecek kadar esneklerdir.

Global optimum bulmak, kısıtlamalar olmadan zor olabilir ve bu nedenle kullanılan yöntemler başarısız olabilir. Bu durumda fonksiyonu farklı başlangıç koşullarında birkaç kez optimize etmek ve sonuçların en iyisini almak çoğunlukla yararlı olur.

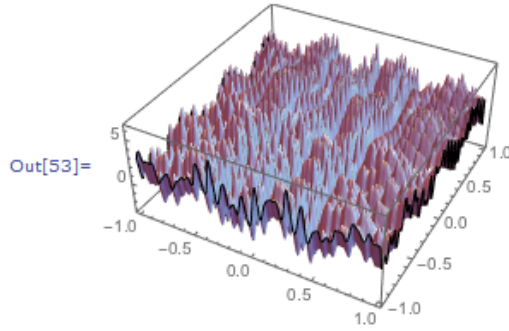
“NMinimize” ve “NMaximize” için kısıtlamalar, eşitliklerin, eşitsizliklerin ve sınırların bir listesi şeklinde yazılmalıdır. Eşitsizlikler ve eşitsizlikler doğrusal olmayabilir. Güçlü eşitsizlikler, yaklaşık sayılarla çalışma sınırları nedeniyle zayıf eşitsizliklere dönüştürülecektir. Tasarım değişkenleri tamsayı veya reel sayı olmalıdır ve aksi belirtilmediği sürece reel sayı olarak kabul edilir. Noktalar, sınırların dışına çıktığında, kısıtlamalar genelde bir penaltı fonksiyonu içinde kullanılarak çözüme zorlanır.

“NMinimize” çalışabilmesi için dikdörtgen bir başlangıç bölgesine ihtiyaç duyar. Bu, diğer nümerik yöntemlere bir başlangıç noktası yada noktaları vermekle benzerdir. Başlangıç bölgesi, her değişkene bir üst ve alt sınır vererek belirtilir(bound). Bu,  $a \leq x \leq b$  kısıtlaması veya  $\{x, a, b\}$  değişkenleriyle yapılır. Her ikisi de verilirse, değişkenlerin sınırları başlangıç bölgesi için kullanılır ve sınırlamalar sadece sınırlamalar olarak kullanılır. Ancak, tasarım değişkeni  $x$  için, başlangıç bölgesi belirtilmemişse, varsayılan başlangıç bölgesi olan  $-1 \leq x \leq 1$  kullanılır. Farklı değişkenlerin başlangıç bölgeleri farklı şekillerde tanımlanabilir.

“NMinimize” ve “NMaximize”in çeşitli optimizasyon yöntemleri vardır: "DifferentialEvolution", "Nelder-Mead", "RandomSearch" ve "Simulated Annealing". Optimizasyon metodu, “Method” seçeneği ile kontrol edilir, bu “Method” seçeneği de; metodu bir liste olarak alır. Metoda özgü tüm seçenekler, sol taraflar da liste halinde verilmelidir. Şekil 5.4’te Mathematica Programında, “NMinimize” komutunun nasıl kullanıldığı ve binlerce lokal ve global minimum arasından optimum noktanın bulunması görülebilir. Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de ise Mathematica Programında kullanılan bazı algoritmalara ait çözücü seçenekleri görülmektedir.

The following function has a large number of local minima.

```
In[51]:= Clear[f];
f = eSin[50 x] + Sin[60 ey] + Sin[70 Sin[x]] + Sin[Sin[80 y]] - Sin[10 (x + y)] +  $\frac{1}{4} (x^2 + y^2)$ ;
Plot3D[f, {x, -1, 1}, {y, -1, 1}, PlotPoints -> 50, Mesh -> False]
```



Use RandomSearch to find a minimum.

```
In[54]:= NMinimize[f, {x, y}, Method -> "RandomSearch"]
Out[54]= {-2.85149, {x -> 0.449094, y -> 0.291443}}
```

Use RandomSearch with more starting points to find the global minimum.

```
In[55]:= NMinimize[f, {x, y}, Method -> {"RandomSearch", "SearchPoints" -> 250}]
Out[55]= {-3.30687, {x -> -0.0244031, y -> 0.210612}}
```

**Şekil 5.6:** Mathematica Programında NMinimize komutunun kullanılması ile ilgili ekran görüntüsü.

Varsayılan yöntemle “NMinimize”, sorunun türüne göre hangi yöntemi kullanacağını seçer. Amaç fonksiyonu ve kısıtlamaları doğrusal ise, Linear Programming kullanılır. Tamsayı (integer) değişkenleri varsa veya amaç fonksiyonunun başı nümerik bir fonksiyon değilse, "Differential Evolution" kullanılır. Geri kalan hepsi için, Nelder-Mead kullanılır, ancak Nelder-Mead kötü performans gösteriyorsa, "Differential Evolution" kullanılır.

“NMinimize” tarafından kullanılan yöntemler genellikle her iterasyonda iyileştirme yapmazlar, bu yüzden yakınsama yalnızca birkaç iterasyon gerçekleştikten sonra kontrol edilir.

option name	default value	
"BoltzmannExponent"	Automatic	exponent of the probability function
"InitialPoints"	Automatic	set of initial points
"LevelIterations"	50	maximum number of iterations to stay at a given point
"PenaltyFunction"	Automatic	function applied to constraints to penalize invalid points
"PerturbationScale"	1.0	scale for the random jump
"PostProcess"	Automatic	whether to post-process using local search methods
"RandomSeed"	0	starting value for the random number generator
"SearchPoints"	Automatic	number of initial points
"Tolerance"	0.001	tolerance for accepting constraint violations

SimulatedAnnealing specific options.

Şekil 5.7: "Simulated Annelling" çözücüsü seçenekleri.

The differential evolution method is computationally expensive, but is relatively robust and tends to work well for problems that have more local minima.

option name	default value	
"CrossProbability"	0.5	probability that a gene is taken from $x_i$
"InitialPoints"	Automatic	set of initial points
"PenaltyFunction"	Automatic	function applied to constraints to penalize invalid points
"PostProcess"	Automatic	whether to post-process using local search methods
"RandomSeed"	0	starting value for the random number generator
"ScalingFactor"	0.6	scale applied to the difference vector in creating a mate
"SearchPoints"	Automatic	size of the population used for evolution
"Tolerance"	0.001	tolerance for accepting constraint violations

DifferentialEvolution specific options.

Şekil 5.8: "Differential Evolution" çözücüsü seçenekleri.

Strictly speaking, Nelder–Mead is not a true global optimization algorithm; however, in practice it tends to work reasonably well for problems that do not have many local minima.

option name	default value	
"ContractRatio"	0.5	ratio used for contraction
"ExpandRatio"	2.0	ratio used for expansion
"InitialPoints"	Automatic	set of initial points
"PenaltyFunction"	Automatic	function applied to constraints to penalize invalid points
"PostProcess"	Automatic	whether to post-process using local search methods
"RandomSeed"	0	starting value for the random number generator
"ReflectRatio"	1.0	ratio used for reflection
"ShrinkRatio"	0.5	ratio used for shrinking
"Tolerance"	0.001	tolerance for accepting constraint violations

NelderMead specific options.

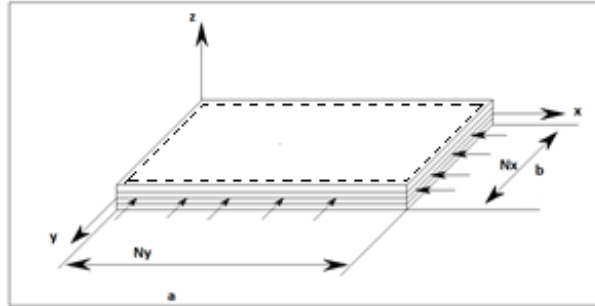
Şekil 5.9: "Nelder-Mead" çözücüsü seçenekleri.

## BÖLÜM 6

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 6.1 Problem Tanımı

Tabakalı kompozitlerin, düzlem içi, bası yükleri altında burkulma yük kapasitesinin belirlenmesi, kompozit tasarımında hayati öneme sahiptir. Çünkü burkulma, yapıda erken hasara sebebiyet verebilir. Bu nedenle, tezde farklı yüklemelerde ve farklı geometrilerde, burkulmaya ve kırılmaya karşı dirençli, en iyi tabakalı biyokompozit yapı tasarımını elde etmek amaçlanmıştır. Üzerinde çalışılan malzeme, Şekil 6.1 de görüldüğü gibi,  $a$  ve  $b$  boyutlarında dikdörtgen geometriye sahip, dört yanından basit mesnetli ve birim uzunluk başına  $N_x$  ve  $N_y$  düzlem içi yüklere maruz bırakılmıştır.



**Şekil 6.1:** Çift eksenli yükleme yapılmış, basit mesnetli tabakalı kompozit.

Tezde, burkulma optimizasyonu için literatürde daha önce bahsedilmiş, 64 tabakalı grafit/epoksi kompozit plak ele alınmıştır. Her tabaka 0.127 mm kalınlığında ve plakanın boyu  $a = 0.508$  m  $N_x = 1$  N/m alınmıştır.  $N_y$ ,  $N_x / N_y$  oranına göre  $b$  ise  $a/b$  oranına göre hesaplanmıştır. Tabakaların elastik özellikleri ve dayanımları literatür çalışmalarından, (Karakaya ve Soykasap, 2009) ve (Lopez, ve diğ, 2009) alınmış ve Tablo 6.1. ve 6.2 de verilmiştir.

**Tablo 6.1:** Grafit/epoksi ve karbon/epoksi laminaların elastik özellikleri.

Malzeme	Grafit/Epoksi	Malzeme	Karbon/Epoksi
Elastik Modül	$E_1= 127.6$ GPa	Elastik Modül	$E_1= 116,600$ MPa
Elastik Modül	$E_2=13.0$ GPa,	Elastik Modül	$E_2=7673$ MPa
Kayma modülü	$G_{12}= 6.4$ GPa,	Kayma modülü	$G_{12} = 4173$ MPa
Poisson oranı	$\nu_{12}= 0.3$	Poisson oranı	$\nu_{12}= 0.27$
Tabaka kalınlığı	$t=0.127$ mm	Tabaka kalınlığı	$t=0.1$ mm

(Karakaya ve Soykasap, 2009)

(Lopez ve diğ, 2009)

**Tablo 6.2:** Grafit/epoksi laminanın maksimum dayanım değerleri

(Lopez ve diğ, 2009).

