

**TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE RİJİTLİK
VE DAYANIM OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kezban Banu YİĞİT

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ömer SOYKASAP

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2010

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE RİJİTLİK VE DAYANIM
OPTİMİZASYONU**

Kezban Banu YİĞİT

**Danışman
Doç. Dr. Ömer SOYKASAP**

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2010

ONAY SAYFASI

Doç.Dr. Ömer SOYKASAP danışmanlığında
Kezban Banu YİĞİT tarafından hazırlanan
“Tabakalı Kompozit Malzemelerde Rijitlik ve Dayanım Optimizasyonu”
başlıklı bu çalışma lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri
uyarınca

....../....../2010

tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı, SOYADI

İmza

Başkan :

Üye :

Üye :

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Literatür Araştırması	3
2. MATERYAL VE METOD	6
2.1 Katmanlı Kompozit Plakların Denklemleri	6
2.1.1 Kompozit Malzemelerde Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri	6
2.1.2 Orthotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu	8
2.1.3 Malzemenin Yöne Bağlı Olarak Mekaniksel Davranışı	9
2.1.4 Bileşke Kuvvet ve Momentler	12
2.1.5 N Tabakadan Oluşan Bileşik Tabaka Teorisi	13
2.1.6 Orthotropik Bir Tabakanın Malzeme Sabitleri	15
2.1.7 Laminasyon Parametreleri ile Elde Edilen Denklemler	16
2.2 Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri	19
2.2.1 Maksimum Gerilme Hasar Kriteri	20
2.2.2 Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Kriteri	21
2.2.3 Tsai-Hill Hasar Teorisi	21
2.2.4 Hoffman Hasar Teorisi	22
2.2.5 Tsai-Wu Hasar Teorisi	23
2.2.6 Hashin Hasar Teorisi	23
2.3 Genetik Algoritma	25
2.3.1 Genetik Algoritmanın Tarihçesi	27
2.3.2 Genetik Algoritmanın Çalışma Prensibi	28
2.3.3 Genetik Algoritmanın İşlem Basamakları	28
2.3.4 Genetik Algoritma Operatörleri	31

2.3.4.1 Gen Havuzu	31
2.3.4.2 Seçim	32
2.3.4.3 Çaprazlama	33
2.3.4.4 Mutasyon	35
2.3.4.5 Elitizm	36
2.3.5 Genetik Algoritma Parametreleri	36
2.3.5.1 Popülasyon Büyüklüğü	36
2.3.5.2 Çaprazlama Oranı	36
2.3.5.3 Mutasyon Oranı	37
2.4 Genetik Algoritma Uygulama Alanları	37
2.4.1 Deneysel Uygulamalar	37
2.4.2 Pratik Uygulamalar	37
2.4.3 Sınıflandırıcı Sistem Uygulamaları	38
3. BULGULAR	39
3.1 Giriş	39
3.2 Optimizasyon Çalışmaları	40
3.2.1 Rijitlik Optimizasyonu Çalışması	41
3.2.1.1 Klasik Kompozit Plak Denklemleriyle Yapılan Çalışmalar	42
3.2.1.2 Laminasyon Parametreleri Denklemleriyle Yapılan Çalışmalar	47
3.2.1.3 İki Yöntemin Karşılaştırılması	55
3.2.2 Dayanım Optimizasyonu Çalışması	62
3.2.3 Burkulma Optimizasyonu Çalışması	74
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
5. KAYNAKLAR	83
6. ÖZGEÇMİŞ	89
EKLER	xi
EK-1 Genetik Algoritma Arayüzü	xii
EK-2 Rijitlik Optimizasyonu İçin Genel Denklemlerle Yazılan M-File Sayfası	xiv
EK-3 Rijitlik Optimizasyonu İçin Laminasyon Parametreleriyle Yazılan M-File Sf.	xvii
EK-4 Dayanım Optimizasyonu İçin Genel Denklemlerle Yazılan M-File Sayfası	xix
EK-5 Dayanım Optimizasyonunda Laminasyon Parametreleriyle M-File Sayfası	xxv

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE RİJİTLİK VE DAYANIM OPTİMİZASYONU

Kezban Banu YİĞİT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer SOYKASAP

Bu çalışmada tabakalı kompozit plakların rijitlik ve dayanımı genetik algoritma yöntemiyle optimize edilmektedir. Bunun için klasik kompozit plak denklemleri ve laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemler optimizasyon probleminde ele alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Rijitlik optimizasyonu için kullanılan basit mesnetli kompozit plak, grafit-epoksiden oluşmuştur. Plakın 24 ve 48 tabakalı olması durumuna göre hesaplar yapılmıştır. Dayanım optimizasyonu için kullanılan kompozit plak cam-epoksiden oluşmuştur, 48 tabakalıdır ve farklı düzlem içi yüklere maruzdur. Tabaka açıları tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Ele alınan problemlerde çok fazla sayıda birbirine eşit global maksimumlar olup klasik yöntemlerle bütün konfigürasyonların bulunması zordur. Genetik algoritma yöntemi kullanılarak kompozit plakın rijitliğini ve dayanımını maksimize eden konfigürasyonlar ekonomik bir şekilde bulunmuştur. Ayrıca genel kompozit plak denklemleri ve laminasyon parametreleri denklemlerini kullanarak çalıştırılan algoritmaların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Laminasyon parametreleri kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmalarının klasik yöntemle göre çok daha etkin olarak sonuçları bulduğu gözlemlenmiştir.

2010, 89 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Genetik Algoritma, Tabakalı Kompozit Yapılar, Laminasyon Parametreleri

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

STIFFNESS AND STRENGTH OPTIMIZATION OF LAMINATED COMPOSITE MATERIALS

Kezban Banu YİĞİT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Supervisor: Associate Professor Ömer SOYKASAP

In this study, the stiffness and strength of laminated composite plates are optimized by using the genetic algorithm. Therefore, in the optimization problem, classical composite plates equations and equations with lamination parameters are used and the results are compared.

The simply supported composite plate used for stiffness optimization is made of graphite-epoxy. Studies are performed for a plate with 24 or 48 plies. The composite plate used for strength optimization is made of glass-epoxy and is exposed to different in-plane loads and has 48 plies. Ply angles are considered as design variables. In these problems, there are many equal global maxima and it is difficult to find all configurations by using classical methods. The optimal configurations for the stiffness and the strength of the composite plate are found by using genetic algorithm method economically. Furthermore, the results by the use of classical composite plate equations and by the equations with lamination parameters are compared, and for their effectiveness. The optimization studies that is performed by the use of lamination parameters find the results effectively.

2010, 89 pages

Keywords: Genetic Algorithm, Laminated Composites, Lamination Parameters

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında benden yardımlarını esirgemeyen, engin bilgilerinden yararlandığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Ömer SOYKASAP'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN'e, her zaman yanımda olan değerli aileme ve kıymetli nişanlım Yrd. Doç. Dr. İlker SUGÖZÜ'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Kezban Banu YİĞİT
Afyonkarahisar, 2010

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

σ_{ij}	Gerilme İndisi
τ_{ij}	Kayma Gerilmesi
s_{ij}	Kompliyans Matrisi
λ	Burkulma Katsayısı
γ_{ij}	Kayma Deformasyonu
ε_{ij}	Deformasyon Bileşeni
c_{ij}	Rijitlik Matrisi
Q_{ij}	İndirgenmiş Rijitlik Matrisi
$\overline{Q}_{ij}$	Dönüşmüş İndirgenmiş Rijitlik Matrisi
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
T_{ij}	Transformasyon Matris İndisi
ν_{ij}	Poisson Oranı
θ	Fiber Yönlenme Açısı
N_x	Plağa X Yönünde Etki Eden Kuvvet
N_y	Plağa Y Yönünde Etki Eden Kuvvet
N_{xy}	Plağı XY Yönünde Kaymaya Zorlayan Kuvvet
t	Tabaka Kalınlığı
M_x	X Yönünde Etki Eden Moment
M_y	Y Yönünde Etki Eden Moment
M_{xy}	Kaymaya Zorlayan Moment
κ_x	X Yönündeki Eğrilik
κ_y	Y Yönündeki Eğrilik

κ_{xy}	XY Yönünde Eğrilik
h	Tabaka Sayısı
A_{ij}	Genleşme Rijitliği
B_{ij}	Bağlantı Rijitliği
D_{ij}	Eğilme Rijitliği
U	Malzeme Sabiti
$V_{\{1,3\}}$	Eğilme Laminasyon Parametreleri
$W_{\{1,3\}}$	Genleşme Laminasyon Parametreleri
λ_s	Yük Faktörü
λ_b	Burkulma Katsayısı

2. Kısaltmalar

GA	Genetik Algoritma
CPU	Merkezi Birim İşlemcisi
DDOA	Çift Dağılım İstatistiksel Algoritma

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Birim elemanda meydana gelen gerilmeler	6
Şekil 2.2 Herhangi x-y eksenlerinden malzeme asal eksenlerinin θ açısı kadar pozitif yönde dönüşü	9
Şekil 2.3 Bileşik tabakadaki kuvvetler	12
Şekil 2.4 Bileşik tabakadaki momentler	13
Şekil 2.5 Kompozit plağın kat numaralarını gösteren bir kesit	13
Şekil 2.6 Genetik algoritma akış diyagramı	30
Şekil 2.7 Genetik algoritma işlemleri	32
Şekil 2.8 Çaprazlama yöntemleri ve etkileri	34
Şekil 2.9 Mutasyon yöntemleri ve etkileri	35
Şekil 3.1 n=6 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maksimum A_{22})	53
Şekil 3.2 n=12 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maks. A_{22})	54
Şekil 3.3 n=6 için laminasyon parametreleri ve genel rijitlik denklemleri ile çözülen problemde (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik	59
Şekil 3.4 n=12 için laminasyon parametreleri ve genel rijitlik denklemleri ile çözülen problemde (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik	61
Şekil 3.5 x ve y yönlerinde meydana gelen kuvvetler	64
Şekil 3.6 (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maksimum λ_s)	71
Şekil 3.7 Çift eksenli yüklemeye maruz basit mesnetli kompozit plak	74
Şekil 3.8 İki eksenli yük altında kompozit plak	75
Şekil 3.9 Yükleme durumu 1 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maksimum λ_b)	78
Şekil 3.10 Yükleme durumu 2 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maksimum λ_b)	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1 Grafit epoksi ve cam epoksinin malzeme özellikleri	40
Çizelge 3.2 Klasik denklemlerle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçlar (maksimum A_{11})	43
Çizelge 3.3 Klasik denklemlerle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçların literatürle karşılaştırılması (maksimum A_{22})	43
Çizelge 3.4 Popülasyon büyüklüğünün ortalama CPU zamanına etkisi (maksimum A_{22})	44
Çizelge 3.5 İkili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisi (maksimum A_{22})	44
Çizelge 3.6 $n=6$ için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (maksimum A_{22})	45
Çizelge 3.7 $n=12$ için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (maksimum A_{22})	46
Çizelge 3.8 Laminasyon parametreleriyle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçlar (maksimum A_{11})	47
Çizelge 3.9 Laminasyon parametreleri denklemleriyle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçların literatürle karşılaştırılması (maksimum A_{22})	48
Çizelge 3.10 Popülasyon büyüklüğü ve ortalama CPU zamanı ilişkisi (maksimum A_{22})	48
Çizelge 3.11 İkili popülasyon grupları ve ortalama CPU zamanı ilişkisi (maksimum A_{22})	49
Çizelge 3.12 $n=6$ için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (maksimum A_{22})	50
Çizelge 3.13 $n=12$ için optimum fiber tasarım açıları konfigürasyonu (maksimum A_{22})	50
Çizelge 3.14 Rijitlik optimizasyonu için iki yöntemin karşılaştırılması (maksimum A_{11})	55
Çizelge 3.15 Rijitlik optimizasyonu için iki yöntemin karşılaştırılması (maksimum A_{22})	55
Çizelge 3.16 İki yöntemin ortalama CPU zamanı açısından karşılaştırılması (maks. A_{22})	56
Çizelge 3.17 İki yöntemin ortalama CPU zamanı açısından karşılaştırılması (maks. A_{22})	56

Çizelge 3.18 24 tabaka için ikili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisinin iki yöntemle karşılaştırılması (maksimum A_{22})	57
Çizelge 3.19 48 tabaka için ikili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisinin iki yöntemle karşılaştırılması (maksimum A_{22})	57
Çizelge 3.20 Cam epoksinin malzeme özellikleri	63
Çizelge 3.21 Dayanım optimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar (maks. λ_s)	64
Çizelge 3.22 İki yöntemin ortalama CPU zamanı açısından karşılaştırılması (maks. λ_s)	65
Çizelge 3.23 İkili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisinin iki yöntemle karşılaştırılması (maksimum λ_s)	65
Çizelge 3.24 Optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (klasik denk.)	66
Çizelge 3.25 Optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (laminasyon param.)	68
Çizelge 3.26 Farklı yükleme durumlarında yük faktörü ve fiber açıları konfigürasyonu	72
Çizelge 3.27 Grafit/epoksi tabaka özellikleri	76
Çizelge 3.28 Optimizasyonu yapılan plağın yükleme durumları ve tabaka boyutları	76
Çizelge 3.29 Yükleme durumu 1 için optimum sonuçların karşılaştırılması	76
Çizelge 3.30 Yükleme durumu 2 için optimum sonuçların karşılaştırılması	77

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Rijitlik, genel olarak, bir cismin hiç bir etkiye maruz kalmadan ve sürtünmesiz ortamda, kuvvet ya da moment etkisi altında şekil değiştirmemesi, formunu koruması olarak ifade edilebilir. Dayanım ise cismin dış etkilere karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanabilir. Rijitlik ve dayanımın yüksek olması malzemeler için istenen özelliklerdir. Kompozit malzemeler, yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip olması bakımından piyasadaki diğer malzemelerden daha avantajlıdır.

Mühendislik malzemelerini metal ve alaşımları, polimerler, seramikler, kompozitler olarak dört ana gruba ayırabiliriz. Kompozit malzemeleri de iki ya da daha fazla malzemenin mikroskobik düzeyde birleşmesiyle meydana gelen malzeme türü olarak veya birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzemeler olarak tanımlayabiliriz. Metal veya seramik alaşımlarını kompozit malzeme olarak değerlendirmeyiz çünkü birleşme mikroskobik boyutta gerçekleşir. Ama son yıllarda metal matrisli kompozitler adı altında yüksek mukavemetli malzemeler elde edilmiş ve özellikle yüksek dayanım gereken yerlerde kullanım alanı gittikçe artmaktadır (Karakaya 2007).

Dört temel unsur kompozit malzemelerin özelliklerini belirler. Bunlar matris, fiber, ara yüzey ve mikro yapı özellikleridir. Kompozit malzeme genel olarak sürekli bir fiber ve bir matris malzemedan meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerin isimlendirilmesi, kullanılan matris ve fiber malzemelerin çeşitli kombinasyonları ile oluşturulan fiber/matris malzemelerine göre yapılır (Taşgetiren 1999).

Kompozit malzemelerin hayatımızda kullanılması binlerce yıl önceden gerçekleşmiştir. Örneğin çamurla samanın karıştırılarak yapı malzemesi olarak kullanılması örnek olarak gösterilebilir. Saman: fiber ve çamur: matris malzeme olarak evlerde yapı malzemesi olarak kullanılmıştır (Karakaya 2007).

Kompozit malzemeler kullanım yerlerine göre farklı yapılarda karşımıza çıkmaktadır. Bu yapılar kiriş, plak, kabuk (metal matrisliler çok farklı geometrik yapılarda) şeklindedir. Plak, paralel yüzeylerin yan yüzeylere oranla büyük olduğu yapılardır. Kompozit plaklar tabaka ya da katmanlar halinde çok sayıda kompozit yapının bir araya gelmesi ile oluşur (Aydoğdu 2003). Tez çalışmasında kullanılan kompozit plağın sürekli fiberli ve katmanlardan oluştuğu kabul edilmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan kompozit yapı, tabakalı kompozit yapı olarak adlandırılır. Bu yapılar karbon, cam veya bor gibi yüksek dayanıma sahip fiberlerin farklı tip bağdaşçılar kullanılarak (epoksi reçine) birleştirilmesi ile elde edilir. 1920' li yıllarda Griffith yaptığı çalışmalarda malzemelerin elyaf halinde iken hacimsel durumdan daha dayanıklı oldukları bulmuştur. Bunun sebebi olarak azalan çap ile birlikte malzemede oluşacak hasar olasılığının azalması olarak gösterilmektedir (Aydoğdu 2003).

Malzeme teknolojisindeki hızlı gelişmeler, değişik özelliklere sahip yeni malzemelerin mühendislik uygulamalarında ve yeni sistemlerin tasarımında yoğun olarak kullanımı sonucunu doğurmuştur. Bu kapsamda geliştirilen kompozit malzemeler, uzay, havacılık, savunma sanayi ve otomotiv endüstrilerinde yoğun olarak kullanım alanı bulmuştur.

Bir ürünün piyasa şartlarında rekabet edebilmesi için kalite, düşük maliyet ve dayanıklılık gibi özellikleri taşıması gerekir. Bu durum piyasadaki hemen her ürün için geçerli olduğu gibi kompozit malzemeler için de geçerlidir. Bu şartlar altında en uygun ürünün tasarımına ihtiyaç duyulur. Bu tasarım ise optimizasyon ile gerçekleştirilir.

Yukarıda ifade edildiği gibi, ekonomik ve işlevini yerine getirebilen en uygun ürün tasarımı optimizasyon ile elde edilir. Bu nedenle mühendisler çeşitli optimizasyon teknikleri kullanırlar. Bu tez çalışmasında, son yıllarda kullanım alanı oldukça genişleyen genetik algoritma tekniği ile tabakalı kompozit plağın optimal tasarımı hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada simetrik tabakalı kompozit plakların dayanımı ve rijitliği optimize edilmektedir. Bunun için öncelikle optimize edilecek kompozit plakların malzemesi, geometrik özellikleri, tabaka sayısı ve fiber açıları belirlenmiştir.