Dayanım değerleri	
$\sigma_{1ult}^T$	2062 MPa
$\sigma_{1ult}^C$	1701 MPa
$\sigma_{2ult}^T$	70 MPa
$\sigma_{2ult}^C$	240 MPa
$\tau_{12ult}$	105 MPa

Tabaka dizaynında çalışılan yükleme oranları  $N_x/N_y = 1$ ,  $N_x/N_y = 2$ ,  $N_x/N_y = 1/2$  ve tabakanın geometri oranları;  $a/b = 1/2$ ,  $a/b = 1$ ,  $a/b = 2$  alınmıştır. Optimizasyon işleminde tasarım değişkeni olarak lif oryantasyon açıları alınmış olup,  $(-90 \leq \theta \leq 90)$  arasında ve  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$  den oluştuğu kabul edilmiştir. Kompozit tabaka simetrik ve balans alındığı için tasarım değişkenlerinin sayısı 64'ten 16'ya düşmüştür. 64 tabakalı kompozitin, tabakalarının istif sırasının gösterimi şu şekildedir.

$$[\pm\theta_1 / \pm\theta_2 / \pm\theta_3 / \pm\theta_4 / \pm\theta_5 / \pm\theta_6 / \pm\theta_7 / \pm\theta_8 / \pm\theta_9 / \pm\theta_{10} / \pm\theta_{11} / \pm\theta_{12} / \pm\theta_{13} / \pm\theta_{14} / \pm\theta_{15} / \pm\theta_{16}]_s$$

Bu tezde optimizasyon probleminin matematiksel gösterimi şu şekilde ifade edilebilir.

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

Maksimize:  $\lambda_{cb}$  ( Kritik burkulma indeksi )



Kısıt: Simetrik, balans, ilk tabaka hasarı (Tsai-Wu, Maksimum Gerilme ve Hashin-Rotem hasar kriterleri  $(f_E)_k < 1$  )

Kompozit tabakaların optimum tasarımı yapılmadan önce, literatürdeki önceden yapılmış çalışmalardan elde edilen spesifik sonuçlar kullanılarak kritik burkulma indeksi ve hasar kriterlerinin doğrulaması yapılmıştır. Optimizasyonda kritik burkulma indeksi ( $\lambda_{cb}$ ) amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Amaç fonksiyonunun her bir tasarımı, Mathematica programı kullanılarak yapılmıştır. Burada,  $\lambda_b(1, 1)$ ,  $\lambda_b(1, 2)$ ,  $\lambda_b(2, 1)$  ve  $\lambda_b(2, 2)$  arasında değeri en küçük olan kritik burkulma indeksi ( $\lambda_{cb}$ ) olarak alınmış ve amaç fonksiyonu olarak optimizasyon sürecinde maksimize edilmiştir. Optimize edilmiş kritik burkulma indeksini elde eden tasarımlar Tsai-Wu, Maksimum Gerilme ve Hashin-Rotem hasar kriterleriyle test edilmiştir. Sonra aynı çalışma Ketten/polipropilen biyokompozit malzeme için tekrarlanmıştır.

## 6.2. Optimizasyon Sonuçları

Bu tez çalışmasında, düzlem içi yüklere maruz bırakılan, dört taraftan basit mesnetli, tabakalı kompozit plakalar verilen yükleme ve geometrik oranlar için "Mathematica" programında stokastik yöntemlerden "Nelder-Mead" Algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Optimizasyon seçenekleri sistematik olarak (i) "ShrinkRatio" 0.5 ve 1 arasında 0.05 artış miktarı ile ; (ii) "ContractRatio" 0.5 ve 1 arasında 0.05 artış miktarı ile; (iii) "RandomSeed" 1 ve 120 arasında 1 artış miktarı ile; (iv) "ReflectRatio" =2 durumu için algoritma içerisinde değer atanmıştır.

Tabaka yığınlarının optimum tasarımları burkulma ve kırılma hasar kriterleri dikkate alınarak incelenmiştir.

Öncelikle, optimizasyon algoritmasının güvenilirliğini göstermek için kritik burkulma yük faktörü ve Tsai-Wu, Maksimum Gerilme ve Hashin-Rotem hasar kriterleriyle ilgili, daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları kullanılarak doğrulama yapılmıştır. Karakaya ve Soykasap (2009) ve Devci (2011) çalışmasında belirtilen, Tablo 6.3'te gösterilen yükleme durumları için (LC1-LC9) kritik burkulma yük indeksi doğrulama sonuçları, Tablo 6.4'te verilmiş, benzer şekilde Lopez ve diğ. (2009) çalışması referans alınarak, hasar kriter doğrulaması Tablo 6.5'te verilmiştir.

**Tablo 6.3:** Kompozit plağın yükleme durumları ve geometrileri (LeRiche R, Haftka, 1993).

<b>Yükleme durumları</b>	<b>a(cm)</b>	<b>b(cm)</b>	<b><math>N_x</math>(N/m)</b>	<b><math>N_y</math>(N/m)</b>
LC1	50.8	25.4	1	1
LC2	50.8	50.8	1	1
LC3	50.8	101.6	1	1
LC4	50.8	25.4	1	0.5
LC5	50.8	50.8	1	0.5
LC6	50.8	101.6	1	0.5
LC7	50.8	25.4	1	2
LC8	50.8	50.8	1	2
LC9	50.8	101.6	1	2

**Tablo 6.4:** Grafit/epoksi malzeme için kritik burkulma yük indeksi doğrulaması.

<b>Yükleme durumları</b>	<b><math>\lambda_{cb}</math> (Karakaya ve Soykasap 2009)</b>	<b><math>\lambda_{cb}</math> (Deveci,2011)</b>	<b><math>\lambda_{cb}</math> (Mevcut çalışma)</b>
LC1	695,781.30	695,663.1	695,663
LC2	242,823.10	242,844.4	242,844
LC3	173,945.30	173,915.8	173,945
LC4	1,057,948.30	1,057,902.7	1,057,902
LC5	323,764.00	323,792.5	323,792
LC6	206492.9	206,518.0	206,518
LC7	412,985.80	413,036.0	413,036
LC8	161,882.10	161,896.2	161,896
LC9	132,243.50	132,237.8	132,238

Tablo 6.4'te kritik burkulma yük indekslerinin Karakaya ve Soykasap (2009) ve Deveci (2011) tarafından verilen değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu kullandığımız Nelder-Mead Algoritmasının güvenilir sonuçlar vereceği anlamına gelmektedir.

**Tablo 6.5:**  $N_x=10000$  ve  $N_x=-10000$  yükleme durumunda Karbon/epoksi malzeme için hasar kriterleri doğrulaması.

Yüklemeler $N_x$ (N/mm)	Fiyat	RS	Ağırlık (N)	Ağırlık farkı (%)	Hasar Kriterleri (FC)	İstif sırası $0_2, \pm 45, 90_2$	Hasar faktör indeksi ( $f_E$ )	
							Lopez (2009)	Mevcut çalışma
-10000	1400	1.0	102	0	Hashin ve Puck*	16	0.96(f)	0.91(f)
	680	0.88	95	-6.9	TW	15	0.96	0.96
	1120	1.00	95	-6.9	MS	15	0.98	0.98
10000	1120	0.99	83	0	Hashin ve Puck*	13	0.94(f)	0.93(f)
	840	0.94	83	0	TW	13	0.86	0.86
	780	0.98	83	0	MS	13	0.93	0.93

\*Lopez 2009 makalede kısmi etkileşimli hasar kriteri olarak Puck hasar kriteri kullanılırken bu çalışmada Hashin-Rotem hasar kriteri kullanılmıştır.

**Tablo 6.6:**  $N_x=3000$  N/mm ,  $N_y=3000$  N/mm yükleme durumunda Karbon/epoksi malzeme için hasar kriterleri doğrulaması

Yükleme $N_{xy}$ (N/mm)	Fiyat	RS	Ağırlık (N)	Ağırlık farkı (%)	Hasar Kriterleri (FC)	İstif sırası $0_2, \pm 45, 90_2$	Hasar faktör indeksi ( $f_E$ )	
							Lopez (2009)	Mevcut çalışma
<b>0</b>	100	1.00	108	0	Hashin ve Puck*	6 5 6	0.96(FF)	0.91(MF)
	80	0.99	114	5.6	TW	6 6 6	0.97	0.95
	100	1.00	108	0	MS	5 7 5	0.96	0.96
<b>100</b>	180	1.00	108	0	Hashin ve Puck*	17	0.98(FF)	0.95(MF)
	240	1.00	114	5.6	TW	18	0.98	0.97
	140	1.00	108	0	MS	17	0.98	0.98
<b>250</b>	-	0.71	108	0	Hashin ve Puck*	17	1.00(FF)	1.01(MF)
	-	0.32	114	5.6	TW	18	1.00	0.99
	-	0.77	108	0	MS	17	1.00	1.00
<b>500</b>	5200	0.81	114	0	Hashin ve Puck*	18	1.00(FF)	0.99(MF)
	1460	1.00	121	6.1	TW	19	0.97	0.96
	3160	0.96	114	0	MS	18	1.00	1.00
<b>1000</b>	1780	1.00	127	0	Hashin ve Puck*	20	0.98(FF)	0.96(MF)
	-	0.41	127	0	TW	20	0.99	0.98
	3160	0.96	127	0	MS	20	0.98	0.99

**Tablo 6.7:**  $N_x = -3000$  N/mm;  $N_y = -3000$  N/mm yükleme durumunda Karbon/epoksi malzeme için hasar kriterleri doğrulaması

Yüklemeler $N_{xy}$ (N/mm)	Fiyat	RS	Ağırlık (N)	Ağırlık farkı (%)	Hasar Kriterleri (FC)	İstif sırası $0_2, \pm 45, 90_2$	Hasar faktör indeksi ( $f_E$ )	
							Lopez (2009)	Mevcut çalışma
0	120	1.00	57	0	Hashin ve Puck*	3 3 3	0.93(FF)	0.91(FF)
	120	1.00	51	-10.8	TW	4 4	0.80	0.73
	140	1.00	57	0	MS	4 1 4	0.91	0.91
100	60	1.00	64	11.5	Hashin ve Puck*	9	0.90(FF)	0.94(FF)
	160	1.00	51	-10.8	TW	8	0.88	0.76
	240	0.96	57	0	MS	9	0.94	0.94
250	2100	1.0	76	0	Hashin ve Puck*	10	0.99(FF)	0.88(FF)
	800	1.00	57	-20.5	TW	8	0.92	0.85
	-	0.76	64	-10.6	MS	9	0.98	0.98
500	520	1.00	76	0	Hashin ve Puck*	12	0.95(FF)	0.8(FF)
	560	1.00	57	-24.7	TW	9	0.73	0.67
	420	1.00	64	-16.3	MS	10	0.96	0.96
1000	780	0.94	95	0	Hashin ve Puck*	15	0.95(FF)	0.73(FF)
	2180	1.00	64	-33.1	TW	10	0.75	0.70
	1040	1.00	70	-26.4	MS	11	1.00	1.0

Tablo 6.5, Tablo 6.6 ve Tablo 6.7’de Lopez ve diğ (2009) çalışmaları ile mevcut çalışma karşılaştırılmış ve hasar faktör indeksinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, Lopez ve diğ (2009) çalışmasında kısmi interaktif hasar teorisi olarak Puck hasar teorisini kullandığına, bu tez çalışmasında ise Hashin-Rotem hasar teorisinin kullanıldığına dikkat edilmelidir. Buradan, kullanılan hasar programının sonuçlarının da güvenilirliği anlaşılmaktadır.

64 tabakalı, Grafit/epoksi ve Keten/polipropilen kompozit malzemelerin Tablo 6.3’te verilen yük ve geometri oranlarına ( $a/b$ ) göre, sadece  $0^\circ, \pm 45^\circ 90^\circ$  açılar kullanılarak, Nelder-Mead Algoritması ile optimizasyonları yapılmış ve sonuçlar tablolastırılmıştır.

LC1 ( $N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 2$ ) yükleme durumu için, 64 tabakalı Grafit/epoksi malzemenin optimizasyonu  $0^\circ, \pm 45^\circ 90^\circ$  açıları kullanılarak, Differential Evolution ve Simulated Annealing gibi çok güvenilir tekniklerle de yapılmış ve global optimum  $\lambda_{cb}$  değeri için farklı açı konfigürasyonları bulunmuştur. Tablo 6.8 ve

6.9’da görüldüğü gibi Differential Evolution için 26 tane farklı lif konfigürasyonu, Simulated Annealing için ise 5 farklı lif konfigürasyonu elde edilmiştir.

**Tablo 6.8:** Grafit/epoksi,  $N_x/N_y = 1$  ve  $a/b = 2$  yükleme durumu için, Differential Evolution Algoritması Optimizasyon sonuçları

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{12}/\pm 45]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_{12}/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_6]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{10}/\pm 45_2]_S$	695822
$[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_{10}/\pm 45_3/90_2]_S$	695822
$[90_6/\pm 45_2/90_{10}/\pm 45_3/90_6]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_6]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_6]_S$	695822
$[90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822
$[90_8/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_4]_S$	695822
$[90_8/\pm 45_3/90_{10}/\pm 45_2/90_4]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_2]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45]_S$	695822
$[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{10}]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2]_S$	695822
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2]_S$	695822
$[90_6/\pm 45_2/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{16}/\pm 45_3]_S$	695822

**Tablo 6.9:** Grafit/epoksi,  $N_x/N_y = 1$  ve  $a/b = 2$  yükleme durumu için, Simulated Annealing Algoritması optimizasyon sonuçları

Lif Açısı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[\pm 45/90_{14}/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2]_S$	695822
$[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_{10}/\pm 45_3/90_2]_S$	695822
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_4]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822

### 6.3 Grafit/epoksi Tabakalı Kompozitlerde Optimum Lif Açısı Dizilimlerinin Nelder-Mead Algoritması Kullanılarak Bulunması

Tezin amacı doğrultusunda, 64 tabakalı, Grafit/epoksi kompozit malzemenin, Tablo 6.3'te belirtilmiş olan, farklı yükleme ve  $(a/b)$  oranları için Nelder-Mead Algoritması ile optimizasyonu yapılmış, bu çalışmada, lokal ve global  $\lambda_{cb}$  değerleri için 14520 lif konfigürasyonu bulunmuştur. Bunların içinden global  $\lambda_{cb}$  değeri için farklı konfigürasyonlar seçilmiş, ve Tablo 6.10 – 6.18 arasında verilmiştir. Tablo 6.10'da görüldüğü gibi, bütün  $N_x/N_y$  oranlarında, en büyük kritik burkulma yük indeks değerleri  $a/b=2$  durumlarında bulunmuştur. Bu ilgili tasarımların burkulma açısından daha fazla yüklemeye dayanabileceği anlamına gelir. Grafit/ Epoksi için,  $a/b$  oranı arttıkça, kritik burkulma indeksinin büyüdüğü,  $a/b$  oranı azaldıkça, kritik burkulma indeksinin küçüldüğü ve güvensizleştiği görülmüştür. Bu durum Ketten/polipropilen malzeme için geçerli değildir. LC9 şartlarının bu malzeme için en kritik yükleme ve geometriye sahip olduğu, kritik burkulma indeksinin en küçük değere bu şartlarda ulaştığı görülmüştür. LC4 durumu ise en güvenli şartların olduğu durumdur. Bu  $N_x/N_y$  ve  $a/b$  oranlarında elde edilen konfigürasyonlar tasarım için önerilir.

**Tablo 6.10:** Nelder-Mead Algoritması kullanılarak  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$   $90^\circ$  yönelimlerinde, farklı  $N_x/N_y$  ve  $a/b$  oranlarında, Grafit/epoksi kompozit için bulunan kritik burkulma yük indeks değerleri ve açılı örnekleri.

$N_x/N_y$	$a/b$	$\lambda_{cb}$	Lif Açılı Dizilimi Örneği
<b>1</b>	1	242844	$[\pm 45_{16}]_S$
	2	695822	$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2]_S$
	1/2	173956	$[0_4/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2]_S$
<b>2</b>	1	323792	$[\pm 45_{16}]_S$
	2	1057960	$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45_3]_S$
	1/2	206518	$[0_{16}/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_S$
<b>1/2</b>	1	161896	$[\pm 45_{16}]_S$
	2	413036	$[90_{16}/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2]_S$
	1/2	132245	$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45]_S$

**Tablo 6.11:**  $N_x/N_y = 1$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_{10}/\pm 45_3/90_2]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822
$[\pm 45/90_{14}/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2]_S$	695822
$[90_6/\pm 45_2/90_{10}/\pm 45_3/90_6]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{16}/\pm 45_3]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	695822
$[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{12}/\pm 45]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_{12}/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_6]_S$	695822
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	695822

**Tablo 6.11(devam):**  $N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_2]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	695822
$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{10}/\pm 45_2]_S$	695822
$[90_6/\pm 45_2/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45]_S$	695822
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_6]_S$	695822
$[90_8/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_S$	695822
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_4]_S$	695822

Tablo 6.11’de verilen yükleme koşullarında, bulunan global optimum değerde 24 tane farklı lif açılı dizilimi bulunmuştur.

**Tablo 6.12**  $N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 1$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[\pm 45_{16}]_S$	242844

Tablo 6.12’de verilen yükleme koşullarında, elde edilen global optimum değerde sadece 1 tane lif açılı dizilimi bulunmuştur.



**Tablo 6.13:**  $N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar.

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_6]_S$	173956
$[\pm 45/0_{12}/\pm 45/0_6/\pm 45_3/0_4]_S$	173956
$[0_6/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_6/\pm 45_2/0_6]_S$	173956
$[0_2/\pm 45/0_8/\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_6/\pm 45]_S$	173956
$[0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_{10}/\pm 45_2]_S$	173956
$[0_8/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4]_S$	173956
$[\pm 45/0_{10}/\pm 45/0_{10}/\pm 45_3/0_2]_S$	173956
$[0_2/\pm 45/0_{10}/\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_4/\pm 45]_S$	173956
$[\pm 45/0_{14}/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45]_S$	173956
$[0_6/\pm 45_2/0_{10}/\pm 45_3/0_6]_S$	173956
$[0_8/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_{10}]_S$	173956
$[0_6/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_4]_S$	173956
$[0_2/\pm 45/0_{12}/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_6]_S$	173956
$[0_8/\pm 45_3/0_{10}/\pm 45_2/0_4]_S$	173956
$[0_4/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2]_S$	173956
$[0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_8/\pm 45/0_4/\pm 45]_S$	173956
$[0_2/\pm 45/0_8/\pm 45/0_4/\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_2]_S$	173956
$[0_6/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2]_S$	173956

Tablo 6.13'te verilen yükleme koşullarında, elde edilen global değerde 18 tane farklı lif açılı dizilimi bulunmuştur. Tablo 6.11 ve Tablo 6.13 simetrik özellik göstermektedir.  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  birbiriyle yer değiştirmiştir.  $a/b$  oranından dolayı  $\lambda_{cb}$  farklılık göstermektedir. Tablo 6.11'de  $[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_{10}/\pm 45_3/90_2]_S$  konfigürasyonu Tablo 6.13'de  $[\pm 45/0_{10}/\pm 45/0_{10}/\pm 45_3/0_2]_S$  konfigürasyonu kıyaslandığında sadece  $0^\circ$  ve  $90^\circ$ 'ler farklıdır.

**Tablo 6.14:**  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_4/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_6/\pm 45_4]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45_3]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_3]_S$	1057960
$[\pm 45_2/90_8/\pm 45_3/90_4/\pm 45_4/90_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_5/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_5/90_4/\pm 45_3/90_4]_S$	1057960
$[\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4/90_4]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_2/45]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_2/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45/90_6/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_6/\pm 45_5/90_8/\pm 45_3]_S$	1057960
$[90_4/\pm 45_3/90_2/\pm 45_3/90_6/\pm 45_3/90_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_6/\pm 45_6/90_2/\pm 45/90_4]_S$	1057960
$[90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_4]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45]_S$	1057960

**Tablo 6.14(devam):**  $N_x/N_y = 2$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_4/90_2/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_3/90_8/\pm 45_5/90_4/\pm 45]_S$	1057960
$[90_4/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_5/90_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_6/\pm 45/90_2/45_2]_S$	1057960
$[90_4/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_6/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_8/\pm 45_5]_S$	1057960
$[\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_2/\pm 45_3/90_4/\pm 45_2/90_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2]_S$	1057960
$[90_4/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45_6/90_4/\pm 45/90_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_4/\pm 45_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_6/\pm 45_3/90_2/\pm 45_2/90_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_4]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_4]_S$	1057960
$[90_6/\pm 45_9/90_8]_S$	1057960
$[\pm 45/90_6/\pm 45_4/90_4/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_2]_S$	1057960
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_6/90_6]_S$	1057960
$[\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_6/\pm 45_4/90_2]_S$	1057960
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_2]_S$	1057960

Tablo 6.14'te verilen yükleme koşullarında, elde edilen global değerde 53 tane farklı konfigürasyon bulunmuştur.  $[90_6/\pm 45_9/90_8]_S$  imalatı en kolay konfigürasyon olduğu söylenebilir.