Optimizasyon için öncelikle klasik kompozit plak denklemleri kullanılarak maksimum rijitlik katsayısı/dayanım değeri ve kompozit plak için kolay üretilebilecek farklı fiber açıları alternatifleri bulunmuştur. Daha sonra laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerle aynı kompozit plağın optimizasyonu yapılmış ve her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışma literatürde yayınlanmış bir kaynakla kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Genetik algoritmalar yapay zekânın gittikçe genişleyen bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasını oluşturmaktadır. Genetik algoritma doğada en iyinin yaşaması kuralından esinlenerek oluşturulan, bir veri öbeğinden özel bir veriyi bulmak için kullanılan bir arama yöntemidir. Genetik algoritmalar geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkânsız olan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Herhangi bir problemin genetik algoritma ile çözümü, problemi sanal olarak evrimden geçirmek suretiyle yapılmaktadır (Elmas 2003).

Genetik algoritmalar, bazı doğal olayları modelleyen stokastik bir arama yöntemidir. Biyolojik evrimin işleyiş biçimini taklit eden, doğal seleksiyon mekanizmasına dayanan sayısal optimizasyon algoritmalarıdır (Bolat ve ark. 2004). Darwin'in en iyi olan yaşar (survival of the fittest) prensibine dayalı olarak bir popülasyonu oluşturan bireylerin rekabet etmelerini sağlayan, evrimsel süreci taklit eden Genetik Algoritmalar (GA) ilk olarak John Holland tarafından ortaya atılmıştır (Holland 1975). Genetik algoritma tekniği, çözüm uzayının büyüklüğüne rağmen iyi bir çözüme kısa zamanda yakınsamaktadır (Uçaner ve Özdemir 2002).

Genetik algoritma evrim sürecinden etkilenecek, canlılarda yaşanan genetik sürecin bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi işlemidir. İşlemler bilgisayar hafızasına depo edilmiş kromozomlar üzerinde icra edilmektedir. Çaprazlama operatörü vasıtasıyla, kromozomlar arasındaki genetik bilgi sürekli olarak değişmekte ve topluluğun başarısı artmaktadır (Yurtçu ve İçağa 2006).

Genetik Algoritma ile ilgili literatürde birçok yayın elde etmek mümkündür. Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde, araştırma alanı geniş ve karmaşık ise, konuyla ilgili bilgi az veya eldeki bilgi araştırma alanını daraltmada yeterli değilse, matematiksel analiz elde edilemiyorsa veya geleneksel araştırma metotları ile başarısız olunmuş veya iyi sonuç alınmamışsa genetik algoritmalarından faydalandığı görülmüştür (Bolat vd. 2004).

Genetik Algoritma bilimin hemen her alanında farklı amaçlarla kullanılan bir yöntem olduğundan sadece ilgili kısımlar incelenmiş ve bu yayınlarda yapılan çalışmaların bir özeti aşağıda verilmiştir.

Karakaya (2007), eksenel basma yükleri altında tabakalı kompozit plağın genetik algoritma ve model arama yöntemleriyle optimal tasarımını yapmış ve her iki yöntemi avantaj ve dezavantajları bakımından kıyaslamıştır.

Mohan Rao ve Arvind (2005), yayarak arama metodu (scatter search) ile tabakalı kompozit yapıların optimizasyonunu yapmışlardır. Standart GA ile yayarak arama arasında karşılaştırma yapmışlardır. Yayarak arama metodunu hem kompozit plağın modal analizinde hem de hibrit bir kompozit yapıda kullanmışlar ve metodun standart genetik algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlardır.

Turğut ve Arslan (2001), altı açıklıklı sürekli bir kirişte maksimum açıklık ve mesnet momentlerini veren hareketli yük kombinezonlarının genetik algoritmalarla otomatik bir şekilde düzenlenmesini incelemişlerdir. Sunulan metodun hesaplama hızı, tesir çizgileri yöntemi gibi klasik yöntemlerle yapılan çözüme kıyasla oldukça yüksek olduğunu göstermişlerdir.

Öztürk ve Yılmaz (2003), makina tasarım optimizasyonu problemlerinin çözümünde genetik algoritmayı kullanmışlardır. Klasik yöntemlerle çözümü, uzun zaman alan ve optimuma ulaşılması sürecinde ıraksama veya lokal optimuma yakalama problemi içeren makina tasarım problemlerinin genetik algoritma yaklaşım ile optimizasyonunu açıklamışlardır.

Bekiroğlu ve arkadaşları (2003), çalışmalarında genetik algorithmada değer kodlaması kullanarak kafes sistemlerinin minimum ağırlıklı tasarımını amaçlamışlar ve değer kodlaması kullanılarak hazırlanan programın kafes sistemlerin genetik algoritma ile minimum ağırlıklı olarak boyutlandırılmasında etkin bir şekilde kullanıldığını göstermişlerdir.

Emel ve Taşkın (2002), genetik algoritmanın çeşitli alanlardaki uygulamaları için literatür araştırması yapmış, çalışma adımları ve parametre seçimlerini inceleyerek fonksiyon optimizasyonu için bir çözüm örneği vermişlerdir.

Fırlalı ve Engin (2002), optimum çözümü zor olan (NP-zor), çok makinalı akış tipi çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ile çözüm performansının arttırılmasına yönelik bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak akış tipi çizelgeleme problemlerinin genetik algoritma ile çözümünde etkili olan parametreler ile genetik algoritmanın çözüm performansını arttıracak parametre setlerini belirlemişlerdir.

Cortes ve arkadaşları (2004), asansör grup kontrolünü genetik algoritma ile analizini ve simülasyonunu yapmışlardır. Bu çalışmayla öğlen saatlerindeki yoğun trafik akışında yolcuların bekleme zamanı azaltmayı başarmışlardır. Ele alınan problem asansör grup kontrollerinin analizi ve simülasyonu olduğundan, genetik algoritma uygulamasına elverişli olduğu görülmüştür.

Toğan (2003), yaptığı çalışmada genetik algoritma kullanarak çatı makaslarının farklı yüklemeler altında optimum tasarımlarını yapmıştır. Gerilme, burkulma ve çökme sınırlayıcılar göz önüne alınmış ve iki tip tasarım problemi incelemiştir. Önce çeşitli çatı makaslarının minimum ağırlıklı boyut optimizasyonları gerçekleştirilmiş daha sonra çatı makaslarının eleman kesit alanlarıyla birlikte optimum geometrilerini de bulacak şekilde boyut ve şekil optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Katmanlı Kompozit Plakların Denklemleri

2.1.1 Kompozit Malzemelerde Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri

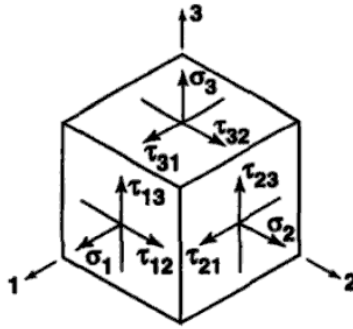
Bir elemanda meydana gelen gerilmeler Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi Hooke Kanunundan özetle şu şekilde yazabiliriz:

$$\sigma_i = c_{ij} \varepsilon_j \quad \text{ve } i, j : 1, \dots, 6$$

Bu eşitlik matris formunda (2.1)’deki gibi ifade edilebilir (Jones 1999).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

$\sigma_i = c_{ij} \varepsilon_j$ matrisinde 36 elastik sabit var. Ancak matriste $c_{ij} = c_{ji}$ simetri özelliği nedeniyle bağımsız elastik sabitlerin sayısı 21’e düşmektedir. (2.1) denklemi hiçbir simetri düzlemi içermeyen anizotropik malzemelerdeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ifade eder. Hiçbir simetri düzlemi olmayan bu tür malzemelere triklinik malzeme denir.



Şekil 2.1 Birim elemanda meydana gelen gerilmeler (Jones 1999)

Gerilme şekil değiştirme bağıntısının tersi olan kompiyans matrisi s_{ij} ile ifade edilir (Jones 1999).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{14} & s_{24} & s_{34} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & s_{45} & s_{55} & s_{56} \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & s_{46} & s_{56} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

$\varepsilon_{ij} = s_{ij} \sigma_i$ ve $i, j: 1, \dots, 6$ s_{ij} matrisi de aynı c_{ij} matrisi gibi simetri özelliği gösterir. $s_{ij} = s_{ji}$ 'dir. Malzeme özellikleri bir simetrik düzlemde simetri özelliği gösteriyor ise rijitlik ve kompiyans matrislerindeki bağımsız değişken sayısı 13'e düşer. Bu tür malzemelere monoklinik malzeme denir. Monoklinik malzeme için gerilme- şekil değiştirme ve şekil değiştirme-gerilme ilişkilerini veren denklem (2.3)'de gösterilmiştir (Jones 1999).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{45} & c_{55} & 0 \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & s_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{45} & s_{55} & 0 \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

Bir malzemenin birbirine dik üç simetri düzlemi varsa, bu düzlemin ara kesitlerine paralel koordinatlardaki gerilme-şekil değiştirme ve şekil değiştirme-gerilme ilişkileri (2.4) ve (2.5) denklemlerindeki gibidir (Jones 1999).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Bu tür özellikleri gösteren malzemelere orthotropik malzeme denir ve 9 bağımsız elastik içerir. Orthotropik malzemeye örnek olarak tek yönlü sürekli fiberlerle pekiştirilmiş bir tabaka gösterilebilir.

2.1.2 Orthotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu

Elyaf takviyeli tabakalar çoğunlukla ince oldukları için düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu kabul edilebilir. $\sigma_3 = 0$, $\sigma_4 = 0$, $\sigma_5 = 0$ olduğu durumda üç boyutlu Q_{ij} matrisi kullanılır. Bu durumda Hooke bağıntısı (2.6)'daki gibi olur (Jones 1999).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

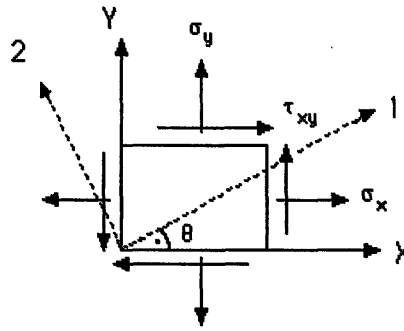
Burada matrisin bağımsız elemanlarının sayısı 4'e inmiştir. Bu elemanların mühendislik sabitleri cinsinden ifadeleri (2.7) denklemlerinde verilmiştir (Jones 1999).

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & Q_{12} &= \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.1.3 Malzemenin Yöne Bağlı Olarak Mekaniksel Davranışı

Uygulanan gerilmeler her zaman için malzemenin asal eksenleri ile çakışmayabilir. Böyle bir durumda farklı yönlerdeki bağıntılar transformasyon matrisi (T_{ij}) kullanılarak bulunabilir.

Şekil 2.2'deki gibi, etkiyen gerilmeler malzemenin asal doğrultuları x ve y yönlerinde değil, 1 ve 2 yönlerinde etkimesi halinde bu gerilme halinin malzeme asal eksenleri ile çakışan bir koordinatta transformasyonu (2.8) denklemi gibi yazılabilir (Topçu 1998).



Şekil 2.2 Herhangi x-y eksenlerinden malzeme asal eksenlerinin θ açısı kadar pozitif yönde dönüşü (Gür 1994)

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad \text{olur.} \quad (2.8)$$

Benzer şekilde;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12/2} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

(-1) üst ifadesi matrisin tersini ifade etmektedir ve transformasyon matrisi (2.10) denkleminde verilmiştir (Jones 1999).

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Bununla birlikte [R] matrisi,

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

kullanılırsa ½ çarpanı ortadan kalkar ve denklem (2.11) elde edilir (Topçu 1998).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12/2} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Eğer gerilmenin uygulandığı eksenler olan x ve y, malzemenin asal eksenleri olan 1 ve 2 eksenleri ile çakışmıyor ise gerilme-şekil değiştirme bağıntısı (2.12)'deki gibidir (Topçu 1998).

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} &= [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12/2} \end{bmatrix} \\
&= [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Bu ifadede; $[T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} = [\bar{Q}]$ ile gösterilirse x-y eksenlerine ait gerilme-şekil değiştirme bağıntısı (2.13)'deki gibi elde edilir (Jones 1999).

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

$[\bar{Q}]$ 'nın bileşenleri ise denklem (2.14)'te verilmiştir (Jones 1999).

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cdot \cos^4 \theta + 2 \cdot (Q_{12} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{22} \cdot \sin^4 \theta \\
\bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{12} \cdot (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\
\bar{Q}_{22} &= Q_{11} \cdot \sin^4 \theta + 2 \cdot (Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{22} \cdot \cos^4 \theta \\
\bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin \theta \cdot \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^3 \theta \cdot \cos \theta \\
\bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^3 \theta \cdot \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin \theta \cdot \cos^3 \theta \\
\bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2 \cdot Q_{12} - 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{66} \cdot (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Burada $\bar{Q}_{ij}$ indirgenmiş rijitlik matrisi yerine, transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil eder.

Aynı şekilde malzemenin asal eksenleri ile çakışmayan bir gerilme hali için şekil değiştirme-gerilme bağıntısı (2.15)'deki gibi yazılabilir (Topçu 1998).

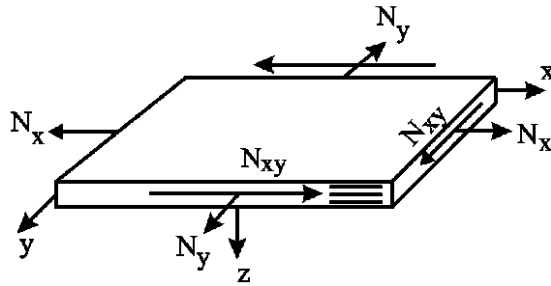
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Burada $[R] \cdot [T]^{-1} \cdot [R]^{-1} \cdot [S] \cdot [T] = [\bar{S}]$ olarak gösterilmiş ve denklemleri (2.16)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \bar{S}_{11} &= S_{11} \cdot \cos^4 \theta + (2 \cdot S_{12} + S_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{22} \cdot \sin^4 \theta \\ \bar{S}_{12} &= S_{12} \cdot (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta \\ \bar{S}_{22} &= S_{11} \cdot \sin^4 \theta + (2 \cdot S_{12} - S_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{22} \cdot \cos^4 \theta \\ \bar{S}_{16} &= (2 \cdot S_{11} - S_{12} - S_{66}) \cdot \sin \theta \cdot \cos^3 \theta + (2 \cdot S_{22} - 2 \cdot S_{12} - S_{66}) \cdot \sin^3 \theta \cdot \cos \theta \\ \bar{S}_{26} &= (2 \cdot S_{11} - S_{12} - S_{66}) \cdot \sin^3 \theta \cdot \cos \theta + (2 \cdot S_{22} - 2 \cdot S_{12} - S_{66}) \cdot \sin \theta \cdot \cos^3 \theta \\ \bar{S}_{66} &= (S_{11} + S_{22} - 2 \cdot S_{12} - 2 \cdot S_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{66} \cdot (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.1.4 Bileşke Kuvvet ve Momentler

Bileşik bir tabakadaki gerilmeler her bir tabaka için farklı olduğundan, bu gerilmelerin bileşik tabakanın kalınlığı boyunca integrasyonu ile elde edilen bileşke kuvvet ve momentler Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'deki gibidir.

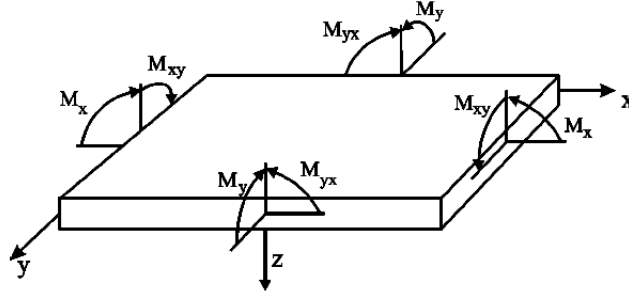


Şekil 2.3 Bileşik tabakadaki kuvvetler (Demirkessen 1991)

Bileşik tabaka için kuvvet denklemleri (2.17)'de verilmiştir.

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \quad N_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xy} dz \quad (2.17)$$

Bileşik kuvvet ve momentler, bileşik tabakanın orta düzleminin birim uzunluğa etkileyen kuvvet ve momentler şeklinde tanımlanır (Demirkese 1991).



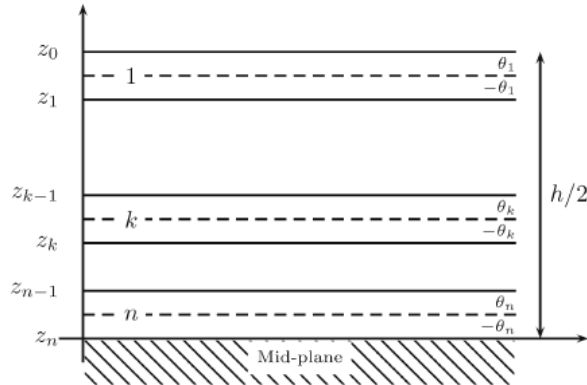
Şekil 2.4 Bileşik tabakadaki momentler (Demirkese 1991)

Bileşik tabaka için moment denklemleri (2.18)'de verildiği gibidir (Demirkese 1991).

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \quad M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xy} z dz \quad (2.18)$$

2.1.5 N Tabakadan Oluşan Bileşik Tabaka Teorisi

N tabakadan oluşan kompozit bir plağın tabaka kalınlıkları şematik olarak Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Burada z_k simetri düzleminden sonraki ilk tabaka kalınlığını temsil eder, z_n ise N'inci tabakanın simetri düzlemine olan uzunluğudur.



Şekil 2.5 Kompozit plağın kat numaralarını gösteren bir kesit (Grosset et al. 2006)

N tabakadan oluşan bileşik tabakaya ait kuvvet ve moment denklemleri (2.19)'da verilmiştir. Denklemlerdeki $\bar{Q}_{ij}$, indirgenmiş Q_{ij} rijitlik matrisi yerine transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil eder (Jones 1999).

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \quad (2.19)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\}$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{denklemini} \quad \text{özetle}$$

(2.20)'de yazıldığı gibidir (Jones 1999).

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Formüldeki A, B ve D rijitlik matrisleridir.

A; Genleşme rijitliği,

B; Bağlantı rijitliği,

D; Eğilme rijitliği matrisi olarak adlandırılır ve denklemleri (2.21)'de verilmiştir (Jones 1999).

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= 1/2 \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= 1/3 \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.1.6 Orthotropik Bir Tabakanın Malzeme Sabitleri

Denklem (2.14)'deki transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisi, fiber açısının (θ) yanı sıra dört bağımsız malzeme değişkeni olan E_1 , E_2 , ν_{12} ve G_{12} 'nin de fonksiyonlarını oldukça güçleştirmiştir. Mevcut tabakalarda meydana gelen çeşitli rotasyonların fiziksel etkilerini anlamak önemli pratik çözümler gerektirebilir. Transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisleri, trigonometrik özdeşliklere ve malzeme sabitlerine bağlı olarak denklem (2.22)'deki gibi ifade edilir (Jones 1999).

$$\begin{aligned}\bar{Q}_{11} &= U_1 + U_2 \cdot \cos 2\theta + U_3 \cdot \cos 4\theta \\ \bar{Q}_{12} &= U_4 - U_3 \cdot \cos 4\theta \\ \bar{Q}_{22} &= U_1 - U_2 \cdot \cos 2\theta + U_3 \cdot \cos 4\theta \\ \bar{Q}_{16} &= \frac{1}{2} \cdot U_2 \cdot \sin 2\theta + U_3 \cdot \sin 4\theta \\ \bar{Q}_{26} &= \frac{1}{2} \cdot U_2 \cdot \sin 2\theta - U_3 \cdot \sin 4\theta \\ \bar{Q}_{66} &= U_5 - U_3 \cdot \cos 4\theta\end{aligned}\tag{2.22}$$

Denklemdeki U_1 , U_2 , U_3 , U_4 ve U_5 ifadeleri malzeme sabitleridir ve indirgenmiş rijitlik matrisleri cinsinden (2.23)'deki gibi ifade edilir (Jones 1999).

$$\begin{aligned}U_1 &= \frac{3 \cdot Q_{11} + 3 \cdot Q_{22} + 2 \cdot Q_{12} + 4 \cdot Q_{66}}{8} \\ U_2 &= \frac{Q_{11} - Q_{22}}{2} \\ U_3 &= \frac{Q_{11} + Q_{22} - 2 \cdot Q_{12} - 4 \cdot Q_{66}}{8} \\ U_4 &= \frac{Q_{11} + Q_{22} + 6 \cdot Q_{12} - 4 \cdot Q_{66}}{8} \\ U_5 &= \frac{Q_{11} + Q_{22} - 2 \cdot Q_{12} + 4 \cdot Q_{66}}{8}\end{aligned}\tag{2.23}$$

Benzer şekilde anizotropik malzemeler için geliştirilen U_6 ve U_7 denklemleri aşağıda ifade edilmiştir (Jones 1999).

$$U_6 = \frac{Q_{16} + Q_{26}}{2} \quad U_7 = \frac{Q_{16} - Q_{26}}{2} \quad (2.24)$$

2.1.7 Laminasyon Parametreleri ile Elde Edilen Denklemler

Kompozit tabaka istif optimizasyonu, en iyi fiber yönlerini bulmayı hedefler. Bir tabakanın genel rijitlik özellikleri tamamen laminasyon parametreleri tarafından belirlenir (Tsai and Pagano 1968). Kompozit optimizasyonu için laminasyon parametrelerinin avantajları bazı bilim adamları tarafından araştırılmıştır (Miki 1986, Todoroki and Haftka 1998). Laminasyon parametreleri kapsamında gerçekleştirilen optimizasyonun sahip olduğu birkaç avantaj vardır; bazı durumlarda amaç fonksiyonunun dışbükeyliliğini kuvvetlendirir (Foldager et al. 1998), boyutluluğu azaltır ve sürekli optimizasyon problemleri için problemi uygun hale getirir (Grosset et al. 2006).

Simetrik olmayan tabakaların düzlem içi rijitlik terimleri düzlem içi laminasyon parametreleriyle ifade edilir (Diaconu et al. 2002). Düzlem içi laminasyon parametreleri denklem (2.25)'de tanımlandığı gibidir (Matsuzaki and Todoroki 2007).

$$\mathbf{V}_{[1,2,3,4]}^A = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \cos 2\theta(z) \\ \cos 4\theta(z) \\ \sin 2\theta(z) \\ \sin 4\theta(z) \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N (a_k^A - a_{k-1}^A) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \\ \sin 2\theta_k \\ \sin 4\theta_k \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

(2.25) denkleminde h tabaka kalınlığını, z kalınlık yönü koordinatını, $\theta(z)$ z yönündeki fiber açılarını temsil eder. a_k^A katsayısı ise denklem (2.26)'da tanımlanmıştır (Matsuzaki and Todoroki 2007).

$$a_k^A = \frac{2k - N}{2N} \quad (2.26)$$

Simetrik olmayan tabakaların bağlantı rijitliği terimleri bağlantı laminasyon parametreleri ile ifade edilir. Bağlantı laminasyon parametreleri denklem (2.27)'de verilmiştir (Matsuzaki and Todoroki 2007).

$$\mathbf{V}_{[1,2,3,4]}^B = \frac{4}{h^2} \int_{-h/2}^{h/2} z \begin{bmatrix} \cos 2\theta(z) \\ \cos 4\theta(z) \\ \sin 2\theta(z) \\ \sin 4\theta(z) \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N (a_k^B - a_{k-1}^B) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \\ \sin 2\theta_k \\ \sin 4\theta_k \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

a_k^B katsayısı (2.28) bağıntısında verilmiştir.

$$a_k^B = 2 \left(\frac{2k - N}{2N} \right)^2 \quad (2.28)$$

Simetrik olmayan tabakaların düzlem dışı rijitlik terimleri düzlem dışı laminasyon parametreleriyle ifade edilir. Düzlem dışı laminasyon parametreleri denklem (2.29)'da belirtilmiştir (Matsuzaki and Todoroki 2007).

$$\mathbf{V}_{[1,2,3,4]}^D = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} z^2 \begin{bmatrix} \cos 2\theta(z) \\ \cos 4\theta(z) \\ \sin 2\theta(z) \\ \sin 4\theta(z) \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N (a_k^D - a_{k-1}^D) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \\ \sin 2\theta_k \\ \sin 4\theta_k \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

a_k^D katsayısı (2.30) bağıntısında verilmiştir.

$$a_k^D = 4 \left(\frac{2k - N}{2N} \right)^3 \quad (2.30)$$

(2.25), (2.27) ve (2.29) denklemlerinde yer alan $\sin 4\theta(z)$ değeri daima “0”dır. Bu yüzden $V_4^{A,B,D}$ ’nin bütün değerleri “0”a eşittir (Matsuzaki and Todoroki 2007).

Dengeli simetrik bir tabakanın düzlem içi laminasyon parametreleri denklem (2.31)’de belirtildiği gibidir (Todoroki and Sasai 2003).

$$V_1^* = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \cos 2\theta dz \quad V_2^* = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \cos 4\theta dz \quad (2.31)$$

$$V_3^* = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sin 2\theta dz \quad V_4^* = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sin 4\theta dz$$

Dengeli simetrik bir tabakanın düzlem dışı laminasyon parametreleri denklem (2.32)’de belirtildiği gibidir (Todoroki and Sasai 2003).

$$W_1^* = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \cos 2\theta z^2 dz \quad W_2^* = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \cos 4\theta z^2 dz \quad (2.32)$$

$$W_3^* = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \sin 2\theta z^2 dz \quad W_4^* = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \sin 4\theta z^2 dz$$

Tabakaların rijitlik matrisinin bütün elemanları, laminasyon parametreleri ve malzeme sabitlerinden elde edilebilir. Denklem (2.31) ve (2.32) gösteriyor ki; toplam laminasyon parametreleri sayısı sabittir ve 8 tanedir. W_3^* değeri zaman zaman sıfırlanır çünkü anizotropi kısıtı anizotropik parametrelerle gerçekleştirilir. Bu şartlar laminasyon parametreleri sayısını 4’e düşürür: V_1^* , V_2^* , W_1^* ve W_2^* . Laminasyon parametrelerinin amaç fonksiyonun yakınsamasının değişkenleri olarak kabul edilmesinin önemli avantajları vardır; kalın tabakalar için değişkenlerin artmasını önler ve lineer olmayan tasarım uzayını azaltır (Todoroki and Sasai 2003).

Standartlaştırılmış düzlem içi rijitlik matrisinin elemanları $[A^*](=[A]/h)$ ve standartlaştırılmış eğilme rijitlik matrisi $[D^*](=12[D]/h^3)$ denklem (2.33)'de verilmiştir (Miki and Sugiyama 1993).

$$\begin{Bmatrix} A_{11}^* \\ A_{22}^* \\ A_{12}^* \\ A_{66}^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 & V_1^* & V_2^* \\ U_1 & -V_1^* & V_2^* \\ U_4 & 0 & -V_2^* \\ U_5 & 0 & -V_2^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\begin{Bmatrix} D_{11}^* \\ D_{22}^* \\ D_{12}^* \\ D_{66}^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 & W_1^* & W_2^* \\ U_1 & -W_1^* & W_2^* \\ U_4 & 0 & -W_2^* \\ U_5 & 0 & -W_2^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix}$$

2.2 Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri

Tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin mukavemet özellikleri 1-2-3 eksenleri doğrultusunda verilir. Bir başka deyişle, tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin takviye elemanı doğrultusundaki mukavemeti ve takviye elemanına dik doğrultudaki mukavemeti çekme/basma testleri ile belirlenir (Daniel and Ishai 1994).

Kompozit malzemede 1-2-3 ekseninde maksimum kopma ve şekil değiştirme şu şekilde isimlendirilmektedir (Daniel and Ishai 1994):

X^C : 1 yönündeki maksimum basma dayanımı

X^T : 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı

Y^C : 2 yönündeki maksimum basma dayanımı

Y^T : 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı

Z^C : 3 yönündeki maksimum basma dayanımı

Z^T : 3 yönündeki maksimum çekme dayanımı

S_{12} : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

S_{23} : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

S_{13} : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

ϵ_1^c : 1 yönündeki maksimum basma birim uzaması

ϵ_1^t : 1 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

ϵ_2^c : 2 yönündeki maksimum basma birim uzaması

ϵ_2^t : 2 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

ϵ_3^c : 3 yönündeki maksimum basma birim uzaması

ϵ_3^t : 3 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

γ_{12}^F : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı

γ_{23}^F : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

γ_{13}^F : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

2.2.1 Maksimum Gerilme Hasar Kriteri

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma gerilmeleri, (2.34) bağıntısında verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar meydana gelmez (Daniel and Ishai 1994).

$$\begin{aligned} -X^C &< \sigma_1 < X^T \\ -Y^C &< \sigma_2 < Y^T \\ -Z^C &< \sigma_3 < Z^T \\ -S_{12} &< \tau_{12} < S_{12} \\ -S_{23} &< \tau_{23} < S_{23} \\ -S_{13} &< \tau_{13} < S_{13} \end{aligned} \tag{2.34}$$

2.2.2 Maksimum Şekil Değiştirme Hasar Kriteri

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma gerilmeleri, (2.35) bağıntısında verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar meydana gelmez (Daniel and Ishai 1994).

$$\begin{aligned} -\varepsilon_1^c &< \varepsilon_1 < \varepsilon_1^t \\ -\varepsilon_2^c &< \varepsilon_2 < \varepsilon_2^t \\ -\varepsilon_3^c &< \varepsilon_3 < \varepsilon_3^t \\ -\gamma_{12}^F &< \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\ -\gamma_{23}^F &< \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\ -\gamma_{13}^F &< \gamma_{13} < \gamma_{13}^F \end{aligned} \tag{2.35}$$

2.2.3 Tsai-Hill Hasar Teorisi

Tsai-Hill hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış şeklidir. Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı (2.36)'daki formülasyonu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez (Daniel and Ishai 1994).

$$(G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 < 1 \tag{2.36}$$

(2.36) denkleminde yer alan G_1 , G_2 , G_3 ve G_6 ifadeleri (2.37) bağıntısında verilmiştir (Daniel and Ishai 1994).

$$G_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{[\sigma'_2]^2} - \frac{1}{[\sigma'_1]^2} \right) \quad G_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{[\sigma'_1]^2} \right) \quad (2.37)$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{[\sigma'_2]^2} \right) \quad G_6 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{[\tau_{12}^F]^2} \right)$$

2.2.4 Hoffman Hasar Teorisi

Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı (2.38) bağıntısındaki durumu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez (Daniel and Ishai 1994).

$$\left[C_1 (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2 (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3 (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4 \sigma_1 + C_5 \sigma_2 + C_6 \sigma_3 + C_7 \tau_{23}^2 + C_8 \tau_{13}^2 + C_9 \tau_{12}^2 \right] / F < 1 \quad (2.38)$$

Denklem (2.38)'de yer alan C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , C_7 , C_8 ve C_9 ifadeleri (2.39) bağıntısında verilmiştir (Daniel and Ishai 1994).

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Z^T Z^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{X^T X^C} \right) \\ C_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^T X^C} + \frac{1}{Z^T Z^C} - \frac{1}{Y^T Y^C} \right) \\ C_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^T X^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{Z^T Z^C} \right) \\ C_4 &= \frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \quad C_5 = \frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \\ C_6 &= \frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \quad C_7 = \frac{1}{S_{23}^2} \\ C_8 &= \frac{1}{S_{13}^2} \quad C_9 = \frac{1}{S_{12}^2} \end{aligned} \quad (2.39)$$

2.2.5 Tsai-Wu Hasar Teorisi

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Bu teoriye göre (2.40) ve (2.41)'deki formülasyon sağlandığında yapıda hasar meydana gelmez (Daniel and Ishai 1994).

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2.40)$$

$$\left[\left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \right) \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} + \frac{\sigma_3^2}{Z^T Z^C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 \right] < 1 \quad (2.41)$$

(2.41) denkleminde yer alan F_{12}^2 , F_{23}^2 ve F_{13}^2 ifadeleri (2.42) formülünde verilmiştir (Daniel and Ishai 1994).

$$\begin{aligned} F_{12}^2 &= \frac{1}{X^T X^C} \cdot \frac{1}{Y^T Y^C} \\ F_{23}^2 &= \frac{1}{Y^T Y^C} \cdot \frac{1}{Z^T Z^C} \\ F_{13}^2 &= \frac{1}{X^T X^C} \cdot \frac{1}{Z^T Z^C} \end{aligned} \quad (2.42)$$

2.2.6 Hashin Hasar Teorisi

Hashin hasar teorisi hasarın şeklini ayırt edebilmektedir. Bu teoriye göre matris yapıda veya elyafta bir hasarın olup olmadığı tespit edilebilmektedir (Tserpes et al.2002; Hashin and Rotem 1980).

Matris çekme hasarı (2.43)'deki durum sağlandığı takdirde meydana gelir (Daniel and Ishai 1994).

$\sigma_2 > 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (2.43)$$

Matris basma hasarı (2.44)'deki durum sağlandığı takdirde meydana gelir (Daniel and Ishai 1994).

$\sigma_2 < 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y^C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (2.44)$$

Elyaf-matris arasındaki kayma hasarı (2.45)'deki durum sağlandığı takdirde meydana gelir (Daniel and Ishai 1994).

$\sigma_1 < 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (2.45)$$

Elyaf çekme hasarı (2.46)'daki durum sağlandığı takdirde meydana gelir (Daniel and Ishai 1994).

$\sigma_1 > 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (2.46)$$

Elyaf çekme hasarı (2.47)'deki durum sağlandığı takdirde meydana gelir (Daniel and Ishai 1994).

$\sigma_1 < 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^C}\right)^2 > 1 \quad (2.47)$$

Yukarıda, kompozit malzemeler için önemli olduğu düşünölen hasar teorilerine yer verilmiştir. Maksimum gerilme teorisi, maksimum şekil değıştirme teorisi ve Hashin hasar teorileri hasar şekillerini ayırt edebilmektedirler. Diğer teorilerde hasar şekilleri ayırt edilmemiştir. Maksimum gerilme teorisi ve maksimum şekil değıştirme teorisinde kayma gerilmesinin normal gerilme ile etkileşimi yer almamaktadır, dolayısıyla bu teoriler konservatif teorilerdir. Hashin hasar teorilerinde ise kayma gerilmesinin normal gerilmeler ile etkileşimine yer verilmiştir (Lessard and Skokrieh 1995).

2.3 Genetik Algoritma

Mühendislik konularının bilgisayar aracılığı ile modellenmesi, eniyilemesi (optimizasyon) ve gelecek davranışlarının tahmini için doğal olayların işleyiş ve davranış biçimlerinden esinlenerek bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında canlıların genetik davranış biçimleri, genetik algoritmaların (GA) ortaya çıkmasına yardımcı olmuştur. Genel olarak eniyileme sorunlarının çözümü için uygun olan GA kullanımı, diğer yöntemlerle kıyas edildiğinde çok daha iyi çözümlere ulaşırır.

Genetik Algoritma, yönlendirilmiş rastgele araştırma algoritmalarının bir türüdür. Tabii seçme (selection) ile canlılarda bulunan genetik gelişimin benzetişimini gerçekleştirmektedir. Algoritma diğer evrimsel algoritmalar gibi araştırma uzayında bulunan çözümlerin bazılarının oluşturduğu bir başlangıç popölasyonu (initial population) kullanmaktadır. Başlangıç popölasyonu her jenerasyonda (generation), tabii seçme (natural selection) ve tekrar üreme (reproduction) işlemleri vasıtasıyla art arda geliştirilir. En son kuşağın en uygun yani en kaliteli (fittest) bireyi problem için optimal çözüm olmaktadır. Bu çözüm her zaman optimum olmayabilir ama kesinlikle optimuma yakın bir optimal çözümdür (Karaboğa 2004).

Genetik algoritmalar problemlerin çözümü için evrimsel süreci bilgisayar ortamında taklit ederler. Diğer eniyileme yöntemlerinde olduğu gibi çözüm için tek bir yapının geliştirilmesi yerine, böyle yapılardan meydana gelen bir küme oluştururlar.

Problem için olası pek çok çözümü temsil eden bu küme genetik algoritma terminolojisinde popülasyon adını alır. Popülasyonlar vektör, kromozom veya birey adı verilen sayı dizilerinden oluşur. Birey içindeki her bir elemana gen adı verilir. Popülasyondaki bireyler evrimsel süreç içinde genetik algoritma işlemcileri tarafından belirlenirler (İnt. Kyn. 1).

Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyarlar. Çözümlerden oluşan popülasyonlar eş zamanlı incelemeye tabii olduklarından, yerel en iyi çözümlere takılı kalmazlar. Canlıların yapılarında var olan bir takım özellikler, sanal ortamlarda taklit edilerek modeller geliştirilmeye ve bu modellerle de karşılayan problemlere çözümler bulunmaya çalışılmaktadır. Bu modellerin birisi olan genetik algoritmalar, canlıların çevreye uyum ve genetik özelliklerinin araştırılmasıyla geliştirilmiştir (Emel ve Taşkın 2002).