**Tablo 6.15:**  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 1$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açığı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[\pm 45_{16}]_S$	323792

Tablo 6.15'te verilen koşullarda elde edilen global değerde bir tane lif açığı dizilimi bulunmuştur.

**Tablo 6.16:**  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açığı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[0_{16}/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_S$	206518

Tablo 6.16'da verilen yükleme koşullarında elde edilen global değerde bir tane lif açığı dizilimi vardır.

**Tablo 6.17:**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açığı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[90_{16}/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2]_S$	413036

Tablo 6.17'de verilen yükleme koşullarında elde edilen global değerde bir tane lif açığı dizilimi vardır.

**Tablo 6.18:**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[\pm 45_{16}]_S$	161896

Tablo 6.18’de verilen şartlarda sadece bir tane lif açılı dizilimi bulunmuştur.

**Tablo 6.19:**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45_3]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_3/0_2/\pm 45_3/0_6/\pm 45_3/0_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45_6/0_4/\pm 45/0_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_6/\pm 45_5/0_8/\pm 45_3]_S$	132245
$[\pm 45/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_6/\pm 45_6/0_2/\pm 45/0_4]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_8/\pm 45_5/0_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_6/\pm 45_4/0_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_6/0_6]_S$	132245
$[\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_6/\pm 45_4]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_3/0_8/\pm 45_5/0_4/\pm 45]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_5/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2]_S$	132245
$[\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3]_S$	132245
$[\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_8/\pm 45_5]_S$	132245

**Tablo 6.19(devam):**  $N_x/N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45_5/0_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_6/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_6/\pm 45_3/0_2/\pm 45_3/0_4/\pm 45_2/0_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_8/\pm 45/0_2/\pm 45_4]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_3]_S$	132245
$[\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_4/\pm 45]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_5/0_8/\pm 45_3/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45_5/0_2/\pm 45/0_4]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_2/\pm 45_3/0_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_6/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_3/0_4/\pm 45/0_6/\pm 45_5/0_2]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_5/0_6/\pm 45/0_4/\pm 45_3]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_3/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45_3/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_4]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45]_S$	132245

**Tablo 6.19(devam):**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Grafit/epoksi malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45_2]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_5/0_4/\pm 45_3/0_4]_S$	132245
$[\pm 45_2/0_8/\pm 45_3/0_4/\pm 45_4/0_2]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_6/\pm 45]_S$	132245
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_4/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45]_S$	132245
$[0_4/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45]_S$	132245
$[\pm 45/0_6/\pm 45_3/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_3/0_4]_S$	132245
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2]_S$	132245
$[\pm 45_2/0_6/\pm 45_2/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45_3]_S$	132245

Tablo 6.19’de 57 tane farklı konfigürasyon bulunmuştur.  $[\pm 45/0_6/\pm 45_5/0_8/\pm 45_3]_S$  için en kolay imalatı yapılabilecek konfigürasyon denilebilir.

Tablo 6.20’de, LC1 ve  $0_2, \pm 45, 90_2$  açıları kullanılarak Nelder-Mead Algoritması ile yapılan optimizasyon sonucu elde edilen veriler diğer literatür çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Tablo 6.20’de, Soykasap (2009) çalışmasında GA kullanarak dokuz tane, GPSA kullanarak dört tane, Erdal ve Sönmez (2005) çalışmasında DSA kullanarak; yedi tane, Soremekun ve diğ (2001) çalışmasında GES kullanarak; beş tane, Rao ve Arvind (2006) çalışmasında SS kullanarak; üç tane farklı konfigürasyon bulmuştur. Bu tez çalışmasında ise Nelder-Mead Algoritması ile daha yüksek bir kritik burkulma yük indeksi bulunmuş olup, elde edilen konfigürasyon sayısı ise yirmi dördttür. Ayrıca bu çalışmada, aynı yükleme ve  $a/b$  oranlarında, DE ve SA ile de optimizasyon yapılmış ve aynı kritik burkulma yük indeks değerinde (695822) DE ile on dokuz tane, SA ile altı tane farklı açı

konfigürasyonu bulunmuştur. Ayrıca literatür çalışmasındaki kritik burkulma yük indeksine ait, GA ile Soykasap (2009) çalışmasında bulduğu dokuz tane konfigürasyonlarda elde edilebilmiştir.

Kritik burkulma yük indeksi boyutsuz bir büyüklüktür. Aynı malzeme özellikleri ve aynı açı konfigürasyonu için birim sisteminden bağımsız olarak, burkulma yüklerinin aynı olması beklenir. Metrik sistemde,  $N_{xcb}=N_{ycb}= \lambda cb \times N_x=695822 \times (1N/m) = 695822N/m.=695.822N/mm$ . Amerikan sisteminde ise  $N_{xcb}=N_{ycb}= \lambda cb N_x=\lambda cb \times (1lbf/in)= \lambda cb lbf/in$ . Bulunan sonuçta birim dönüşümü yapıldığında aynı metrik sonucun bulunması gerekir. Kritik burkulma yük indeksi kıyaslandığında metrik sistemde Soykasap (2009), Erdal ve Sönmez (2005), Soremekun ve diğ (2001) aynı sonucu (695,781.3) bulmuşlardır. Rao ve Arvind (2006) aynı malzeme ve aynı konfigürasyon için farklı kritik burkulma yük indeksi bulması ilginçtir. Bu çalışmada bazı yük ve  $a/b$  oranlarında daha iyi kritik burkulma yük indeks değerleri bulunmuştur.

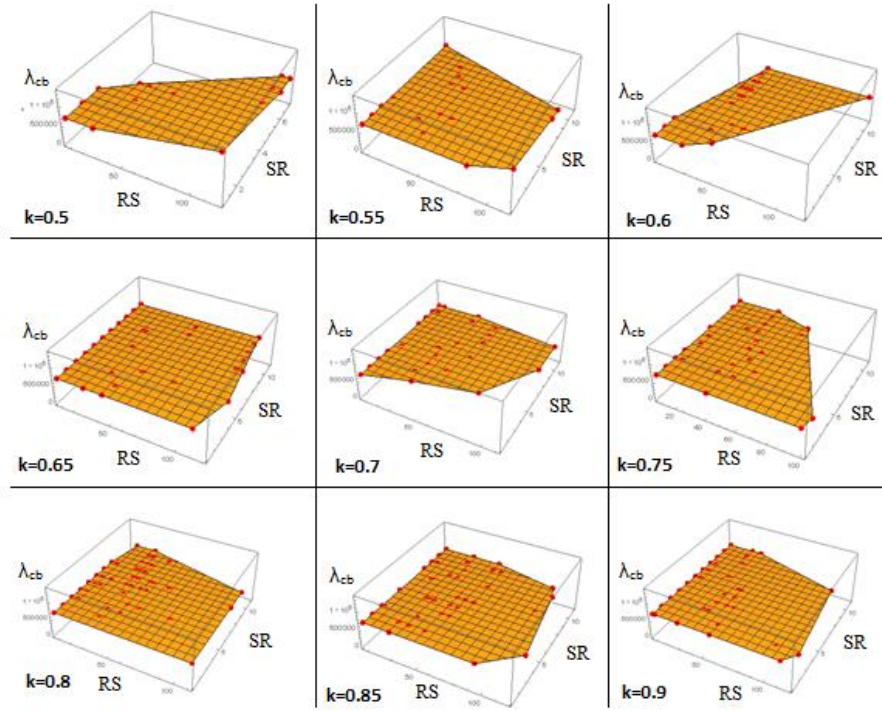
Kullanılan algoritmaların ne kadar iyi ve güvenilir olduğu, bulabildiği farklı konfigürasyon sayıları ile ölçülebilir. Tablo 6.21’de Deveci (2016) çalışması, Soykasap (2009) çalışması ve bu çalışmanın karşılaştırılması yapılmış, kritik burkulma yük indeksleri ve konfigürasyon sayıları verilmiştir. Görülmektedir ki; Deveci (2016) çalışmasında GA ve HA (hibrid algoritma) kullanarak, Karakaya ve Soykasap (2009) çalışmasında ise GA ve GPSA kullanarak, LC4 yükleme durumunda sırasıyla Deveci 41 ve 44 farklı konfigürasyon, Karakaya ve Soykasap, 16 ve 4 farklı konfigürasyon bulmuş, mevcut çalışmada ise 53 farklı konfigürasyon bulunmuştur. LC6 ve LC7 durumlarında bütün çalışmalarda sadece birer tane, LC9 durumunda ise Deveci (2016) 36 ve 42 konfigürasyon, Karakaya ve Soykasap (2009) çalışmasında 18 ve 6 konfigürasyon bulmuş, bu tez çalışmasında ise Nelder-Mead algoritması ile 57 tane farklı konfigürasyon bulunmuştur. Ayrıca LC1 ve LC3 durumlarında, Deveci (2016) çalışmasında sonuç bulamazken, Karakaya ve Soykasap (2009) çalışmasında LC1 için 9 ve 4 tane farklı konfigürasyon, LC3 için 9 ve 5 tane farklı konfigürasyon, mevcut çalışmada ise LC1 için 24 LC3 için 18 tane farklı konfigürasyon bulunmuştur. Buradan bugüne kadar çok tercih edilmeyen Nelder-Mead Algoritması doğru çalıştırma seçenekleri kullanıldığında, GA, HA ya da GPSA gibi güvenilirliğini ispatlamış metodlardan daha iyi sonuçlar verebileceği sonucu çıkarılabilir.



**Tablo 6. 20:** LC1 ve  $0_2, \pm 45, 90_2$  kullanılarak elde edilen global optimumların literatür çalışmalarıyla karşılaştırılması.