Problemin bireyler içindeki gösterimi problemden probleme değişiklik gösterir. Genetik algoritmaların problemin çözümündeki başarısına karar vermedeki en önemli faktör, problemin çözümünü temsil eden bireylerin gösterimidir. Popülasyon içindeki her bireyin problem için çözüm olup olmayacağına karar veren bir uygunluk fonksiyonu vardır. Uygunluk fonksiyonundan dönen değere göre yüksek değere sahip olan bireylere, popülasyondaki diğer bireyler ile çoğalmaları için fırsat verilir. Bu bireyler çaprazlama işlemi sonunda çocuk adı verilen yeni bireyler üretirler. Yeni bireyler üretilirken düşük uygunluk değerine sahip bireyler daha az seçileceğinden bu bireyler bir süre sonra popülasyon dışında bırakılırlar. Yeni popülasyon, bir önceki popülasyonda yer alan uygunluğu yüksek bireylerin bir araya gelip çoğalmalarıyla oluşur. Aynı zamanda bu popülasyon önceki popülasyonun uygunluğu yüksek bireylerinin sahip olduğu özelliklerin büyük bir kısmını içerir. Böylelikle, pek çok nesil aracılığıyla iyi özellikler popülasyon içerisinde yayılırlar ve genetik işlemler aracılığıyla da diğer iyi özelliklerle birleşirler (İnt. Kyn. 1).

2.3.1 Genetik Algoritmanın Tarihçesi

Michigan Üniversitesinde psikoloji ve bilgisayar bilimi uzmanı olan John Holland bu konuda ilk çalışmaları yapan kişidir. Mekanik öğrenme (machine learning) konusunda çalışan Holland, Darwin'in evrim kuramından etkilenecek canlılarda yaşanan genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşündü. Tek bir mekanik yapının öğrenme yeteneğini geliştirmek yerine böyle yapılarda oluşan bir topluluğun çoğalma, çiftleşme, mutasyon, vb. genetik süreçlerden geçerek başarılı (öğrenebilen) yeni bireyler oluşturabildiğini gördü. Çalışmalarının sonucu kitabının 1975'te yayınlanmasından sonra geliştirdiği yöntemin adı Genetik Algoritmalar (GA) olarak yerleşti (İnt. Kyn. 2).

1985 yılında Holland'ın öğrencisi olarak doktorasını veren David E. Goldberg adlı inşaat mühendisinin 1989 da konusunda bir klasik sayılan kitabı yayınladığı dek genetik algoritmaların pek pratik yararı olmayan bir araştırma konusu olduğu düşünülüyordu. Halbuki Goldberg'in gaz boru hatlarının denetimi üzerine yaptığı doktora tezi ona sadece 1985 National Science Foundation Genç Araştırmacı ödülünü kazandırmakla kalmadı, genetik algoritmaların pratik kullanımının da olabilirliğini kanıtladı. Ayrıca kitabında genetik algoritmalara dayalı tam 83 uygulamaya yer vererek GA'nın dünyanın her yerinde çeşitli konularda kullanılmakta olduğunu gösterdi (İnt.Kyn. 2).

1992 yılında John Koza GA'yı kullanarak çeşitli görevleri yerine getiren programlar geliştirdi. Bu metoda da “Genetik Programlama” adını verdi. GA geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkansız olan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Mohan Rao and Arvind 2005).

Genel anlamda 3 temel uygulama alanı vardır. Bunlar optimizasyon, sınıflandırma ve pratik endüstriyel uygulamalardır. Bunlara ilaveten finans, ekoloji, öğrenme kabiliyetli makineler, ekonomi alanlarında da kullanım alanı halen yaygınlaşmaktadır (Karakaya 2007).

2.3.2 Genetik Algoritmanın Çalışma Prensipleri

GA, belirli problemlerin muhtemel çözümlerini kromozom benzeri veri yapıları şeklinde kodlar. Böylece her çözüm belirli kriterlere göre kodlanmış diziler haline getirilir ve bu diziler kromozom olarak çağrılır. Kromozomların kodlanması farklı şekillerde olabilir. Kodlamalar arasında en kullanışlı olanlar:

- İkili Kodlama (Binary Encoding) : GA'da ilk kullanılan ve en yaygın olan kodlama şeklidir. Her kromozom 1 ve 0' lardan oluşan katarlar (string) halinde ifade edilir.
- Permutasyon Kodlaması (Permutation Encoding) : Daha çok sıralama problemlerinde kullanılan kodlama yöntemidir. Görev yada güzergah sıralaması problemlerinde kullanılabilir.
- Değer Kodlaması (Value Encoding): Bünyesinde gerçek sayısal değerler barındıran problemlerde kullanılan kodlama şeklidir. Bu tür problemleri ikili kodlama ile çözmeye çalışmak daha zor bir yol olabilir. Böyle durumlarda, kromozomlar gerçek değerlerle doğrudan kodlanır (İnt. Kyn. 3).

Başlangıçta, elimizde var olan çözümler (kromozomlar) bizim başlangıç neslimizi (initial population) ifade eder. Şayet en başta elimizde var olan bir başlangıç nesli yoksa, kromozomlar rastgele üretilebilir. Daha sonra doğal seleksiyon sürecini başlatabilmek için çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılarak yeni nesiller türetilir (İnt. Kyn. 3).

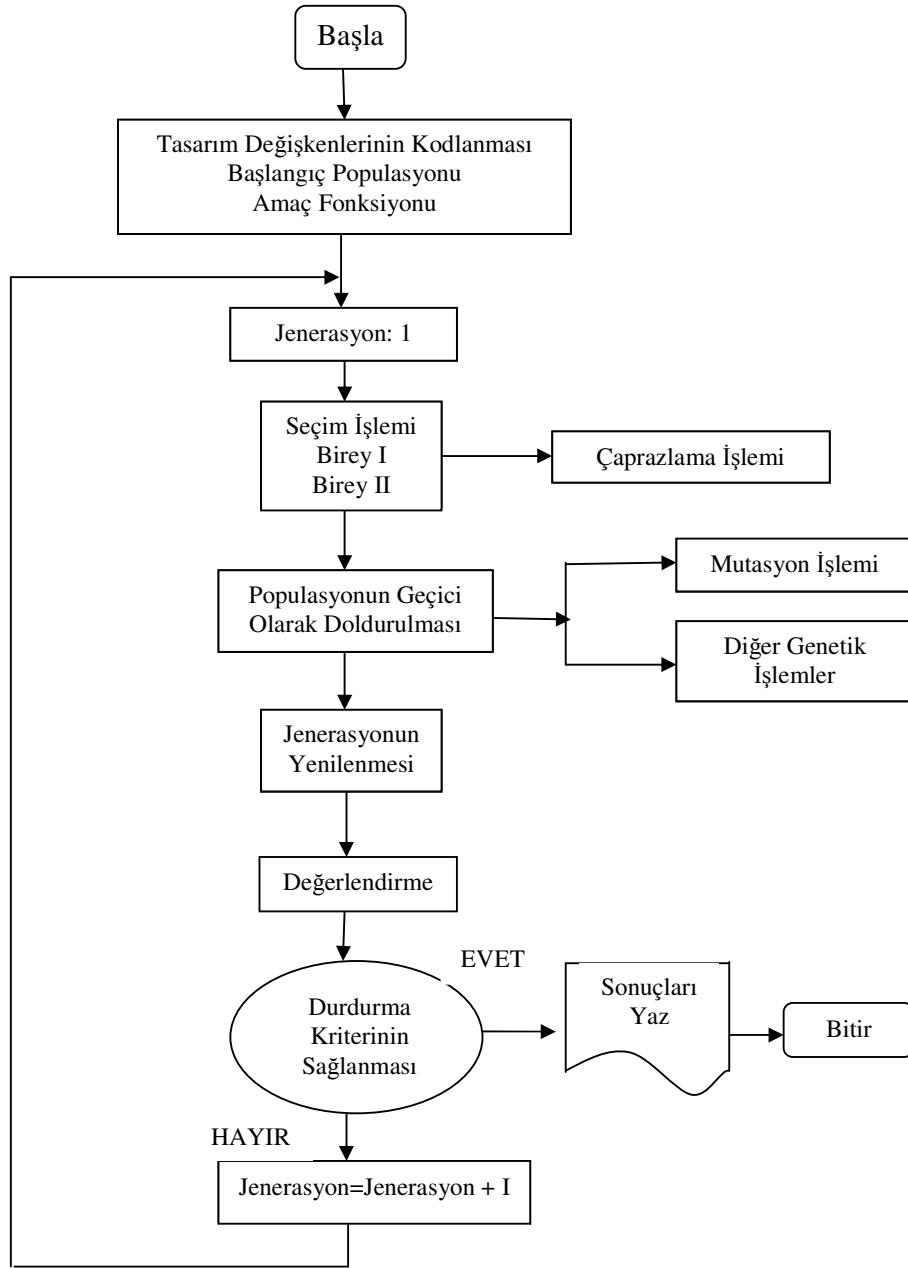
2.3.3 Genetik Algoritmanın İşlem Basamakları

Genetik algoritmalar doğal seçim ilkesine dayanan bir sayısal optimizasyon yöntemidir. Genetik algoritma, çözüm dizilerinden oluşan bir başlangıç nesliyle, çaprazlama ve mutasyon gibi doğal seçim operatörlerini kullanır (Papadrakakis and Lagaros 1994).

Genetik algoritmalar oldukça genel prensiplerle Şekil 2.6'da akış şemasında görüldüğü gibi çalışmaktadır. Öncelikle ele alınan problem için bir rastgele n kromozomlu popülasyon oluşturulur.

Daha sonra popülasyondaki her bir kromozom için $f(x)$ uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Yeni bir popülasyon oluşuncaya kadar aşağıdaki adımlar tekrar edilir.

- 1. Seleksiyon (Seçim):** İki ebeveyn kromozomun $f(x)$ 'e göre seçimi, burada uygunluk derecesi yüksek olanın seçilme şansı yüksektir.
- 2. Çaprazlama:** Yeni bir fert oluşturmak için ebeveynlerin bir çaprazlama olasılığına göre çaprazlanması. Eğer çaprazlama uygulanmazsa bireyler atalarının tamamen kopyası olacaklardır.
- 3. Mutasyon:** Kromozom üzerindeki bazı genlerin değerleri değiştirilerek nesillerin yozlaşması önlenir.
- 4. Ekleme:** Yeni bireyin yeni topluma eklenmesi.
- 5. Değiştirme:** Algoritmanın yeniden çalıştırılmasında oluşan yeni toplumun kullanılması.
- 6. Test:** Eğer sonuç tatmin ediliyorsa algoritmanın sona erdirilmesi ve son toplumun çözüm olarak sunulması.
- 7. Döngü:** 2. adıma geri dönülmesi (Ceylan ve Haldenbilen 2005)



Şekil 2.6 Genetik algoritma akış diyagramı

Genetik algoritmalarda kromozomlarla bir başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur. Burada popülasyon genişliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Büyük popülasyonlarda, çözüm uzayı iyi örneklendiği için aramanın etkinliği artmakta, fakat buna bağlı olarak da arama süresi uzamaktadır. Küçük popülasyonlarda ise, çözüm uzayını yeterli örnekleyememe ve zamansız yakınsama oluşabilmektedir (Bolat vd. 2004).

Genetik algoritmanın her çevriminde, yığındaki dizilerin bir değerlendirme fonksiyonu yardımıyla uygunluk değeri hesaplanır (Dengiz ve Altıparmak 1998). Uygunluk fonksiyonu her bir çözümün yeni nesil çözümlere katkı sağlayıp sağlamayacağına karar verir. Sonrasında insan üremesindeki gen transferine benzer operasyonlar kullanan algoritma yeni bir çözüm adayı popülasyonu oluşturur. Genellikle genetik algoritmaların başarısı bu fonksiyonun verimli ve hassas olmasına bağlıdır (Luger 2002).

2.3.4 Genetik Algoritma Operatörleri

Genetik algoritmanın en önemli işlemleri çaprazlama ve mutasyondur. Bu işlemler bir olasılık değeri ile uygulanır. Bir kromozom ikilik sayı düzeni ile aşağıdaki gibi temsil edilir:

Kromozom 1 : 110010100111011

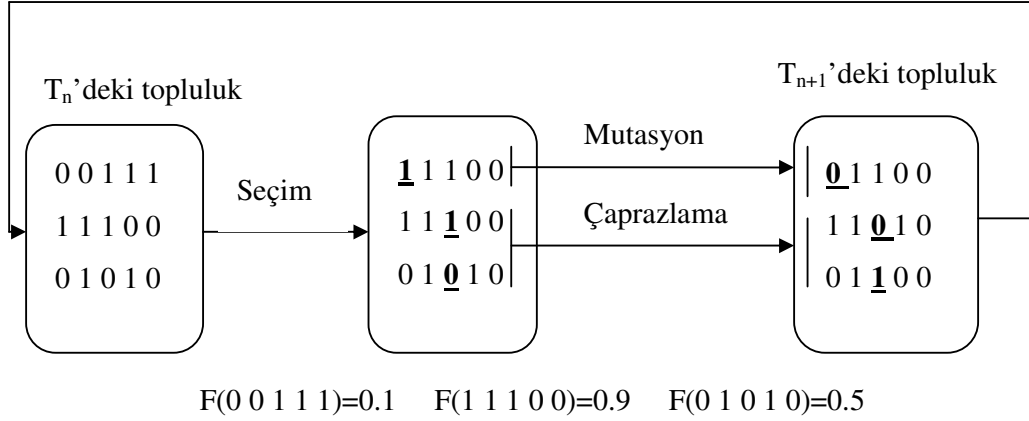
Kromozom 2 : 101100010101110

Kromozom temsil ettiği çözümle ilgili bilgiler içerir. Her kromozom ikili bir diziden oluşur. Dizi içerisindeki her bir sayıya bit adı verilir ve çözümün karakteristiğini temsil eder. Kromozomu ikili düzende sayılar dizisiyle ifade etmek daha çok tercih edilir fakat bunun yerine tamsayı ve reel sayılar da kullanılabilir. İkili düzenin tercih edilmesinin nedeni basit oluşu ve bilgisayar tarafından kolay ve hızlı bir şekilde işlenişidir.

2.3.4.1 Gen Havuzu

Gen havuzu, kromozomların uygunluklarının değerlendirilip kopyalama işleminin yapıldığı yerdir. Şekil 2.7’de gen havuzunda yapılan işlemler görülmektedir. Burada $F(00111)=0.1$, $F(11100)=0.9$, $F(01010)=0.5$, topluluğun uygunluk değerlerini göstermektedir. Bu topluluk içerisinde uygunluk değeri yüksek olan bireyler seçilerek, en yüksek uygunluklu birey, uygunluğu düşük olan bireyin yerini almaktadır.

Daha sonraki adımda ise ilk birey mutasyona uğratılmakta, ikinci ve üçüncü bireyler ise çaprazlama işlemine tabi tutulmaktadır. Bir sonraki adımda yeni bireyler oluşmaktadır. Bu işlemler daha önce verilmiş bir jenerasyon sayısına kadar veya topluluk artık başarıda artış sağlayamaz duruma gelinceye kadar devam etmektedir (Jeniciens 1993).



Şekil 2.7 Genetik algoritma işlemleri (Turgut ve Arslan 2001)

2.3.4.2 Seçim

Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra yeni popülasyonun oluşturulabilmesi için seçim yöntemine karar verilmesi gerekmekte ve yüksek uyuma sahip bireylerin seçilme olasılığı daha fazla olmaktadır. Seçim operatörleri ile tıpkı gerçek doğada olduğu gibi en iyilerin hayatta kalması sağlanmaktadır. Seçim operatörü ile seçilmiş olan bireyler çaprazlama havuzuna girmeye hak kazanırlarken seçilemeyen bireyler yok olmaktadır. Seçim yöntemi olarak geliştirilmiş bir çok yöntem bulunmaktadır.

Fakat rulet çemberi, turnuva ve elitist seçim yöntemleri en yaygın kullanılanlardır. Goldberg, turnuva, rulet çemberi gibi farklı seçim operatörlerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsetmiştir (Goldberg 1989).

Rulet emberi yöntemi ile üreme işlemi gerçekleştirilir. Bu seçim yönteminde tüm bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır ve bu değerler toplanır.

Tüm bireylerin uygunluk değerleri toplama bölünerek (0,1) aralığında sayılar elde edilir ve sayıların hepsi bir çizelgede toplanır. Çizelgedeki sayılar birbirine eklenerek rastgele olarak bir sayıya kadar ilerlenir ve bu sayıya ulaşıldığında son eklenen sayının ait olduğu çözüm seçilmiş olur (Yurtçu ve İçağa 2006).

Turnuva seçim yönteminde yerine koyarak ya da koymadan rastgele t adet birey seçilir ve bu büyüklüğe turnuva genişliği adı verilir. Bu gruptaki en iyi birey, yeni popülasyona kopyalanır. Bu işlem kullanıcı tarafından önceden kararlaştırılan çevrim sayısı kadar tekrarlanır. Elitist seçim yönteminde popülasyonun en iyi bir bireyi korunup, popülasyonun geri kalan elemanlarını uyum orantılı seçim yöntemlerinden birini kullanarak yeni bireyler ile değiştirilir. Burada hedef en iyi uyum değerine sahip bireyin, genetik operatörler kullanıldığında kaybolmasını önlemektir (Bolat vd. 2004).

2.3.4.3 Çaprazlama

Kromozomların nasıl temsil edileceğine karar verildikten sonra yapılan çaprazlama işlemine geçilir. Çaprazlama genetik algoritma uygulamalarında en önemli operatördür. Çaprazlama ile ebeveynlerden bazı genler alınarak yeni bireyler oluşturulur.

Ele alınan probleme bağlı olarak, kullanıcı tarafından seçilen 4 farklı çaprazlama operatörü bulunmaktadır.

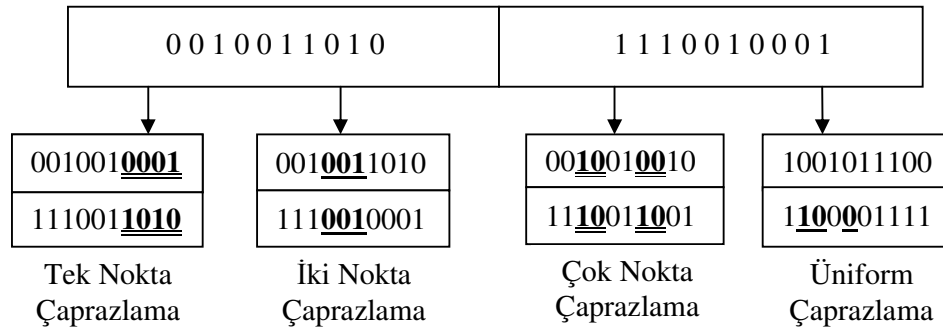
- Tek nokta aprazlama
- İki nokta çaprazlama
- Çok nokta aprazlama
- Uniform aprazlama (Cheng et al. 1999).

Çaprazlama operatörlerin uygulamaları aynı örnek üzerinde şekil 2.8' de görülmektedir. Tek nokta çaprazlama, genetik algoritmanın kullandığı en basit çaprazlamadır.

Rastgele seçilen kromozom çiftine çaprazlama uygulanır. Tek nokta çaprazlama işlemi için kromozomda çaprazlama yapılacak bölge kullanıcı tarafından rastgele seçilebilir. Oluşan yeni birey ebeveynlerin bazı özelliklerini alarak her ikisinin kopyası olacaktır (Eksin ve Erol 2001).

İki nokta çaprazlamada iki nokta arasında iki nokta arasında kalan alt dizilerin değiştirilmesiyle iki yeni birey elde edilir. Çok nokta çaprazlama yöntemi, iki nokta çaprazlamanın gelişmiş bir halidir. Kromozomlar daha fazla parçalara ayrılır ve bir atlanarak elde edilen çiftler arasında değiştirilerek yeni bireyler elde edilir. Üniform çaprazlamada rastgele olarak çaprazlama maskesi oluşturulur. Birinci ve ikinci kromozoma karşılık gelen genin kopyalanmasıyla oluşturulur. Çaprazlama maskesinde bir o genin birinci kromozomdan, sıfır ise o genin ikinci kromozomda kopyalanacağı anlamına gelmektedir (Yurtçu ve İçağa 2006).

İki kromozomdan çaprazlama yapılmış elemanlar, Şekil 2.8’de her bir çaprazlama operatörü için altı çizili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Çaprazlama yöntemleri ve etkileri (Bolat vd. 2004)

2.3.4.4 Mutasyon

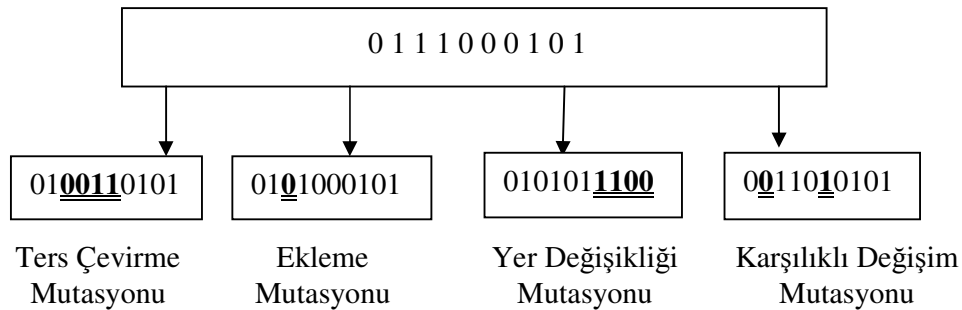
Çaprazlama işlemi gerçekleştirildikten sonra mutasyon işlemine geçilir. Mutasyon işlemi, oluşan yeni bireylerin önceki bireylere benzememesini ve sonuca daha hızlı ulaşılmasını hedefler.

İkili bir kodlamanın kullanıldığı bir dizide mutasyon operatörü ile rastgele olarak seçilen eleman değeri 1 ise 0 veya 0 ise 1 olarak değiştirilerek yeni bir dizi elde edilir. Mutasyon operatörü olarak, ele alınan problemin yapısına göre en uygun olan aşağıdakilerden biri seçilir.

- Ters çevirme
- Ekleme
- Yer değişikliği
- Karşılıklı değişim

Mutasyon operatörlerinin uygulamaları Şekil 2.9’da görülmektedir. Şekilde altı çizgili olarak verilen eleman değerleri mutasyona uğramış elemanları göstermektedir. Ters çevirmede, mutasyon için seçilen kromozomdan iki pozisyon rastsal olarak seçilir ve bu iki pozisyonundaki alt diziler ters çevrilir (Engin 2001).

Eklemede ise rastgele bir parka seçilir ve rastgele bir yere yerleştirilir. Yer değişikliği mutasyonunda, rastgele bir alt dizi seçilir ve rastgele bir yere yerleştirilir. Karşılıklı değişim mutasyonunda, rastgele seçilen iki genin yerleri değiştirilir.



Şekil 2.9 Mutasyon yöntemleri ve etkileri (Bolat vd. 2004)

2.3.4.5 Elitizm

Üreme, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden sonra en uygun birey sonraki kuşağa geçemeyebilir. Bu durumu önlemek için yapılan işlemlerden sonra bir önceki kuşağın en iyi (elit) bireyi, yeni kuşaktaki herhangi bir bireyle değiştirilir. Bu işleme elitizm adı verilir.

2.3.5 Genetik Algoritma Parametreleri

2.3.5.1 Popülasyon Büyüklüğü

Popülasyon büyüklüğü için seçilen değer, algoritmanın performansını iki şekilde etkilemektedir. Birincisi, popülasyon büyüklüğünün aşırı küçülmesi, araştırma uzayının yetersiz örneklenmesine sebep olacağından kontrollü ıraksamayı sağlamak zorlaşacak ve araştırma belirli bir alt optimal noktaya doğru sürüklenecektir. İkincisi, popülasyon için aşırı yüksek değer seçildiğinde, bir jenerasyonluk gelişim oldukça uzun süreye ihtiyaç duyacaktır. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı (real-time veya on-line) problem uygulamalarında hiç istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden popülasyon büyüklüğü için uygun bir değer belirlenmelidir (Goldberg 1989).

2.3.5.2 Çaprazlama Oranı

Bireylerin yeniden üretiminde popülasyon bireylerine uygulanacak çaprazlama operatörünün frekansını belirlemek amacıyla kullanılan bir parametredir. Düşük çaprazlama oranı yeni kuşağa çok az sayıda yeni bireyin geçmesine neden olur ve tekrar üreme (reproduction) operatörü çok etkili hale gelir. Bu durumda araştırmanın yakınsama hızı düşer. Yüksek çaprazlama oranı ise araştırma uzayının çok hızlı bir şekilde değerlendirilmesine neden olur. Böylelikle operatör benzer veya daha iyi bireyler üretmez, iyi bireyler hızlı bir şekilde kaybolur ve algoritmanın performansı düşer.

2.3.5.3 Mutasyon Oranı

Genetik algorithmadan iyi bir performans elde etmek için mutasyon operatörünün frekansı iyi kontrol edilmelidir. Mutasyon operatörü araştırma uzayına yeni bölgelerin girmesine yardımcı olur. Mutasyon oranının yüksek olması araştırmaya çok fazla rastgelelik katarak hızlı bir şekilde ıraksamaya sebep olur.

Yani popülasyonun gelişmesinden ziyade tahribatına yol açar. Bu durumun tam tersi düşük mutasyon oranı ise ıraksamayı aşırı düşürür ve araştırma uzayının tamamen değerlendirilmesini engeller. Dolayısıyla algoritmanın alt optimal çözümler bulmasına yol açar.

2.4 Genetik Algoritma Uygulama Alanları

Günümüzde genetik algoritmaların uygulama alanlarını deneysel, pratik ve sınıflandırıcı olmak üzere üç ana gruba ayırabiliriz.

2.4.1 Deneysel Uygulamalar

Mevcut diğer optimizasyon algoritmalarına göre genetik algoritmaların üstünlüğünü göstermek amacıyla belirli problemlerin çözümlerini bulmak için genetik algoritmaların kullanıldığı çalışmalardır.

Bu gruba örnek olarak; gezgin satıcı problemi (travelling salesman problem), kör knapsack problemi (blind knapsack problem), iki-kollu ve K kollu yol kesme (bandit) problemleri, grafik bölme problemi (graph partitioning problem) gibi çalışmalar gösterilebilir (Reeves 1995).

2.4.2 Pratik Uygulamalar

Genetik algoritmaların endüstri ve diğer gerçek problemlerin çözümlerinde kullanıldığı uygulamalardır.

Bu grup için; nümerik optimizasyon problemleri, çizelge problemleri (scheduling problems), yerleşim problemleri (layout problems) ve görüntü işleme (image processing) uygulamaları örnek olarak verilebilir (Davis 1991).

2.4.3 Sınıflandırıcı Sistem Uygulamaları

Bu grup, sınıflandırıcı sistem (classifier systems) uygulamalarını ihtiva eder. Bu sınıf genetik algoritmaların bilgi çıkarılması (knowledge induction) amacı için kullanıldığı çalışmaları içermektedir.

Bu gruptaki uygulamalar ise bir uzman sistemin bilgi tabanını oluşturan kuralları elde etmek için genetik algoritmaların kullanıldığı uygulamalardır (Reeves 1995).

3. BULGULAR

3.1 Giriş

Kompozit plaklar tabaka ya da katmanlar halinde çok sayıda kompozit yapının bir araya gelmesiyle oluşur. Endüstride kullanılan kompozit yapılar genelde tabakalar halinde karşımıza çıkar. Bu yapılara hava, uzay, marine, otomotiv ve savunma sanayi alanlarında rastlamak mümkündür. Kompozit tabaka matris ve fiberlerden oluşur. Fiberler çok küçük yapıya sahip malzemelerdir ve matrisle birleşerek kompozit tabakayı oluşturur. Matris ise fiberleri bir arada tutar, tabakadaki fiber yapıyı daha stabil ve uniform hale getirir. Kompozit yapı statik ve dinamik yükler altında kendisine gelen kuvvetleri matris yoluyla fiberlere iletir. Bir tabakanın fiber doğrultusundaki dayanımı maksimum iken, fiberlere dik doğrultudaki dayanımı minimumdur.

Kompozit malzeme tasarımcıları yukarıda bahsedilen durumları göz önünde bulundurarak, doğru sayıda tabaka ve doğru tabaka açılarını kullanıp istenilen performanslara sahip bir kompozit plak elde etmeyi amaçlarlar. Burada amaç hafiflik, daha az maliyet, daha az kalınlık olabilir. Dizayn değişkenleri olarak tabaka açıları, tabaka kalınlıkları kullanılmaktadır (Haftka 1997). Bununla ilgili literatür kısmında bahsettiğimiz çalışmalar mevcuttur.

Geçmişte tabakalı kompozit yapıların optimizasyonu sürekli optimizasyon teknikleriyle yapılmıştır. Tabaka açıları tasarım parametreleri olarak alınıp sürekli olan amaç fonksiyonu gradyan esaslı optimizasyon yöntemleriyle çözülmüştür. Bulunan tabaka açıları en yakın değere yuvarlatılarak imalat açısından pratik açılar elde edilmiştir. Fakat bu durumda amaç fonksiyonun gerçek sonuçları elde edilememekte veya kısıt fonksiyonları sağlanamamaktadır. Ayrıca gradyan esaslı optimizasyon tekniklerinde optimum değer genellikle başlangıç şartlarına bağlı olup bu noktaya yakın lokal noktalar bulunmaktadır. Global optimumun bulunması için farklı başlangıç değerleri alınır ve sonuca ulaşılması hedeflenir.

3.2 Optimizasyon Çalışmaları

Yapılan tez çalışmasında genetik algoritma yöntemi ile dört kenarından basit mesnetli tabakalı kompozit bir plağın rijitlik ve dayanım özelliklerini en iyi yapmak üzere farklı optimizasyon problemleri ele alınmıştır. Rijitlik ve burkulma optimizasyonu için grafit epoksi, dayanım optimizasyonu için cam epoksi malzemeden oluşan kompozit plaklar kullanılmıştır ve bu malzemelere ait özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Rijitlik ve dayanım optimizasyonu için belirlenen kompozit plağın fiber açıları üretim kolaylığı açısından 0_2 , $\pm 22.5^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 67.5^\circ$ ve 90_2 olarak belirlenmiş olup plak simetrik ve dengelidir. Tabaka açıları tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Dayanım optimizasyonu için kompozit plağın tabaka sayısı 48, burkulma optimizasyonu için 64’dür. Rijitlik optimizasyonu için ise 24 ve 48 tabakaya göre ayrı çalışmalar yapılmıştır. Her problem için kompozit malzemelere ait klasik formülasyonlarla yapılan çalışmaların yanı sıra laminasyon parametrelerini içeren formülasyonlar da kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmış ve sonuçları kıyaslanmıştır. Optimizasyon çalışmaları için Matlab programının genetik algoritma araç kutusundan faydalanılmıştır. Program arayüzü hakkında bilgiler Ek. 1’de verilmiştir. Optimizasyon çalışması sırasında kullanılan bilgisayar 2.53 Centrino 2 işlemci ve 4.0 GB Ram özelliklerine sahiptir.

Çizelge 3.1 Grafit epoksi ve cam epoksinin malzeme özellikleri

	Grafit Epoksi	Cam Epoksi
Elastik Modül, E_1 , GPa (Psi)	150.3 (2.18×10^7)	69 (100.07×10^5)
Elastik Modül E_2 , GPa (Psi)	9.514 (1.38×10^6)	10 (1.45×10^6)
Kayma Modülü G_{12} , GPa(Psi)	1.068 (1.55×10^5)	4.5 (6.52×10^5)
Poisson Oranı	0.26	0.31
Malzeme Sabiti U_1 , GPa (Psi)	61.342 (0.8897×10^7)	31.58 (4.58×10^6)
Malzeme Sabiti U_2 , GPa (Psi)	70.698 (1.0254×10^7)	27.91 (4.05×10^6)
Malzeme Sabiti U_3 , GPa (Psi)	18.905 (0.2742×10^7)	6.48 (9.39×10^5)
Malzeme Sabiti U_4 , GPa (Psi)	21.394 (0.3103×10^7)	9.63 (1.39×10^6)
Malzeme Sabiti U_5 , GPa (Psi)	19.974 (0.2897×10^7)	10.98 (1.59×10^6)
Kalınlık h , m (in)	0.00508 (0.2)	0.02 (0.787402)

3.2.1 Rijitlik Optimizasyonu Çalışması

Yapılan çalışmada dört kenarından basit mesnetli, tabakalı kompozit bir plağın rijitliği optimize edilmektedir. Simetrik yapıdan dolayı GA da genetik diziliş sadece plağın yarısını temsil etmektedir. Dizilişteki her bir gen tabakaların açılarına karşılık gelen reel veya doğal sayılardır. Plakada 48 tabaka olmakla birlikte, simetrik tabakalama ile parametre sayısı 24'e ve tabaka açılarının aynı ikili gruplardan oluşması ile 12'ye ($n=12$) düşmektedir. Bu durum 24 tabakalı plak için de geçerlidir.

Rijitlik optimizasyonu için daha önce literatürde ele alınan bir plak seçilmiştir. Plak, kalınlığı 5,08 mm olup grafit epoksiden yapılmıştır (Grosset et al. 2006).

Genetik algoritma parametreleri için bir ön çalışma yapılmış olup popülasyon büyüklüğü 30, stokastik seçim, elit birey sayısı 0, çaprazlama olasılığı 1.0 ve two-point, mutasyon uniform ve mutasyon oranı ise 0.02 olarak alınmıştır.

Rijitlik optimizasyonu çalışmasında amaç, efektif Poisson oranı v_{eff} kısıtına bağlı olarak rijitlik katsayıları olan A_{11} ve A_{22} 'yi maksimum yapmaktır. Düzlem içi laminasyon parametrelerine bağlı olarak A_{11} ve A_{22} rijitlik katsayıları denklem (3.1)'deki gibi yazılabilir.

$$A_{11} = h(U_1 + V_1^*U_2 + V_2^*U_3) \quad (3.1)$$

$$A_{22} = h(U_1 - V_1^*U_2 + V_2^*U_3)$$

V_1 ve V_2 düzlem içi laminasyon parametrelerine bağlı olarak efektif Poisson oranı (3.2) denkleminde bulunabilmektedir (Grosset et al. 2006).

$$v_{eff} = \frac{A_{12}}{A_{22}} = \frac{U_4 - U_3 \cdot V_2}{U_1 - U_2 \cdot V_1 + U_3 \cdot V_2} \quad (3.2)$$

Bu çalışma kapsamında efektif Poisson oranı (v_{eff}), $v_l \leq v_{eff} \leq v_u$ olarak kısıtlanmış olup $v_l = 0.48$ ve $v_u = 0.52$ 'dir. Kısıt fonksiyonuna bağlı olarak amaç fonksiyonları (3.3) denkleminde verilmiştir (Grosset et al. 2006).

(i)

$$\text{maksimum } F(\theta) = \begin{cases} A_{11} & g(\theta) \geq 0 \\ A_{11} + p \cdot g(\theta) & g(\theta) < 0 \end{cases} \text{ ise} \quad (3.3)$$

(ii)

$$\text{maksimum } F(\theta) = \begin{cases} A_{22} & g(\theta) \geq 0 \\ A_{22} + p \cdot g(\theta) & g(\theta) < 0 \end{cases} \text{ ise}$$

$$g(\theta) = \min \left(\frac{v_{eff}}{v_l} - 1, 1 - \frac{v_{eff}}{v_u} \right)$$

Ceza parametresi değeri $p = 5 \times 10^6$ olarak belirlenmiştir.

Bu problem öncelikle laminasyon parametrelerini kapsayan formülasyonlarla çözülmüş olup 24 (n=6) ve 48 (n=12) tabaka için sonuçlar elde edilmiştir. Her optimizasyon için GA bağımsız olarak 50 kere çalıştırılmıştır ve literatür sonuçlarıyla kıyas yapılacağı için sonuçlar lb/in. cinsinden hesaplanmıştır.

3.2.1.1 Klasik Kompozit Plak Denklemleriyle Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmada rijitlik optimizasyonu problemi klasik rijitlik denklemleriyle çözülmüştür. Optimum amaç fonksiyonu A_{11} ve efektif poisson oranları sonuçları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi tabaka sayısı ile amaç fonksiyonu (maksimum A_{11}) doğru, efektif poisson oranı (v_{eff}) ise ters orantılıdır.