Lif Açılı Dizilimi	NM Mevcut çalışma	DE Mevcut çalışma	SA Mevcut çalışma	GA Soykasap 2009	GP Soykasap 2009	GES Soremekun ve ark. 2001	SS Rao ve Arvind 2005	DSA Erdal ve Sönmez 2005
$[90_{10}/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	695,781.3	695,781.3	-	695,781.3
$[90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45_7/90_2/\pm 45]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	-	-	-	695,781.3
$[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{14}]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	-	-	-	-
$[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_6]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	-	-	-	695,781.3
$[90_4/\pm 45_2/90_{16}/\pm 45/90_6]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	695,781.3	695,781.3	596,501.1	695,781.3
$[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_{10}]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	695,781.3	695,781.3	596,501.1	695,781.3
$[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_8/\pm 45/90_8]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	-	695,781.3	596,501.1	695,781.3
$[\pm 45/90_8/\pm 45/90_{18}/\pm 45]_s$	695,781.3	-	-	695,781.3	695,781.3	695,781.3	-	695,781.3
$[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_{10}/\pm 45_3/90_2]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[\pm 45/90_{14}/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45]_s$	695822	-	-	695781.3	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45_2/90_{10}/\pm 45_3/90_6]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{16}/\pm 45_3]_s$	695822	-	-	-	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45]_s$	695822	695822	695822	-	-	-	-	-
$[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{12}/\pm 45]_s$	695822	695822	695822	-	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_{12}/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_6]_s$	695822	695822	695822	-	-	-	-	-
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90]_s$	695822	-	-	-	-	-	-	-
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_2]_s$	695822	695822	695822	-	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_4]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45]_s$	695822	-	-	-	-	-	-	-
$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4]_s$	695822	695822	695822	-	-	-	-	-
$[90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{10}/\pm 45_2]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45_2/90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_4]_s$	695822	695822	695822	-	-	-	-	-
$[90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_6]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[90_8/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_s$	695822	695822	-	-	-	-	-	-
$[\pm 45/90_{12}/\pm 45/90_6/\pm 45_3/90_4]_s$	695822	-	-	-	-	-	-	-

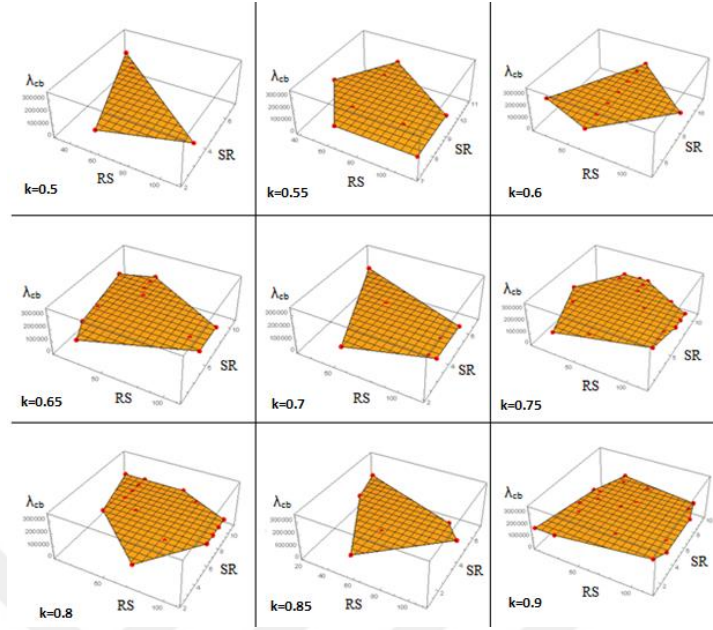
Şekil 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5’de LC1, LC3 ,LC4 ve LC9 yüklem durumunda yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen global optimumların ( $\lambda_{cb} = 695822$ , 173956, 1057960, 132245) hangi NM parametrelerinde ulaşıldığı (i) ShrinkRatio 0.5 ve 1 arasında; (ii) k ("ContractRatio") 0.5 ve 1 arasında; (iii) RandomSeed 1 ve 120 arasında ; (iv) ReflectRatio =2 durumu için değerlendirilmiştir. Şekildeki kırmızı (koyu renkli) küreler ilgili uygun parametreleri ifade etmektedir.



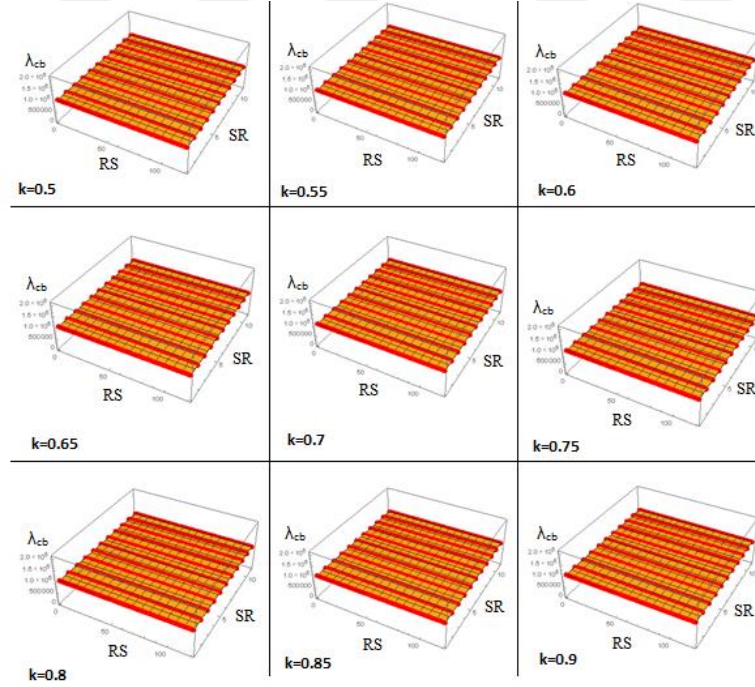
**Şekil 6.2:**  $N_x/N_y = 1$  ve  $a/b = 2$  yüklem durumu için seçilen NM parametreleri -  $\lambda_{cb}$  durum grafiği. (k=ContactRatio, RS=RandomSeed, SR=ShrinkRatio,  $\lambda_{cb}$ =Kritik Burkulma indeksi)

**Tablo 6.21:** Önceki çalışmalarda GA, HA, GPSA ile elde edilen  $\lambda_{cb}$  ve konfigürasyon sonuçlarının NM sonuçlarıyla karşılaştırılması

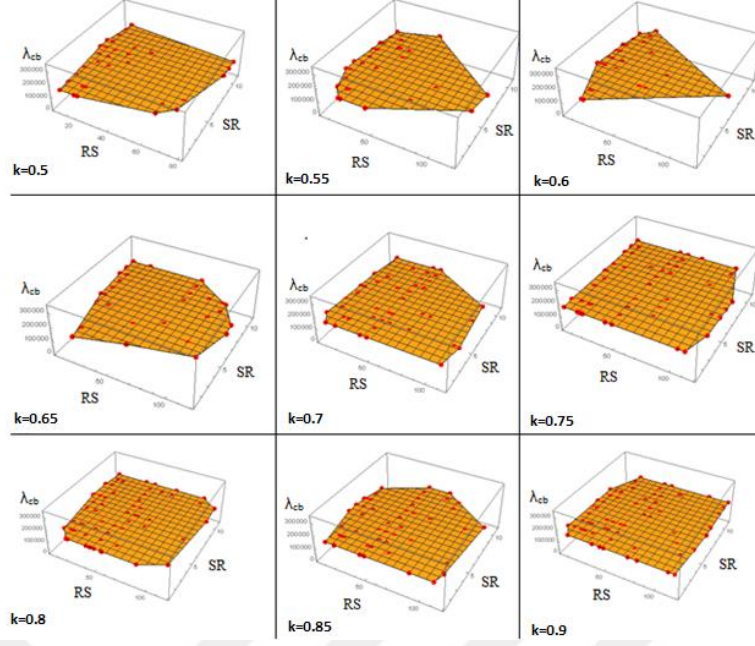
Load	NM	$\lambda_{cb}$	NM		GA	HA	$\lambda_{cb}$	GA	GPSA
			Mevcut	Mevcut	Deveci	Deveci		Karakaya-Soykasap	Karakaya-Soykasap
Case	Lif dizilim örneği	Mevcut çalışma	(konfigürasyon sayısı)	(Deveci (2016))	(konfigürasyon sayısı)	(konfigürasyon sayısı)	(Karakaya-Soykasap (2009))	(konfigürasyon sayısı)	(konfigürasyon sayısı)
LC1	$[90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4]_S$	695822	24	-	-	-	695,781.3	9	4
LC2	$[\pm 45_{16}]_S$	242844	1	-	-	-	242823.1	1	1
LC3	$[0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_6]_S$	173956	18	-	-	-	173945.3	9	5
LC4	$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_4/\pm 45]_S$	1057960	53	1057948.3	41	44	1057948.3	16	4
LC5	$[\pm 45_{16}]_S$	323792	1	-	-	-	323764.0	1	1
LC6	$[0_{16}/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_S$	206518	1	206492.9	1	1	206492.9	1	1
LC7	$[90_{16}/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2]_S$	413036	1	412985.8	1	1	412985.8	1	-
LC8	$[\pm 45_{16}]_S$	161896	1	-	-	-	161882.1	1	1
LC9	$[\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45]_S$	132245	57	132243.5	36	42	132243.5	18	6



**Şekil 6.3:**  $N_x/N_y = 1$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme durumu için seçilen parametreler -  $\lambda_{cb}$  durum grafiği. (k=ContactRatio, RS=RandomSeed, SR=ShrinkRatio,  $\lambda_{cb}$ = Kritik burkulma indeksi)



**Şekil 6.4**  $N_x/N_y = 2$  ve  $a/b = 2$  durumu için seçilen NM parametreleri -  $\lambda_{cb}$  durum grafiği. (k=ContactRatio, RS=RandomSeed, SR=ShrinkRatio,  $\lambda_{cb}$ =Kritik burkulma indeksi)



**Şekil 6.5:**  $N_x/N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme durumu için seçilen NM parametreleri -  $\lambda_{cb}$  durum grafiği. (k=ContactRatio, RS=RandomSeed, SR=ShrinkRatio,  $\lambda_{cb}$ =kritik burkulma indeksi)

#### 6.4. Grafit/Epoksi Malzeme İçin Kırılma Hasar Analizi

Kırılma teorilerinde hasar faktörü ( $f_E$ )  $< 1$  ise tabaka uygulanan yüke karşı güvende demektir. Uygulanabilecek maksimum yük = ( $f_E$ )  $\times$  uygulanan yük, formülüyle bulunabilir. ( $f_E$ ) = 1 durumundaki uygulanabilir yük hasar yüküdür ve bu değer altında bir değerde yük uygulanmalıdır. ( $f_E$ )  $> 1$  ise tabaka bu yük altında güvensiz demektir.

Tablo 6.22’de Grafit/epoksi için, LC1 – LC9 arasındaki yükleme durumlarında, Maksimum gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem hasar kriterleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen, uygulanabilecek maksimum yüklemeler görülmektedir. Bu yüklemelerin üzerine çıkıldığında malzeme kırılacaktır.

LC1 ve LC3 durumlarında, önerilen tasarım için  $a/b$  oranları farklı olmasına rağmen, 1010 N/mm uygulanabilecek maksimum yük miktarıdır. Bu yük altında malzemede kırılma oluşmayacaktır fakat malzemenin kritik burkulma yükü LC1 durumunda 695.822 N/mm’dir. Yani tabakada kırılma oluşmazken, burkulma hasarı gerçekleşecektir. LC2 tasarımı ise 2450 N/mm ile kırılmaya karşı en dayanıklı tasarım olmasına rağmen, 242.844 N/mm ile kritik burkulma yükü düşük bir tasarımdır. Diğer yükleme durumlarında da, belirtilen uygulanabilir kırılma hasar yük değerlerinde,

tabakada kırılma oluşmazken, burkulma hasarı gerçekleşecektir. Grafit/epoksi malzemenin kırılma performansı burkulma performansından yüksektir ve malzemenin bu özelliğine göre kullanım alanı seçilmelidir.



**Tablo 6.22:** Grafit/Epoksi malzemenin (Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem kullanılarak) kırılma hasar analizi

$$N_{y,cr} = \lambda_{cb} N_y \text{ (N/mm)}, N_{x,cr} = \lambda_{cb} N_x \text{ (N/mm)}$$

Yükleme durumu	Uygulanabilir kırılma hasar yükü (N/mm)	Lif açılı dizilimi	Kritik Burkulma yükü (N/mm)	Kırılma Hasar faktörü			
				HSH (F)	HSH (M)	TW	MST
LC1	Nx = 1010 Ny = 1010	[±45/90 <sub>10</sub> /±45/90 <sub>10</sub> /±45 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =695.882 Ny =695.822	0.184632	0.995632	0.987989	0.997814
LC2	Nx = 2450 Ny = 2450	[±45 <sub>16</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =242.844 Ny =242.844	0.259069	0.96191	0.991192	0.98077
LC3	Nx = 1010 Ny = 1010	[0 <sub>6</sub> /±45/0 <sub>2</sub> /±45/0 <sub>6</sub> /±45 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /±45/0 <sub>6</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =173.956 Ny =173.956	0.184632	0.995632	0.987989	0.997814
LC4	Nx= 1290 Ny= 645	[±45 <sub>2</sub> /90 <sub>6</sub> /±45/90 <sub>2</sub> /±45 <sub>2</sub> /90 <sub>6</sub> /±45 <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =1057.960 Ny =528.98	0.164417	0.994404	0.998629	0.997198
LC5	Nx =2190 Ny =1095	[±45 <sub>16</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =323.792 Ny =161.896	0.173682	0.843877	0.998393	0.657516
LC6	Nx=1710 Ny=855	[0 <sub>16</sub> /±45/0 <sub>6</sub> /±45/0 <sub>2</sub> /±45/0 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =206.518 Ny =103.259	0.204094	0.990279	0.980505	0.995127
LC7	Nx=855 Ny=1710	[90 <sub>16</sub> /±45/90 <sub>6</sub> /±45/90 <sub>2</sub> /±45/90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =413.036 Ny =826.072	0.204094	0.990279	0.980505	0.995127
LC8	Nx=1090 Ny=2180	[±45 <sub>16</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =161.896 Ny =323.792	0.172889	0.836188	0.991246	0.654514
LC9	Nx=645 Ny=1290	[±45/0 <sub>6</sub> /±45 <sub>5</sub> /0 <sub>8</sub> /±45 <sub>3</sub> ] <sub>s</sub>	Nx =132.245 Ny =264.49	0.164417	0.994404	0.998629	0.997198

## 6.5 Keten / Polipropilen Tabakalı Kompozitlerde Optimum Lif Açık Dizilimlerinin Nelder-Mead Algoritması Kullanılarak Bulunması

Bu tez kapsamında kullanılan biyokompozit malzeme (Keten / Polipropilen tabakalı kompozit), eşzamanlı olarak Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği bölümünde yapılan doktora tezi deneysel çalışma sonuçlarına dayanarak algoritma girdisi oluşturulmuştur (Karaca, 2017).

### 6.5.1 Keten/Polipropilen Prepreg Üretimi

Bu çalışmada kullanılan biyokompozit malzemenin üretimi için önce, takviye malzemesi keten lifleri, matris malzemesi ise polipropilen (PP) filament olan karışım iplikler üretilmiştir. İplik üretimi Gürteks İplik Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından yapılmıştır. Üretilen malzemede ağırlıkça %50 oranında keten lifi kullanılmıştır. İplikler tasarlanırken keten şeritler iplik haline getirilmiş ve polipropilen iplik ile büküm verilerek beraber katlanmıştır.



Şekil 6.6: Keten / polipropilen lif (Karaca, 2017).

Sonra keten/ polipropilen karışımı iplikler tek doğrultuda yönlendirilerek, keten/ polipropilen tek yönlü prepregler üretilmiştir. Üretimde önce iplikler, tek doğrultuda ve belirli genişlikte sac levha üzerine sarılmış sonrada bu levhalara sıcak baskılama yapılmıştır. Baskılama işleminde karışım iplik içerisindeki filament polipropilen eriyerek keten lifleri kaplamış ve matris malzemeyi oluşturmuştur. Böylece 0.25 – 0.3 mm kalınlıkta keten/ polipropilen tek yönlü prepreg malzeme elde edilmiştir.



**Tablo 6. 23:** Keten/polipropilen malzeme özellikleri (Karaca,2017).

Malzeme	Keten/polipropilen
Elastik Modül	$E_1= 10.5$ GPa
Elastik Modül	$E_2=0.53$ GPa,
Kayma modülü	$G_{12}= 0.4$ GPa,
Poisson oranı	$\nu_{12}= 0.42$
Tabaka kalınlığı	$t=0.25$ mm

**Tablo 6. 24:** Keten/polipropilen malzeme maksimum dayanım değerleri (Karaca, 2017)

Dayanım Değerleri	
$\sigma_{1ult}^T$	101 MPa
$\sigma_{1ult}^C$	3.5 MPa
$\sigma_{2ult}^T$	26 MPa
$\sigma_{2ult}^C$	8 MPa
$\tau_{12ult}$	8.1 MPa

Grafit/epoksi ile yapılan çalışmanın aynısı Keten /Polipropilen malzeme ile yapılmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 6.22-6.24 arasında verilmiştir. Yine en büyük burkulma yükünün  $a/b = 2$  durumunda kullanılabileceği görülmüştür.

### 6.5.2 Keten /Polipropilen Malzemenin Optimizasyonu

Bu tezin amaçlarından biri de farklı yüklemelerde ve farklı geometrilere, burkulmaya ve kırılmaya karşı dirençli, en iyi Keten/polipropilen tabakalı biyokompozit yapı tasarımını elde etmektir. Üzerinde çalışılan malzeme,  $a$  ve  $b$  boyutlarında dikdörtgen geometriye sahip, dört yanından basit mesnetli ve birim uzunluk başına  $N_x$  ve  $N_y$  düzlem içi yüklere maruz bırakılmıştır. Malzeme 64 tabakalı Keten/polipropilen biyokompozittir. Optimizasyon algoritması olarak yine, Nelder-Mead Algoritması ve Grafit/epoksi malzemede kullanılan optimizasyon seçenekleri kullanılmıştır.

Keten/polipropilen malzemenin optimizasyon sonucunda elde edilen çok sayıdaki lif açılı diziliminden, farklı olanlar belirlenip Tablo 6.26 ile Tablo 6.34

arasında listelenmiştir. Tablo 6.25'te görüldüğü gibi, en büyük kritik burkulma yük indeksi  $N_x/N_y = 2$  ve  $a/b=2$  durumları için 630968 olarak bulunmuştur. Yani burkulmaya karşı en güvenli tasarımlar bu yük ve  $a/b$  oranlarında yapılabilir. Burkulmaya karşı en güvensiz durum ise  $N_x/N_y=1$  ve  $a/b=2$  oranlarıdır, Keten/polipropilen malzemelerde bu tip tasarımlardan kaçınılmalıdır.

**Tablo 6. 25:** Keten/polipropilen malzeme için,  $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$  yönelimlerinde, farklı yükleme ve  $a/b$  oranlarında Nelder-Mead Algoritması kullanılarak bulunan kritik burkulma yük indeksleri ve açı örnekleri.

$N_x/N_y$	$a/b$	$\lambda_{cb}$	Lif Açılı Dizilim Örneği
1	1	144811	$[\pm 45_{16}]_S$
	2	54560	$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_2]_S$
	1/2	104045	$[0_4/\pm 45/0_8/\pm 45_9]_S$
2	1	193084	$[\pm 45_{16}]_S$
	2	630968	$[\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_S$
	1/2	123806	$[90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4/\pm 45]_S$
1/2	1	96542	$[\pm 45_{16}]_S$
	2	247612	$[90_{12}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_8]_S$
	1/2	78871	$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_8]_S$

**Tablo 6.26:**  $N_x/N_y = 1$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[90_4/\pm 45/90_8/\pm 45_9]_S$	54560
$[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_{18}/\pm 45]_S$	54560
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_2]_S$	54560
$[90_2/\pm 45_2/90_{16}/\pm 45_2/90_6]_S$	54560
$[90_2/\pm 45_2/90_{14}/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2]_S$	54560
$[90_4/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_{12}]_S$	54560
$[\pm 45/90_2/\pm 45/90_{22}/\pm 45_2]_S$	54560

Tablo 6.26'da  $N_x/N_y=1$  ve  $a/b=2$  durumu için 7 farklı konfigürasyon bulunmuştur fakat burkulmaya karşı en güvensiz durum  $N_x/N_y=1$  ve  $a/b=2$  oranlarıdır. Kullanılmaması önerilir.