Çizelge 3.2 Klasik denklemlerle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçlar (maksimum A_{11})

	A_{11}		
	$F(\theta)$ (lb/in.)	v_{eff}	Fiber Açılar Konfigürasyonu
n=6	3.688×10^6	0.572	$[/\pm 22.5/0_{10}]_s$
n=12	3.704×10^6	0.475	$[0_8/\pm 22.5_2/0_6/\pm 22.5/0_2/\pm 67.5]_s$

Çizelge 3.3’de optimum amaç fonksiyonu A_{22} , efektif poisson oranları ve imalat kolaylığı açısından optimum fiber açıları konfigürasyonu literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optimum noktayı bulma açısından farksız, bulunan fiber açıları konfigürasyonu bakımından farklıdır. Konfigürasyonların farklı çıkması popülasyon büyüklüğü ile alakalıdır. Çünkü popülasyonun daha büyük olması alternatif konfigürasyon sayısını da arttıracaktır.

Çizelge 3.3 Klasik denklemlerle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçların literatürle karşılaştırılması (maksimum A_{22})

	n=6	n=12
$F(\theta)$ (lb/in.)	1.897×10^6	1.922×10^6
$F(\theta)$ (Grosset et al.2006)	1.897×10^6	1.922×10^6
v_{eff}	0.519	0.489
v_{eff} (Grosset et al. 2006)	0.519	0.489
Fiber Açılar Konfigürasyonu	$[\pm 67.5_2/\pm 45_4]_s$	$[90_2/\pm 67.5/\pm 45_8/\pm 67.5_2]_s$
Fiber Açılar Konfg. (Grosset et al. 2006)	$[\pm 45_4/\pm 67.5_2]_s$	$[\pm 45_9/\pm 67.5/90_4]_s$

Çalışmada popülasyon büyüklüğünün ortalama CPU zamanına olan etkisi araştırılmıştır. Farklı popülasyon büyüklüklerine göre, bulunan ilk 10 optimum değer için ortalama CPU zamanı ve bulunan farklı konfigürasyon sayısı Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Popülasyon büyüklüğünün ortalama CPU zamanına etkisi (maksimum A_{22})

Popülasyon Büyüklüğü	n=6		n=12	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[30]	7.25	33 (15)	9.24	12 (12)
[60]	9.41	48 (15)	11.26	36 (33)
[90]	11.29	49 (15)	14.22	48 (42)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Çizelge 3.4’de belirtilen sonuçlar GA’nın bağımsız şekilde 50 defa çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Görüldüğü gibi popülasyon büyüklüğünün artması işlemci zamanını arttırması bakımından dezavantaj olsa da daha fazla global optimum noktayı yakalaması için avantajdır.

Elit bireyler elde etmek amacıyla ikili popülasyon grupları oluşturulmuş ve bireylerin birinden diğerine göç etmesine (migration) izin verilmiştir. Bu çalışma için de ortalama CPU zamanı hesaplanmış olup 24 ve 48 tabaka için sonuçlar Çizelge 3.5’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.5 İkili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisi (maksimum A_{22})

Popülasyon Grupları	n=6		n=12	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[20, 20]	9.27	35 (14)	9.57	28 (25)
[20, 30]	10.08	43 (15)	10.21	33 (29)
[20, 40]	11.32	47 (15)	12.33	38 (33)
[30, 30]	11.56	47 (15)	12.49	40 (35)
[30, 40]	12.09	48 (15)	15.29	38 (34)
[40, 40]	12.51	50 (15)	20.16	42 (39)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Popülasyon grubu oluşturmak optimum sonuçlar elde etmek açısından avantajlı olsa da zaman bakımından dezavantajdır. Çizelge 3.5’de görüldüğü gibi tabaka sayısı ve popülasyon grupları arttıkça programın işlemci zamanı da artmaktadır.

Toplam tabaka sayısı 24 ve 48 olduğu durumlarda algoritmayı 50 kere çalıştırma için bulunan optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu imalat kolaylığı açısından Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de sıralanmıştır.

Çizelge 3.6 n=6 için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (maksimum A_{22})

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfigürasyon sayısı	A_{22}
$[\pm 67.5_2/\pm 45_4]_s$	8	1.897×10^6
$[\pm 45_4/\pm 67.5_2]_s$	3	1.897×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45_4/\pm 67.5]_s$	5	1.897×10^6
$[\pm 45_3/\pm 67.5_2/\pm 45]_s$	3	1.897×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	3	1.897×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5_2/\pm 45_2]_s$	2	1.897×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5_2/\pm 45_3]_s$	1	1.897×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	2	1.897×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_2]_s$	5	1.897×10^6
$[\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5]_s$	4	1.897×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5]_s$	2	1.897×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5]_s$	1	1.897×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45]_s$	3	1.897×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_2]_s$	5	1.897×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45]_s$	3	1.897×10^6

Çizelge 3.7 n=12 için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (maksimum A_{22})

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfg. sayısı	A_{22}
$[90_2/\pm 67.5/\pm 45_8/\pm 67.5_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_4/90_2/\pm 67.5_3/\pm 45_4]_s$	1	1.922×10^6
$[90_2/\pm 67.5_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_7]_s$	2	1.922×10^6
$[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 67.5/\pm 45_7]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 67.5_2/\pm 45_2/90_2/\pm 67.5/\pm 45_6]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45_6/\pm 67.5_3/\pm 45/90_2/\pm 45]_s$	4	1.922×10^6
$[\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45_5/90_4/\pm 45]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5_2/\pm 45_6/90_2/\pm 67.5]_s$	1	1.922×10^6
$[90_2/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45_5/\pm 67.5]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 67.5_2/\pm 45_4/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_5/\pm 67.5_2/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45/90_2]_s$	3	1.922×10^6
$[\pm 45_3/90_2/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_4/90_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5_2/90_2/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45_4/90_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_4/\pm 67.5_2/\pm 45_3/90_2]_s$	1	1.922×10^6
$[90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_4/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 67.5/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45_4]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45_4/\pm 67.5/\pm 45_3/90_2/\pm 67.5/\pm 45]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_4/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3/90_2/\pm 67.5]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_3/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5_2/\pm 45_3]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/90_2/\pm 45_5/\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45_5]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45_2/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_4]_s$	1	1.922×10^6

Çizelge 3.7 (Devam) n=12 için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu
(maksimum A_{22})

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfg. sayısı	A_{22}
$[\pm 45_5/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45]_s$	3	1.922×10^6
$[\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5]_s$	3	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/\pm 67.5]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_4/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/90_2/\pm 45_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_4/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_3/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45]_s$	3	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_3/90_2/\pm 45]_s$	1	1.922×10^6

3.2.1.2 Laminasyon Parametreleri Denklemleriyle Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmada ise rijitlik optimizasyonu problemi laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerle çözülmüştür. Optimum amaç fonksiyonu A_{11} ve efektif poisson oranları sonuçları Çizelge 3.8’de gösterilmiştir. Çizelge 3.8’de görüldüğü gibi tabaka sayısı ile amaç fonksiyonu (maksimum A_{11}) doğru, efektif poisson oranı (ν_{eff}) ise ters orantılıdır. Elde edilen sonuçlar klasik denklemlerle elde edilen sonuçlarla aynıdır.

Çizelge 3.8 Laminasyon parametreleriyle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için
optimum sonuçlar (maksimum A_{11})

	A_{11}		
	$F(\theta)$ (lb/in.)	ν_{eff}	Fiber Açılar Konfigürasyonu
n=6	3.688×10^6	0.572	$[0_{10}/\pm 22.5]_s$
n=12	3.704×10^6	0.475	$[\pm 22.5/0_{10}/\pm 22.5_2/0_6/\pm 67.5]_s$

Çizelge 3.9’da optimum amaç fonksiyonu A_{22} , efektif poisson oranları ve imalat açısından en kolay fiber açıları konfigürasyonu literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optimum noktayı bulma açısından farksız, bulunan fiber açıları konfigürasyonu bakımından farklıdır. Konfigürasyonların farklı çıkması popülasyon büyüklüğü ile alakalıdır. Çünkü popülasyonun daha büyük olması alternatif konfigürasyon sayısını da arttıracaktır.

Çizelge 3.9 Laminasyon parametreleri denklemleriyle hesaplanan rijitlik optimizasyonu için optimum sonuçların literatürle karşılaştırılması (maksimum A_{22})

	n=6	n=12
$F(\theta)$ (lb/in.)	1.897×10^6	1.922×10^6
$F(\theta)$ (Grosset et al. 2006)	1.897×10^6	1.922×10^6
ν_{eff}	0.519	0.489
ν_{eff} (Grosset et al. 2006)	0.519	0.489
Fiber Açıları Konfigürasyonu	$[\pm 67.5_2 / \pm 45_4]_s$	$[90_2 / \pm 45_4 / \pm 67.5 / \pm 45_5 / 90_2]_s$
Fiber Açıları Konfg. (Grosset et al. 2006)	$[\pm 45_4 / \pm 67.5_2]_s$	$[\pm 45_9 / \pm 67.5 / 90_4]_s$

Çalışmada popülasyon büyüklüğünün ortalama CPU zamanına olan etkisi araştırılmıştır. Farklı popülasyon büyüklüklerine göre, bulunan ilk 10 optimum değer için ortalama CPU zamanı ve bulunan farklı konfigürasyon sayısı Çizelge 3.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10 Popülasyon büyüklüğü ve ortalama CPU zamanı ilişkisi (maksimum A_{22})

Popülasyon Büyüklüğü	n=6		n=12	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[30]	3.47	39 (15)	5.44	20 (14)
[60]	5.28	50 (15)	6.51	40 (35)
[90]	8.52	50 (15)	9.42	45 (43)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Çizelge 3.10’da belirtilen sonuçlar GA’nın bağımsız şekilde 50 defa çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Görüldüğü gibi popülasyon büyüklüğünün artması işlemci zamanını arttırsa da daha fazla global optimum noktayı yakalaması açısından avantajdır.

Ayrıca bu çalışmada elit bireyler elde etmek amacıyla ikili popülasyon grupları oluşturulmuş ve bireylerin birinden diğerine göç etmesine (migration) izin verilmiştir. Bu çalışma için de ortalama CPU zamanı hesaplanmış olup 24 ve 48 tabaka için sonuçlar Çizelge 3.11’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.11 İkili popülasyon grupları ve ortalama CPU zamanı ilişkisi (maksimum A_{22})

Popülasyon Grupları	n=6		n=12	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[20, 20]	7.29	41 (14)	8.14	26 (27)
[20, 30]	9.58	47 (15)	10.04	31 (30)
[20, 40]	10.17	48 (15)	10.48	33 (32)
[30, 30]	10.53	47 (15)	11.25	41 (38)
[30, 40]	11.43	49 (15)	14.56	35 (34)
[40, 40]	12.23	49 (15)	18.81	45 (44)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Popülasyon grubu oluşturmak optimum sonuçlar elde etmek açısından avantajlı olsa da zaman bakımından dezavantajdır. Çizelge 3.11’de görüldüğü gibi tabaka sayısı ve popülasyon büyüklüğü arttıkça programın işlemci zamanı da artmaktadır.

Toplam tabaka sayısı 24 ve 48 olduğu durumlarda algoritma 50 kere çalıştırılmış ve bulunan optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu imalat kolaylığı açısından Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’de sıralanmıştır.

Çizelge 3.12 n=6 için optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (maksimum A_{22})

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfigürasyon sayısı	A_{22}
$[\pm 67,5_2/\pm 45_4]_s$	6	1.897×10^6
$[\pm 45_4/\pm 67,5_2]_s$	2	1.897×10^6
$[\pm 45_3/\pm 67,5_2/\pm 45]_s$	4	1.897×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67,5_2/\pm 45_2]_s$	3	1.897×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5_2/\pm 45_3]_s$	3	1.897×10^6
$[\pm 67,5/\pm 45_4/\pm 67,5]_s$	1	1.897×10^6
$[\pm 67,5/\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_3]_s$	7	1.897×10^6
$[\pm 67,5/\pm 45_2/\pm 67,5/\pm 45_2]_s$	7	1.897×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67,5/\pm 45/\pm 67,5/\pm 45]_s$	10	1.897×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_2]_s$	7	1.897×10^6

Çizelge 3.13 n=12 için optimum fiber tasarım açıları konfigürasyonu (maksimum A_{22})

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfigürasyon sayısı	A_{22}
$[90_2/\pm 45_4/\pm 67,5/\pm 45_5/90_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 67,5/\pm 45/90_2/\pm 45_7/\pm 67,5_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_2/90_4/\pm 45_4/\pm 67,5/\pm 45_3]_s$	4	1.922×10^6
$[\pm 45_2/90_2/\pm 45/\pm 67,5_3/\pm 45_5]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5_2/\pm 45_7/\pm 67,5/90_2]_s$	1	1.922×10^6
$[90_2/\pm 45_2/\pm 67,5/\pm 45/90_2/\pm 45_6]_s$	2	1.922×10^6
$[\pm 67,5/\pm 45_4/\pm 67,5/\pm 45_4/90_2/\pm 67,5]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/\pm 67,5_2/\pm 45_3/\pm 67,5]_s$	3	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67,5/\pm 45_3/\pm 67,5_2/\pm 45_3/90_2]_s$	3	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_2/90_2/\pm 45_6/90_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5_2/\pm 90_2/\pm 45_5/\pm 67,5/\pm 45_2]_s$	1	1.922×10^6
$[\pm 45/90_2/\pm 45_4/\pm 67,5/\pm 45_4/90_2]_s$	1	1.922×10^6

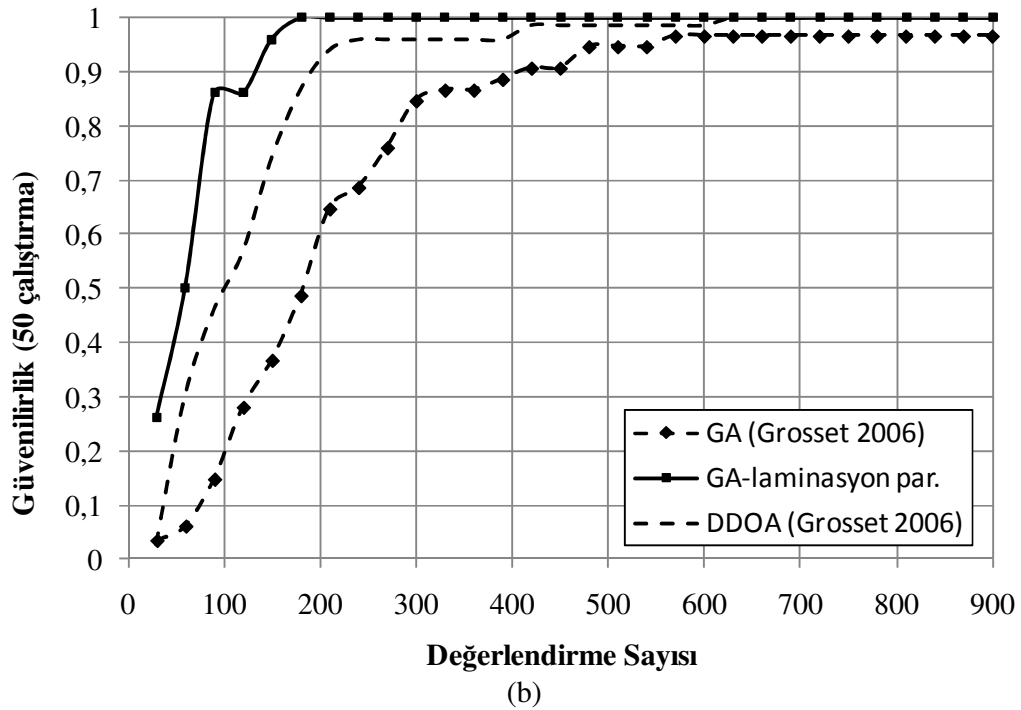
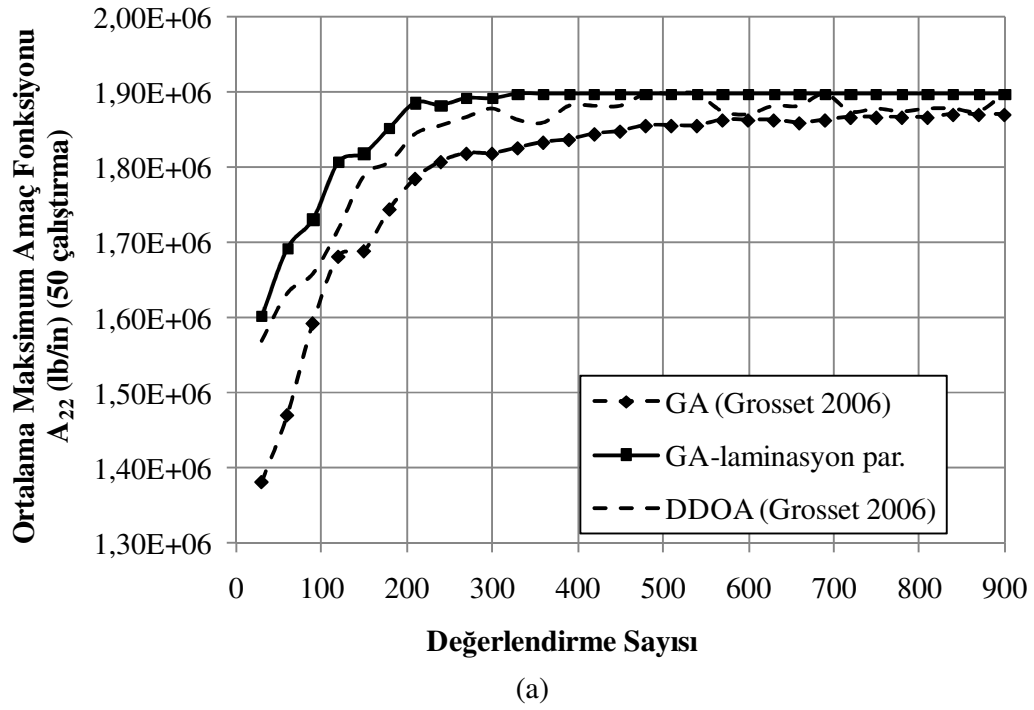
Çizelge 3.13 (Devam) n=12 için optimum fiber açıları konfigürasyonu (maksimum A_{22})

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfg. sayısı	A_{22}
$[\pm 45/90_2/\pm 45/\pm 67,5/90_2/\pm 45_7]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_4/90_2/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45_2/\pm 67.5_2/\pm 45_3]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45_4/90_2/\pm 67.5/\pm 45_2/\pm 67.5]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45/90_2/\pm 45/\pm 67,5_2/\pm 45_5]_s$	50(1)	1.922×10^6
$[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/\pm 67,5/\pm 45_3]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	50(1)	1.922×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_5]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45_3/90_2/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45_3]_s$	50(1)	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45/90_2/\pm 45_5/\pm 67,5/\pm 45/\pm 67,5]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_3/90_2/\pm 45_3/\pm 67,5]_s$	50(1)	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_3/\pm 67,5/90_2/\pm 45_2/\pm 67,5/\pm 45_2]_s$	50(1)	1.922×10^6
$[\pm 45/90_2/\pm 67,5/\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_5/\pm 67,5/\pm 45]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45_2/\pm 67.5/\pm 45/90_2/\pm 45_3/\pm 67.5/\pm 45/\pm 67.5/\pm 45]_s$	50(2)	1.922×10^6
$[\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_2/90_2/\pm 45/\pm 67,5/\pm 45_2/\pm 67,5/\pm 45_2]_s$	50(2)	1.922×10^6

Bu çalışmayı karşılaştırmak için aynı problemi UMDA (Tek Değişkenli Marjinal Dağılım Algoritması), DDOA (Çift Dağılım İstatistiksel Algoritma) ve GA (Genetik Algoritma) gibi 3 farklı algoritma ile çözen başka bir çalışma (Grosset et al. 2006) referans olarak alınmıştır. Fakat kıyaslama açısından DDOA ve GA ile yapılan optimizasyonlar göz önüne alınmıştır. Şekil 3.1’de literatür sonuçları ile bu çalışmadan elde edilen GA sonuçları grafik halinde gösterilmiştir.

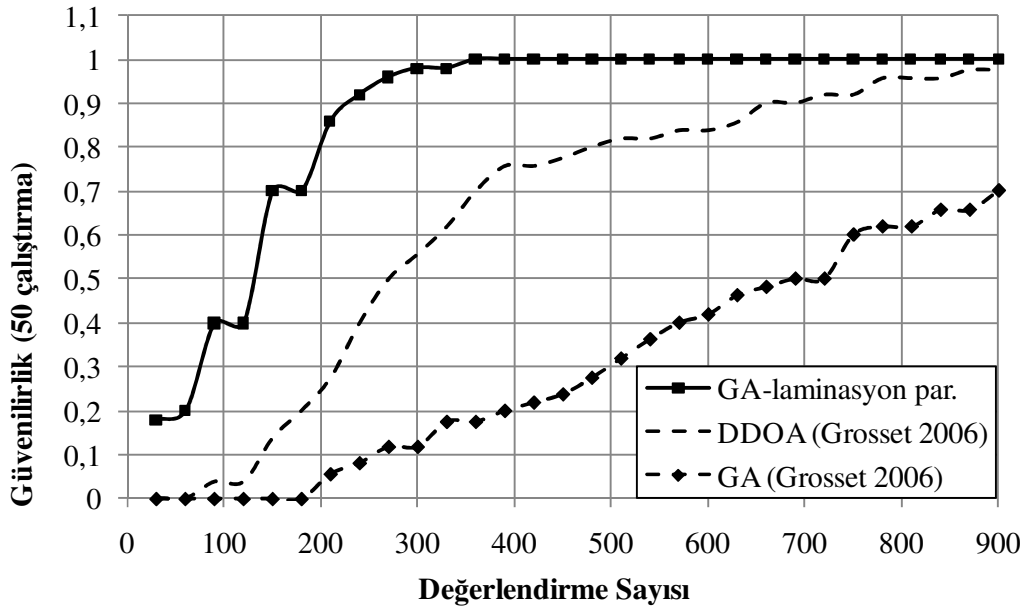
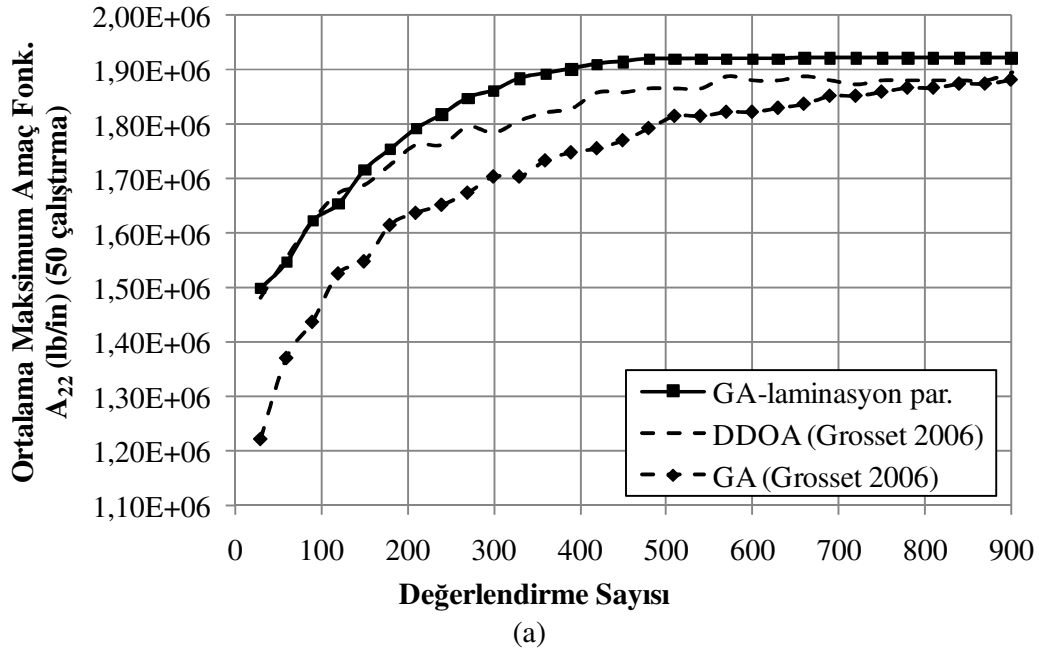
Şekil 3.1(a)'da grafiğin yatay eksenini olan değerlendirme sayısı GA için kullanılan popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısının çarpımı olarak ifade edilir. Grafiğin dikey eksenini ise maksimum amaç fonksiyonunun ortalamasıdır. Şekilden de görüldüğü gibi algoritmaların başlangıç noktaları optimum noktadan uzaktır fakat literatür GA başlangıç noktası ile bu çalışmanın GA başlangıç noktasını kıyaslırsak bu çalışmanın GA başlangıç noktasının daha yüksek olduğu görülecektir. Ayrıca bu çalışmanın GA sonuçları optimum noktayı erken yakalama açısından daha iyidir. Çünkü bu GA çalışması optimum noktayı 360 değerlendirmede yakalarken DDOA 480 değerlendirmede ve literatür GA çalışması ise optimum olmayan yakın bir noktayı 840 değerlendirmede bulmaktadır.

Şekil 3.1(b)'de ise grafiğin dikey eksenini algoritmanın güvenilirliğini temsil etmektedir. Başka bir deyişle her bir jenerasyonda optimum noktayı yakalama ortalamasıdır. Şekil 3.1(b)'de görüldüğü gibi algoritmaların ilk jenerasyonlarda optimum noktayı bulma ihtimalleri düşüktür. Başlangıç noktası olarak bu GA çalışmasının diğer algoritmalarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum mevcut GA'nın optimum noktayı bulma olasılığının ilk jenerasyondan itibaren diğerlerinden fazla olduğunu gösterir. Nitekim bu GA çalışması 6. jenerasyondan itibaren 50 kere çalıştırmanın her seferinde optimum noktayı bulmuştur. Bu durum DDOA için 21. jenerasyondan itibaren başlamaktadır. Literatür GA çalışması ise çalıştırmaların bazılarında optimum noktayı yakalasa bile 50 defa çalıştırmanın hepsinde yakalayamamıştır. Bu durumda bu tez çalışmasındaki GA'nın güvenilirliği %83.3 iken DDOA'nın %33.3'dür.



Şekil 3.1 n=6 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maksimum A_{22})

Şekil 3.2 ise $n=12$ için optimizasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.2 (a)'da bu GA çalışması başlangıç olarak optimumdan uzak noktalar olsa da diğer algoritmalarından daha önce doğru sonuca ulaşmıştır. Nitekim 50 çalıştırmanın hepsinde 18. jenerasyondan itibaren optimum nokta bulunmuştur. Bu problem için optimum noktaya %99 yakın noktalar da optimum kabul edilmiştir.



Şekil 3.2 $n=12$ için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maks. A_{22})

3.2.1.3 İki Yöntemin Karşılaştırılması

Klasik rijitlik denklemleri ile laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerden alınan sonuçlar kıyaslanmıştır. Optimum amaç fonksiyonları, efektif poisson oranları ve optimum fiber açıları konfigürasyonu sonuçları Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.14 Rijitlik optimizasyonu için iki yöntemin karşılaştırılması (maksimum A_{11})

		$F(\theta)$ (lb/in.)	ν_{eff}	Fiber Açıları Konfigürasyonu
n=6	Klasik denk.	3.688×10^6	0.572	$[\pm 22.5/0_{10}]_s$
	Laminasyon par.	3.688×10^6	0.572	$[0_{10}/\pm 22.5]_s$
n=12	Klasik denk.	3.704×10^6	0.475	$[0_8/\pm 22.5_2/0_6/\pm 22.5/0_2/\pm 67.5]_s$
	Laminasyon par.	3.704×10^6	0.475	$[\pm 22.5/0_{10}/\pm 22.5_2/0_6/\pm 67.5]_s$

Çizelge 3.15 Rijitlik optimizasyonu için iki yöntemin karşılaştırılması (maksimum A_{22})

		$F(\theta)$ (lb/in.)	ν_{eff}	Fiber Açıları Konfigürasyonu
n=6	Klasik denk.	1.897×10^6	0.519	$[\pm 67.5_2/\pm 45_4]_s$
	Laminasyon par.	1.897×10^6	0.519	$[\pm 67.5_2/\pm 45_4]_s$
n=12	Klasik denk.	1.922×10^6	0.489	$[90_2/\pm 67.5/\pm 45_8/\pm 67.5_2]_s$
	Laminasyon par.	1.922×10^6	0.489	$[90_2/\pm 45_4/\pm 67.5/\pm 45_5/90_2]_s$

Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15’de görüldüğü gibi klasik rijitlik denklemleri ve laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerden alınan sonuçlar aynıdır. İki yöntem, farklı popülasyon gruplarının işlemci zamanına olan etkisi bakımından kıyaslanmış 24 ve 48 tabakaya göre sonuçlar Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de verilmiştir. Ayrıca algoritmayı 50 çalıştırma için elde edilen global optimum sayısı ve farklı fiber açıları konfigürasyonu sayısı Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.16 İki yöntemin ortalama CPU zamanı açısından karşılaştırılması (maks. A_{22})

Popülasyon Büyükliği	n=6			
	Klasik Denklemler		Laminasyon Param. Denklemleri	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[30]	7.25	33 (15)	3.47	39 (15)
[60]	9.41	48 (15)	5.28	50 (15)
[90]	11.29	49 (15)	8.52	50 (15)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Çizelge 3.17 İki yöntemin ortalama CPU zamanı açısından karşılaştırılması (maks. A_{22})

Popülasyon Büyükliği	n=12			
	Klasik Denklemler		Laminasyon Param. Denklemleri	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[30]	9.24	12 (12)	5.44	20 (14)
[60]	11.26	36 (33)	6.51	40 (35)
[90]	14.22	48 (42)	9.42	45 (43)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de görüldüğü gibi laminasyon parametrelerini kullanarak elde edilen denklemlerle yapılan optimizasyon çalışmaları bize hem zamandan avantaj sağlar hem de daha fazla optimum sonuca ulaştırır. İkili popülasyon grupları oluşturularak yapılan optimizasyon çalışmaları 24 ve 48 tabakaya göre Çizelge 3.18 ve Çizelge 3.19’da belirtilmiştir.

Çizelge 3.18 24 tabaka için ikili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisinin iki yöntemle karşılaştırılması (maksimum A_{22})

Popülasyon Grupları	n=6			
	Klasik Denklemler		Laminasyon Param. Denklemleri	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[20, 20]	9.27	35 (14)	7.29	41 (14)
[20, 30]	10.08	43 (15)	9.58	47 (15)
[20, 40]	11.32	47 (15)	10.17	48 (15)
[30, 30]	11.56	47 (15)	10.53	47 (15)
[30, 40]	12.09	48 (15)	11.43	49 (15)
[40, 40]	12.51	50 (15)	12.23	49 (15)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

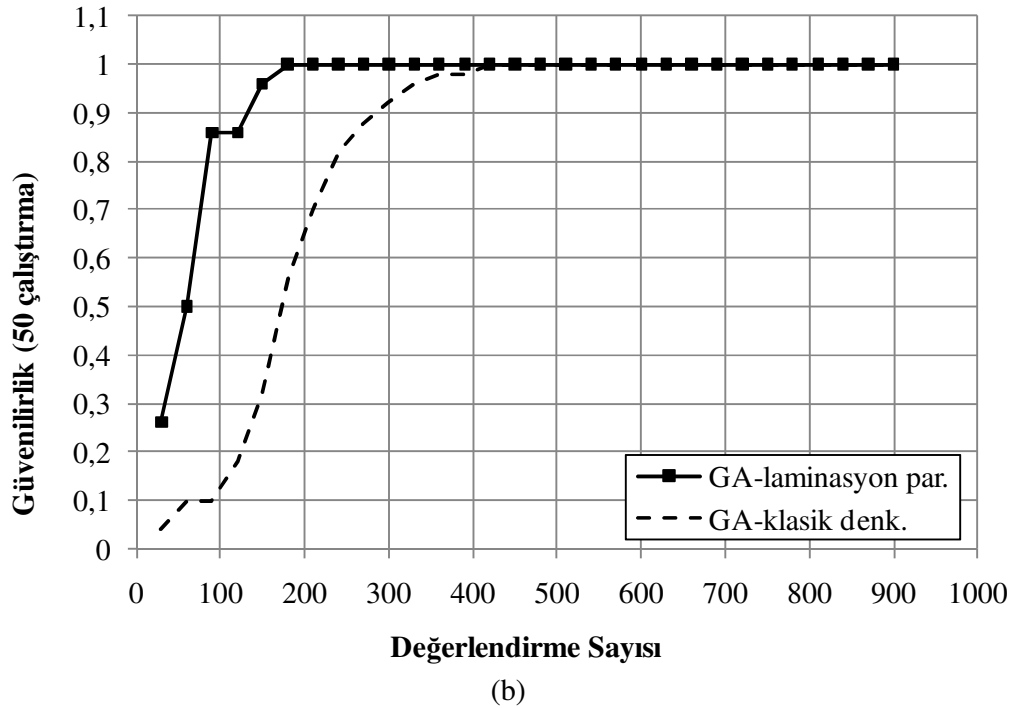
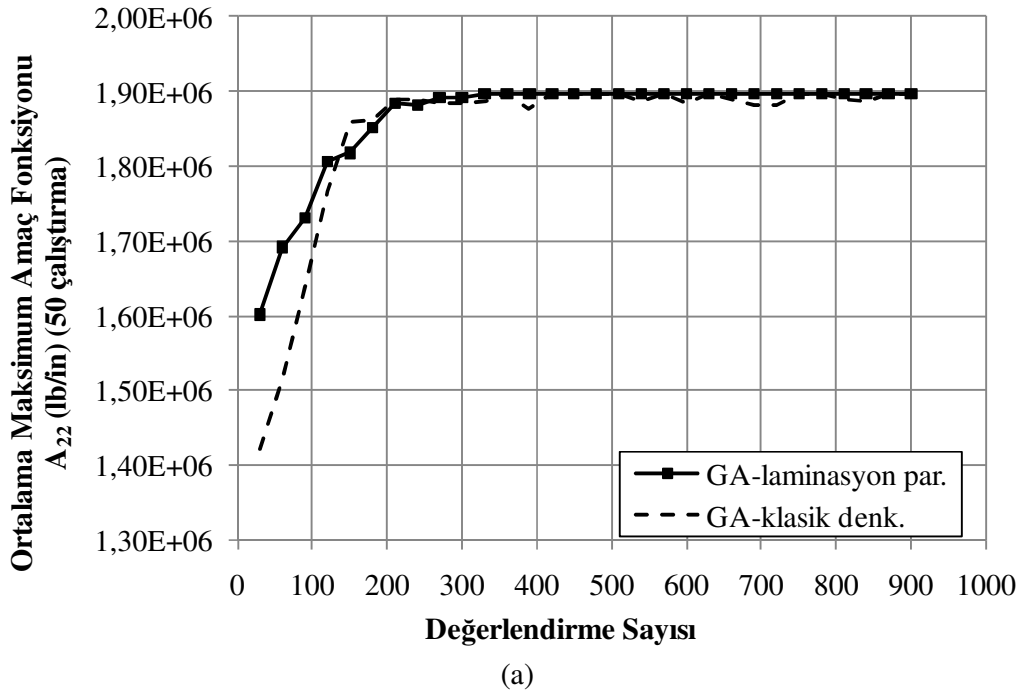
Çizelge 3.19 48 tabaka için ikili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisinin iki yöntemle karşılaştırılması (maksimum A_{22})

Popülasyon Grupları	n=12			
	Klasik Denklemler		Laminasyon Param. Denklemleri	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[20, 20]	9.57	28 (25)	8.14	26 (27)
[20, 30]	10.21	33 (29)	10.04	31 (30)
[20, 40]	12.33	38 (33)	10.48	33 (32)
[30, 30]	12.49	40 (35)	11.25	41 (38)
[30, 40]	15.29	38 (34)	14.56	35 (34)
[40, 40]	20.16	42 (39)	18.54	45 (44)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Ayrıca her iki yöntemden elde edilen sonuçlar Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Sonuçlar 24 ve 48 tabakaya göre bağımsız olarak kıyaslanmıştır. Şekil 3.3 24 tabaka için Şekil 3.4 ise 48 tabaka için elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekil 3.3 sonuçları algoritmanın bağımsız olarak 50 defa çalıştırılmasından elde edilmiştir. Şekil 3.3’te yatay eksen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısının çarpımını ifade eder. Şekil 3.3 (a)’da dikey eksen elde edilen maksimum amaç fonksiyonunun ortalamasıdır. Şekil 3.3 (b)’de dikey eksen ise sonuçların güvenilirliğini yani optimum noktayı yakalama olasılığıdır.