**Tablo 6. 27:**  $N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 1$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[\pm 45_{16}]_S$	144811

**Tablo 6.28:**  $N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[\pm 45/0_8/\pm 45/0_2/\pm 45/90_{12}/\pm 45/0_2]_S$	104045
$[0_4/\pm 45/0_8/\pm 45_9]_S$	104045
$[\pm 45/0_2/\pm 45/0_{22}/\pm 45_2]_S$	104045

$N_x / N_y = 1$  ve  $a/b = 1$ ,  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 1$ ,  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1$  oranlarına ait optimizasyonlarda, sadece birer tane lif açılı dizilimi ( $[\pm 45_{16}]_S$ ) bulunabilmiştir. Bunun sebebinin ise kare geometri olduğu düşünülmektedir.  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 2$  oranları için 5 farklı tasarım bulunmuştur ve bu oranlarda elde edilen tasarımlar, Keten/polipropilen için en güvenli kullanılacak tasarımlardır. İmalatı en kolay ve güvenli tasarım olarak  $[\pm 45_3/90_6/\pm 45/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45]_S$  önerilebilir.

$N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1/2$  oranlarında ise en fazla (on tane) lif konfigürasyonu elde edilmesine karşı güvenilirliği düşüktür.

**Tablo 6.29:**  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_7]_S$	630,968
$[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45_2/90_8/\pm 45/90_6]_S$	630,968
$[\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_S$	630,968
$[\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{12}]_S$	630,968
$[\pm 45_3/90_6/\pm 45/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45]_S$	630,968

**Tablo 6.30 :**  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 1$  yükleme koşullarında Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[\pm 45_{16}]_S$	193084

**Tablo6.31:**  $N_x / N_y = 2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[90_{12}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_8]_S$	123806
$[90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{12}/\pm 45]_S$	123806

**Tablo6.32:**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda cb$ )
$[90_{12}/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_8]_S$	247612
$[90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_{12}/\pm 45]_S$	247612

**Tablo 6.33:**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[\pm 45_{16}]_s$	96542

**Tablo 6. 34:**  $N_x / N_y = 1/2$  ve  $a/b = 1/2$  yükleme koşullarında, Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, Keten/polipropilen malzeme için bulunan optimum tasarımlar

Lif Açılı Dizilimi	Kritik Burkulma Yük İndeksi ( $\lambda_{cb}$ )
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_8]_s$	78871
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45_7]_s$	78871
$[\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_8/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45]_s$	78871
$[\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_6]_s$	78871
$[\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_6]_s$	78871
$[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_6]_s$	78871
$[\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_3/0_8/\pm 45/0_4]_s$	78871
$[\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_{10}/\pm 45/0_2/\pm 45/0_6]_s$	78871
$[\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_2]_s$	78871
$[\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_8/\pm 45/0_6]_s$	78871

### 6.5.3. Keten/Polipropilen Malzeme İçin Kırılma Hasar Analizi

Keten/polipropilen biyokompozit tabakalar için de Tablo 6.35'te görüldüğü gibi çalışılan yükleme durumlarının bazılarında, malzemenin burkulmaya karşı güvenli olabileceği fakat kırılmaya karşı güvensiz olabileceği yükler bulunmuştur. LC3, LC4, LC6, LC7 ve LC9 oranlarında Keten/polipropilen malzemenin, burkulma hasarından önce kırılma hasarına uğrayacağı görülmüştür. Keten/polipropilen malzeme için, burkulma performansı kırılma performansından yüksek bir malzemedir diyebiliriz. Tablo 6.35'te gri renkte gösterilen yükler, hasar yükleridir. Bu değerlerin altında yükleme yapılmalıdır. Diğer durumlarda elde edilen yükler ise uygulanabilecek maksimum yüklerdir.

**Tablo 6.35:** Keten /Polipropilen malzemenin (Maksimum Gerilme, Tsai-Wu ve Hashin-Rotem kullanılarak) kırılma hasar analizi.

Yükleme durumu	Uygulanabilir kırılma hasar yükü (N/mm)	Lif açılı dizilimi	Kritik Burkulma yükü(N/mm)	Kırılma Hasar faktörü			
				HSH (f)	HSH (M)	TW	MST
LC1	Nx= 246 Ny= 246	[90 <sub>4</sub> /±45/90 <sub>8</sub> /±45 <sub>9</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 54.560 Ny=54.560	0.37709 HSH (f)	0.997805 HSH (M)	0.724973 TW	0.998902 MST
LC2	Nx= 425 Ny= 425	[±45 <sub>16</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 144.811 Ny=144.811	0.491493 HSH (f)	0.990991 HSH (M)	0.448276 TW	0.995485 MST
LC3	Nx= 56 Ny= 56	[0 <sub>4</sub> /±45/0 <sub>8</sub> /±45 <sub>9</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 104.045 Ny=104.045	0.0346535 HSH (f)	1. HSH (M)	0.900038 TW	1. MST
LC4	Nx= 210 Ny= 105	[90 <sub>2</sub> /±45/90 <sub>2</sub> /±45/90 <sub>2</sub> /±45 <sub>3</sub> /90 <sub>2</sub> /±45 <sub>7</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 630.968 Ny=315.484	0.298327 HSH (f)	0.658659 HSH (M)	0.997507 TW	0.811578 MST
LC5	Nx= 380 Ny= 190	[±45 <sub>16</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 193.084 Ny=96.542	0.329589 HSH (f)	0.982963 HSH (M)	0.54942 TW	0.733025 MST
LC6	Nx=56 Ny=28	[90 <sub>10</sub> /±45/90 <sub>4</sub> /±45/90 <sub>4</sub> /±45] <sub>s</sub>	Nx= 123.806 Ny= 61.903	0.0173267 HSH (f)	1. HSH (M)	0.948853 TW	1. MST
LC7	Nx=115 Ny=230	[90 <sub>12</sub> /±45/90 <sub>2</sub> /±45/90 <sub>4</sub> /±45/90 <sub>8</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 247.612 Ny=495.224	0.388885 HSH (f)	1.01933 HSH (M)	0.683382 TW	1.00962 MST
LC8	Nx=191 Ny=382	[±45 <sub>16</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 96.542 Ny=139.084	0.331324 HSH (f)	0.993337 HSH (M)	0.558262 TW	0.736883 MST
LC9	Nx=56 Ny=112	[0 <sub>2</sub> /±45 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /±45 <sub>2</sub> /0 <sub>4</sub> /±45 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /±45/0 <sub>8</sub> ] <sub>s</sub>	Nx= 78.871 Ny=157.742	0.0693069 HSH (f)	1. HSH (M)	0.809406 TW	1. MST

$$N_{ycr} = \lambda_{cb} N_y (N/mm)$$

$$N_{xcr} = \lambda_{cb} N_x (N/mm)$$

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatürde burkulma optimizasyonlarında, GA, HA, SA, GPSA gibi daha bilindik yöntemler tercih edilirken Nelder-Mead Algoritması bu konuda kullanılmamıştır. Yapılan çalışmada Nelder-Mead Algoritması kullanılarak, burkulmaya maruz bırakılmış simetrik ve balans kompozit ve biyokompozit malzemenin optimum tasarımı yapılmıştır. Çalışmada tabaka kalınlığı sabit tutulmuş (64 tabaka), farklı (1, 2, ve 1/2) yük oranları, farklı  $a/b$  oranları ve tabaka açısı olarak  $0_2$ ,  $\pm 45$ ,  $90_2$  kullanılmış ve Nelder-Mead Algoritması ile optimizasyon işlemi yapılmıştır.

Öncelikle optimizasyon algoritmasının güvenilirliğini göstermek için kritik burkulma yük faktörü ve Tsai-Wu, Maksimum Gerilme ve Hashin-Rotem hasar kriterleriyle ilgili daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları kullanılarak doğrulama yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda aynı optimum burkulma yük indeksini veren farklı konfigürasyonlar bulunmuştur. Bunların arasından imalatı en kolay olacak tasarım seçilebilir.

Çalışmanın sonuçları, literatür çalışmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve Nelder-Mead Algoritmasının uygun parametre seçenekleri kullanıldığında, farklı global optimum bulmada GA, GPSA gibi görece daha popüler ve modern metotlardan etkili olabildiği görülmüştür.

Burkulmaya karşı en güvenli durumun her iki malzeme için de LC4 ( $N_x/N_y = 2$  ve  $a/b = 2$ ) şartlarında olduğu söylenebilirken, buna karşın en güvensiz durum için bir genelleme yapılamamıştır.

Grafit /epoksi malzemenin kırılma performansı açısından dayanıklı, burkulma performansı açısından zayıf malzemeler olduğu, Keten/polipropilen malzemenin ise, burkulma performansına göre dayanıklı fakat kırılma performansı açısından zayıf malzemeler olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, M., & Sonmez, F. O.** (2011). Design optimization of laminated composites using a new variant of simulated annealing. *Computers and Structures*. 89(17-18), 1712-1724.
- Akça, İ.** (2005). *Elektrik Verilerinin Lamarckian Genetik Algoritma ile Ters-Çözümü*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Altunkaynak B., & Esin A.** (2004). Doğrusal olmayan regrasyonda parametre tahmini için genetik algoritma yöntemi, *G. Ü.-Fen Bil. Derg.* 17(2), 43-51.
- Aran, A.** (1990). Elyaf takviyeli karma malzemeler. İTÜ Rektörlük Ofset Atölyesi, Sayfa:95, İstanbul.
- Ashori, A.** (2008). Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technology*, 99, 4661-4667.
- Avérous, L., & Le Digabel, F.** (2006). Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers, *Carbohydrate Polymers*, 66(4), 480-493.
- Aydın, L.** (2011). *Design of dimensionally-stable laminated composites subjected to hygro-thermo-mechanical loading by stochastic optimization methods*, Doctor of philosophy in mechanical engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir.
- Aydoğdu, M.** (2003). *Katmanlı kompozit dikdörtgen plakların burkulma ve titreşim analizi*, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Aymerich, F., & Serra, M.** (2008). Optimization of laminate stacking sequence for maximum buckling load using the ant colony optimization (ACO) metaheuristic, *Composites: Part A*. 39, 262-272.
- Barati, R.** (2011). Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models Using Nelder-Mead Simplex Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(NOVEMBER), 1-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE)
- Daniel, Isaac M., & Ishai, Ori.** (1994). *Engineering mechanics of composite materials*, Oxford University Press.
- Deveci, A.** (2011). Optimum design of anti-buckling behaviour of the laminated composites considering puck failure criterion by genetic algorithm, Izmir Institute of Technology,
- Doğan, A.** (2009). *Tabakalı kompozit plakların ve silindirik sığ kabukların serbest titreşim analizi*, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, İnşaat mühendisliği anabilim dalı, Adana.



- Elmas, Ç.** (2007 ). *Yapay Zeka Uygulamaları*, Şeçkin, Ankara.
- Erdal, O., & Sonmez, F. O.** (2005). Optimum design of composite laminates for maximum buckling load capacity using simulated annealing. *Composite Structures*. 71, 45-52.
- Ersoy, H.Y.** (2001). *Kompozit malzeme*, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye, 227.
- Gassan, J., & Bledzki, A.K.** (2001). Thermal degradation of flax and jute fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 82(6), 1417-1422.
- Ghiasi, H., Fayazbakhsh, K., Pasini, D., & Lessard L.** (2010). Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design, *Composite Structures* Vol.93, 1-13.
- Gurdal, Z., Haftka, R. T., & Hajela, P.** (1999). *Design and Optimization of Laminated Composite Materials*, John Wiley & Sons, Inc.
- Haftka, R. T., & Le Riche, R.** (1993). Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm. *AIAA J.* 31(5), 951-956.
- Hill, K., Swiecki, B., & Cregger, J.** (2012). The bio-based materials automotive value chain, Center for Automotive Research ,Washington, DC 20585.
- Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., & Arora, S.** (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites, *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 371-376.
- John, M.J., & Thomas, S.** (2008). Biofibres and biocomposites, *Carbohydrate Polymers* 7 ,343–364
- Karaboğa, D.** (2004). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Atlas Yayıncılık, İstanbul.
- Karaca Uğural, B.** (2017). *Yönelmiş formda keten elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu*, Doktora tez, Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği, İzmir
- Karakaya, Ş.** (2007). *Tabakalı kompozit plakların gelişmiş global optimizasyon teknikleriyle yapısal optimizasyonu*, Yüksek Lisans tez, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Makine Mühendisliği, Afyon.
- Karakaya, Ş., & Soykasap, Ö.** (2009). Buckling optimization of laminated composite plates using genetic algorithm and generalized pattern search algorithm. *Struct Multidisc Optim.* 39: p. 477-486.
- Khan, L.A., & Mehmood, A.H.** (2016). 5 - cost-effective composites manufacturing processes for automotive applications a2 - njuguna, j. in: *Lightweight composite structures in transport*, Woodhead Publishing, 93-119.
- Kaw, Autar K.** (2006). *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis Group, LLC.

- Kılıç, H. (2014).** *Belirli sıcaklık ve sürelerde kürlenmiş hibrid tabakalı kompozit plakaların titreşim davranışının araştırılması*, Yüksek Lisans tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır
- Kim, C. W., & Lee, J. S. (2005),** Optimal design of laminated composite plates for maximum buckling load using genetic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 219, 869-878.
- Koronis, G., Silva, A., & Fontul, M. (2013).** Green composites: A review of adequate materials for automotive applications, *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 120-127.
- Le Riche, R., & Haftka, R. T. (1995).** Improved genetic algorithm for minimum thickness composite laminate design, *Composites Engineering.* 5(2), 143-161.
- Lewin, M. (2006).** *Handbook of Fiber Chemistry*, CRC Press, USA.
- Liu, B., Haftka, R. T., Akgün, M. A., & Todoroki, A. (2000).** Permutation genetic algorithm for stacking sequence design of composite laminates. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 186, 357-372.
- Lopez, A.-Moliner, R. Sanz, D. Sipiara, J., & Castillo, R. (2003).** Proposal and evaluation of new variations to the modified simplex method, *Analytical Letters*, 36:10 2337–2353.
- Lopez, R. H., Luersen, M. A., & Cursi, E. S. (2009).** Optimization of laminated composites considering different failure criteria. *Composites: Part B.* 40, 731-740.
- Lucintel. (2011).** *Opportunities in natural fiber composites*, LasColinas, USA, [PowerPoint slides]. Retrieved from <http://www.lucintel.com/lucintelbrief/potentialofnaturalfibercomposites-final.pdf>
- Luersen, M. A., & Le Riche, R. (2004).** Globalized Nelder–Mead method for engineering optimization, *Computers and Structures.* 82, 2251–2260.
- Mallick, P.K. (2007).** *Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing, and design*, Taylor & Francis Group, LLC.
- Manne, P.M., & Tsai, S.W. (1998).** Design optimization of composite plates: Part II – structural optimization by plydrop tapering, *J. Compos. Mater.* 1998;32(6), 572–98.
- Material Thoughts. (2002).** Fiber reinforced plastics use, *Plastics News*, August.
- Mison, M.I., Islam, M.M., Epaarachchi, J.A., & Lau, K. (2014).** Potentiality of utilising natural textile materials for engineering composites applications, *Materials & Design*, 59(0), 359-368.

- Mohanty, A. K., Drzal, L. T., & Misra, M.** (2002). Engineered natural fiber reinforced polypropylene composites: Influence of surface modifications and novel powder impregnation processing. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 16, 999–1015.
- Morgan, S. L.** (1975). *Simplex optimization and experimental design in the development of analytical chemical methods*, Doktora tezi, Emory University.
- Müssig, J., Karus, M., & Franck, R.R.** (2005). 10 - bast and leaf fibre composite materials. in: *Bast and other plant fibres*, Woodhead Publishing, 345-376.
- Naik, G. N., Gopalakrishnan, S., & Ganguli, R.** (2008). Design optimization of composites using genetic algorithms and failure mechanism based failure criterion. *Composite Structures*. 83, 354–367.
- Njuguna, J., Wambua, P., Pielichowski, K., & Kayvantash, K.** (2011). Natural fibre-reinforced polymer composites and nanocomposites for automotive applications. S. Kalia et al. (eds), *Cellulose fibers: Bio-and nano-polymer composites*, Springer, New York, 661-700.
- Pradeep, S.A., Iyer, R.K., Kazan, H., & Pilla, S.** (2017). 30 - Automotive Applications of Plastics: Past, Present, and Future a2 - Kutz, Myer. In: *Applied Plastics Engineering Handbook* (second edition), William Andrew Publishing, 651-673.
- Puglia, D., & Kenny, J.M.** (2009). *Applications of natural fibre composites*. In: S. T. Pothan, *Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: From Macro to Nanoscale*, Old City Publishing, Inc, Philadelphia, 523-536.
- Rao, S. S.** (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Wiley.  
<https://doi.org/10.1002/9780470549124>
- Rao Mohan, R. A., & Arvind, N.** (2005). “A scatter search algorithm for stacking sequence optimization of laminate composites, *Composite Structures* Vol.70, 383–402.
- Singiresu, S.** (2009). *Engineering Optimization : Theory And Practice*, 4th ed. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Reddy, J. N.** (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells*, CRC Press.
- Soremekun, G., Gürdal, Z., Haftka, R. T., & Watson, L. T.** (2001). Composite laminate design optimization by genetic algorithm with generalized elitist selection. *Computers and Structures*. 79, 131-143.
- Söyleyici, M.U.** (2011). *Stacking sequences optimization of the anti-buckled laminated composites considering various failure criteria*, in mechanical engineering master of science, Izmir Institute of Technology, Izmir.

- Spallino, R., & Thierauf, G.** (2000). Thermal buckling optimization of composite laminates by evolution strategies, *Computers and Structures*. 78, 691-697.
- Şener, E.** (1988). *İki kutuplu Dolgulu Kolon Reaktöründe Kobalt(III) Asetat Elektrosentezinin Optimizasyonu*, Doktora tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Malatya.
- Taj, S., Munawar, M.A., & Khan, S.** (2007). *Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites*, Pakistan Academy of Sciences, 44(2), 129-144.
- Toğan V., & Daloğlu, A.** (2006). Genetik algoritma ile üç boyutlu kafes sistemlerin şekil ve boyut optimizasyonu, *IMO Teknik Dergi*, (2006) 3809-382 .
- Van de Velde, K., & Baetens, E.** (2001). Thermal and mechanical properties of flax fibres as potential composite reinforcement, *Macromolecular Materials and Engineering*, 286(6), 342-349.
- Van de Velde, K., & Kiekens, P.** (2003). Effect of material and process parameters on the mechanical properties of unidirectional and multidirectional flax/polypropylene composites, *Composite Structures*, 62(3-4), 443-448.
- Vinson, Jack R., Sierakowski, & Robert L.** (2004). The Behavior of Structures Composed of Composite Materials, *Kluwer Academic Publisher*.
- Vosoughi, A.R., Darabi, A., & Dehghani Forkhorji, H.** ( 2017). Optimum stacking sequences of thick laminated composite plates for maximizing buckling load using FE-GAs-PSO, *Composite Structures* 159, 361-367.
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I.** (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?, *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259-1264.
- Yalçın, H., Gürü, M.** (2002). *Malzeme Bilgisi*, Ankara, Palme Yayıncılık.
- Yaman, N., Öktem, T., & Seventekin, N.** (2006). Karbon Liflerinin Üretimi, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 3/2006, 164-172  
(.Http://www.technica.net/NF/NF2/efibreinorganiche.htm)
- Yıldız, Z.** (2011). *Endüstriyel sıvılardan elektromanyetik filtrasyon yöntemiyle demir uzaklaştırılması ve proses parametrelerinin optimizasyonu*, Doktora tezi, İnönü üniversitesi kimya anabilim dalı, Kimya anabilim dalı, Malatya.
- Url-1 <<http://carbomid.com.tr/tr/aramid-elyaf-ozellikleri/>>, 03.07.2017
- Url-2 < <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0053>>, 03.07.2017
- Url-3<<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1396435127309&uri=CELEX:02009R0443-20130508> ([Regulation \(EC\) No 443/2009](#)), 03.07.2017

Url-4< chrome-extension://mhjfbmdgcfjbbpaeojofohoefgihjai/index.html

Url-5<[http://news.bio-based.eu/media/2015/04/15-04-20\\_PR\\_Carbon-Footprint-of-Natural-Fibres\\_nova.pdf](http://news.bio-based.eu/media/2015/04/15-04-20_PR_Carbon-Footprint-of-Natural-Fibres_nova.pdf)>, erişim tarihi 07.01.2017.

Url-6 <<http://www.innovationintextiles.com/flax-innovation-in-the-mercedes-e-class/>>, erişim tarihi 07.01.2017.

Url-7 <<http://eur-lex.europa.eu/legal>>, 03.07.2017