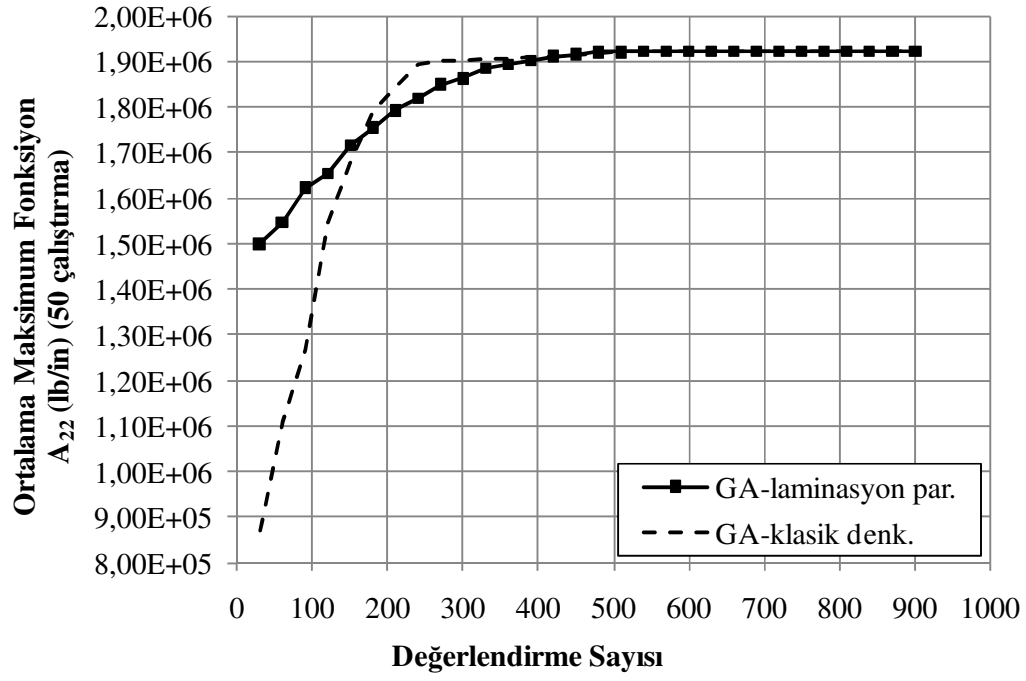
Sonuçları kıyaslayacak olursak; Şekil 3.3 (a)’da görüldüğü gibi laminasyon parametreleri denklemleriyle elde edilen GA sonuçları (GA-laminasyon par.) klasik rijitlik denklemleriyle elde edilen GA sonuçlarından (GA-klasik denk.) daha iyidir. Çünkü GA-laminasyon parametrelerinin algoritma başlangıç noktası optimuma daha yakındır. GA-klasik denklemde ise algoritma başlangıç noktası optimumdan daha uzaktır. GA-laminasyon parametreleri ilk optimum noktayı 330 değerlendirmede yakalayıp bundan sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler 360 değerlendirmede yakalamasına rağmen sonraki her jenerasyonda optimumu yakalayamamıştır.



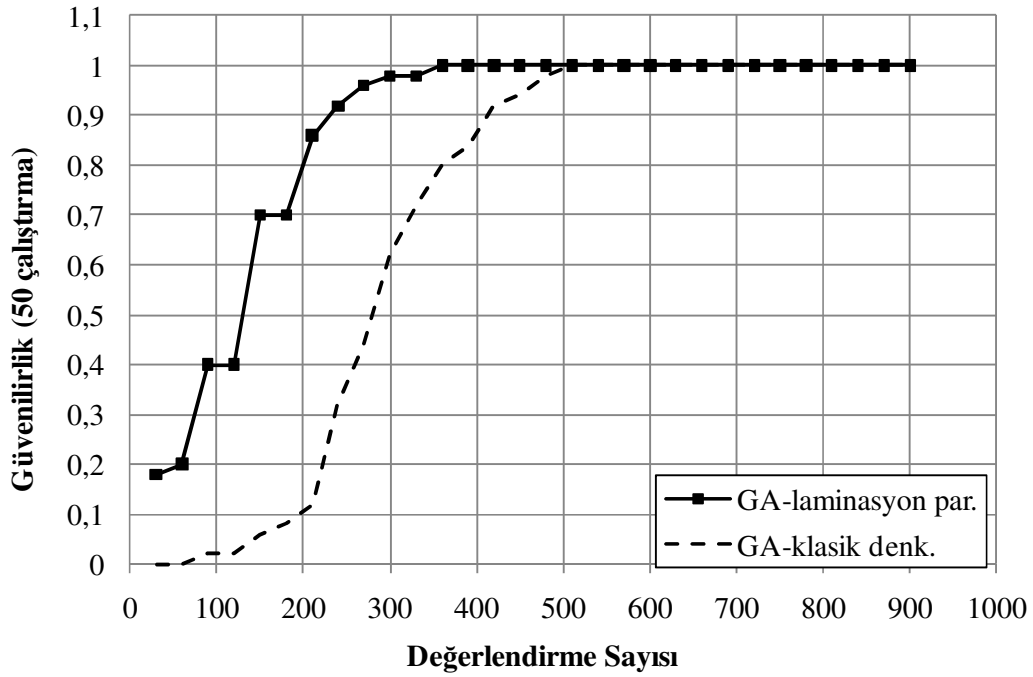
Şekil 3.3 $n=6$ için laminasyon parametreleri ve genel rijitlik denklemleri ile çözülen problemde (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik

Şekil 3.3 (b)'de GA-laminasyon parametrelerinin algoritma başlangıç noktası GA-klasik denklemlerden daha yüksektir. Ayrıca GA-laminasyon parametreleri 5. jenerasyonda ve sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler ancak 13. jenerasyonda optimum noktayı bulabilmiştir. Bu durumda GA-laminasyon parametrelerinin güvenilirliği % 83.33 iken GA-klasik denklemlerin güvenilirliği %56.66'dır.

Şekil 3.4 ise $n=12$ için elde edilen sonuçların ortalama maksimum amaç fonksiyonu ve güvenilirliğini gösterir. Şekil 3.4 sonuçları algoritmanın bağımsız olarak 50 defa çalıştırılmasından elde edilmiştir. Şekil 3.4'te yatay eksen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısının çarpımını ifade eder. Şekil 3.4 (a)'da dikey eksen elde edilen maksimum amaç fonksiyonunun ortalamasıdır. Şekil 3.4 (b)'de dikey eksen ise sonuçların güvenilirliğini yani optimum noktayı yakalama olasılığıdır. Sonuçları kıyaslayacak olursak; Şekil 3.4 (a)'da görüldüğü gibi GA-klasik denklemler ilk optimum noktayı erken yakalama açısından GA-laminasyon parametrelerinden iyi olsa da GA-laminasyon parametresinin algoritma başlangıç noktası optimuma daha yakındır. GA-klasik denklemlerde ise algoritma başlangıç noktası optimumdan daha uzaktır.



(a)



(b)

Şekil 3.4 $n=12$ için laminasyon parametreleri ve genel rijitlik denklemleri ile çözülen problemde (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik

Şekil 3.4 (b)'de de aynı şekilde GA-laminasyon parametrelerinin algoritma başlangıç noktası GA-klasik denklemlerden daha yüksektir. Ayrıca GA-laminasyon parametreleri 12. jenerasyonda ve sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler ancak 17. jenerasyonda optimum noktayı bulabilmiştir. Bu durumda GA-laminasyon parametrelerinin güvenilirliği % 63.33 iken GA-klasik denklemlerin güvenilirliği %46.66'dır.

3.2.2 Dayanım Optimizasyonu Çalışması

Yapılan çalışmada simetrik tabakalı kompozit bir plâğın dayanımı optimize edilmektedir. Simetrik yapıdan dolayı GA da genetik diziliş sadece plâğın yarısını temsil etmektedir. Dizilişteki her bir gen tabakaların açılarına karşılık gelen reel veya doğal sayılardır. Plakada 48 tabaka olmakla birlikte, simetrik tabakalama ile parametre sayısı 24'e ve tabaka açılarının aynı ikili gruplardan oluşması ile 12'ye ($n=12$) düşmektedir.

Dayanım optimizasyonu için daha önce literatürde ele alınan bir plak seçilmiştir. Dört kenarından basit mesnetli plak, kalınlığı 0.02 m olup cam epoksiden yapılmıştır (Grosset et al. 2006).

Genetik algoritma programı için kullanılan parametreler rijitlik optimizasyonunda kullanılan parametrelerle aynıdır.

Dayanım optimizasyonu çalışmasında amaç, bazı yüklemeler altında plâğın hasara uğramayacağı göz önünde bulundurularak yük faktörünü λ_s maksimize etmektir. Bu çalışmada da rijitlik optimizasyonunda olduğu gibi problem hem klasik rijitlik denklemleriyle hem de laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerle çözülmüştür. Çalıştırılan algoritmalar sonucunda optimum noktaya %95 kadar yakın noktalar optimum kabul edilmiştir.

Bu problem için ele alınan amaç fonksiyonu denklem (3.4)'deki gibi ifade edilir (Grosset et al. 2006).

$$\text{maksimum } \lambda_s = \min_{k=1}^n \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\varepsilon_1^t}{\varepsilon_1(k)}, -\frac{\varepsilon_1^c}{\varepsilon_1(k)} \right), \max \left(\frac{\varepsilon_2^c}{\varepsilon_2(k)}, -\frac{\varepsilon_2^t}{\varepsilon_2(k)} \right), \frac{\gamma_{12}^{ult}}{|\gamma_{12}(k)|} \right] \right\} \quad (3.4)$$

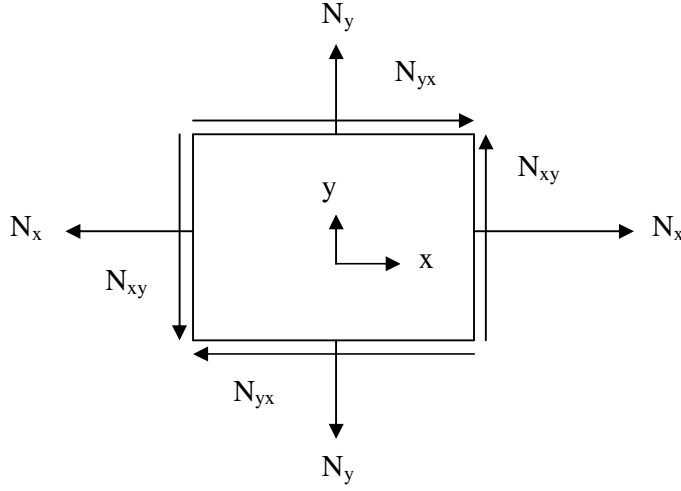
(4.4) denkleminde yer alan $\varepsilon_1(k)$ ifadesi k tabakasına uygulanan fiber yönündeki birim uzama, $\varepsilon_2(k)$ ifadesi k tabakasına uygulanan matris yönündeki birim uzama, $\gamma_{12}(k)$ ifadesi ise k tabakasına uygulanan kaymada birim uzamayı gösterir. Bu problem için denklemde yer alan malzeme özellikleri Çizelge 3.20'de verilmiştir.

Kompozit bir tabakada hasar meydana gelmemesi için uygulanan çekme/basma/kayma gerilmesinin maksimum çekme/basma/kayma gerilmesini geçmemesi gerekir. Yani yük faktörünün λ_s minimum değeri 1 olmalıdır. Değerin 1'den düşük çıkması tabakada hasar oluşacağını belirtir.

Çizelge 3.20 Cam epoksinin malzeme özellikleri

	Fiber Yönünde	Matris Yönünde
Maksimum Çekme Birim Uzama	$\varepsilon_1^t = 7.7 \times 10^{-3}$	$\varepsilon_2^t = 3.5 \times 10^{-3}$
Maksimum Basma Birim Uzama	$\varepsilon_1^c = 6.3 \times 10^{-3}$	$\varepsilon_2^c = 11.0 \times 10^{-3}$
Maksimum Kayma Birim Uzama	$\gamma_{12}^{ult} = 15.6 \times 10^{-3}$	

Cam epoksinin diğer malzeme özellikleri daha önce Çizelge 3.1'de verilmiştir. Buna göre elastik modül E_1 69 GPa, elastik modül E_2 10 GPa, kayma modülü G_{12} 4.5 GPa, poisson oranı 0.31, kalınlık ise 0.02 metredir. Plağa uygulanan düzlem içi yükler; $N_x = -1000 \times 10^3$ N/m, $N_y = 200 \times 10^3$ N/m ve $N_{xy} = 400 \times 10^3$ N/m'dir (Grosset et al. 2006). Elde edilen sonuçları kıyaslamak için literatür ile aynı yük değerleri kullanılmıştır. Malzemede x ve y yönlerinde meydana gelen kuvvetler Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 x ve y yönlerinde meydana gelen kuvvetler

Problemin çözümü için gerekli olan klasik kompozit plak denklemleri ve birim uzama bağıntıları daha önce kompozit plakların denklemleri kısmında verilmiştir. Aynı problemi laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerle çözmek için ise denklem (2.33)'den faydalanılabilir.

Problemin her iki denklemle elde edilmiş sonuçları, literatür sonucu ve imalat açısından en kolay fiber açları konfigürasyonu Çizelge 3.21'de gösterilmiştir. Fiber açları konfigürasyonunun literatür sonucundan farklı çıkmasının nedeni literatürde kullanılan U_{ij} malzeme sabiti değerlerindeki sapma olabilir.

Çizelge 3.21 Dayanım optimizasyonu için elde edilen optimum sonuçlar (maks. λ_s)

	Klasik denklem	Laminasyon param.	(Grosset et al. 2006)
Yük Faktörü λ_s	4.7375	4.7375	4.74
Fiber Açısı Konfg.	$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 22.5_8]_s$	$[\pm 22.5_8/0_4/\pm 45_2]_s$	$[0_{14}/\pm 67.5_5]_s$

Rijitlik optimizasyonunda olduğu gibi denklemlerle elde edilen sonuçların popülasyon büyüklüğüne göre işlemci zamanı bakımından karşılaştırılması Çizelge 3.22'de verilmiştir.

Çizelge 3.22 İki yöntemin ortalama CPU zamanı açısından karşılaştırılması (maks. λ_s)

Popülasyon Büyükliği	Klasik Denklemler		Laminasyon Param. Denklemleri	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[30]	8.27	17 (15)	6.12	28 (25)
[60]	10.19	43 (38)	8.33	45 (41)
[90]	13.07	49 (43)	10.29	50 (46)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Dayanım optimizasyonunda da laminasyon parametreleriyle elde edilen denklemleri kullanmak işlemci zamanı açısından avantajlıdır. Bu problem için de popülasyon grupları oluşturulmuş ve işlemci zamanına olan etkisi incelenmiştir. Popülasyon gruplarının ortalama işlemci zamanına etkisi sonuçları ise Çizelge 3.23’de verilmiştir.

Çizelge 3.23 İkili popülasyon gruplarının ortalama CPU zamanına etkisinin iki yöntemle karşılaştırılması (maksimum λ_s)

Popülasyon Grupları	Klasik Denklemler		Laminasyon Param. Denklemleri	
	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*	Ortalama CPU Zamanı (s)	Bulunan Global Optimum Sayısı*
[20, 20]	8.27	36 (27)	6.19	37 (31)
[20, 30]	10.51	37 (32)	8.29	42 (35)
[20, 40]	11.16	46 (37)	10.24	47 (39)
[30, 30]	13.35	43 (39)	12.09	46 (40)
[30, 40]	14.43	45 (40)	13.18	47 (42)
[40, 40]	16.32	49 (43)	15.12	50 (45)

*Parantez içindeki değer elde edilen farklı konfigürasyon sayısını gösterir.

Popülasyon grupları arttıkça algoritmanın ortalama işlemci zamanı da artmaktadır. Diğer problemde olduğu gibi laminasyon parametreleri denklemlerini kullanmak zaman açısından daha avantajlıdır.

Klasik kompozit plak denklemleri kullanılarak algoritma 50 kere çalıştırılmış ve bulunan optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu imalat kolaylığı açısından Çizelge 3.24’de sıralanmıştır.

Çizelge 3.24 Optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (klasik denk.)

Tabakalama	50 çalıştırmada bulunan konfigürasyon sayısı	λ_s
$[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 22.5_8]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_6/0_4/\pm 45/\pm 22.5_2/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_5/\pm 45_2/0_2/\pm 22.5_3/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45_2/\pm 22.5_6/0_4/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_7/\pm 45/0_2]_s$	1	4.7375
$[0_2/\pm 45_2/\pm 22.5_5/0_2/\pm 22.5_3]_s$	2	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_4/0_2/\pm 45_2/\pm 22.5_4]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/0_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 45/\pm 22.5_5]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5_5/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_6/0_4/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_7/0_2/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_6/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/0_2/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_6/\pm 45_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_5/\pm 45/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_5/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 45_2/\pm 22.5_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_3/0_4/\pm 22.5/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_3/\pm 45/0_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_3]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_6/\pm 45/\pm 22.5/0_4]_s$	1	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_3/\pm 45_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4]_s$	1	4.7375

Çizelge 3.24 (Devam) Optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (klasik denk.)

Tabakalama	50 çalıştırmada konfg. sayısı	λ_s
$[\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/\pm 45/0_2/\pm 22.5_5]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/0_2/\pm 22.5_4/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_3]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_6/\pm 45/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_5/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_2/0_4/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/0_2/\pm 22.5_3/0_2]_s$	2	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_5/0_2/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5/0_4/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_3]_s$	2	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	1	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 45/\pm 22.5_4]_s$	1	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2/90_2/\pm 22.5_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/0_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_3/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5/\pm 45]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/0_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/0_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 45/\pm 22.5_4/0_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_4/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5]_s$	1	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5]_s$	1	4.7375

Çizelge 3.25’de ise laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemler kullanılarak algoritma 50 kere çalıştırılmış ve bulunan optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu imalat kolaylığı açısından sıralanmıştır. Parantez içindeki rakam, 50 çalıştırma içinde bulunan konfigürasyon sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 3.25 Optimum fiber tasarım açılarının konfigürasyonu (laminasyon param.)

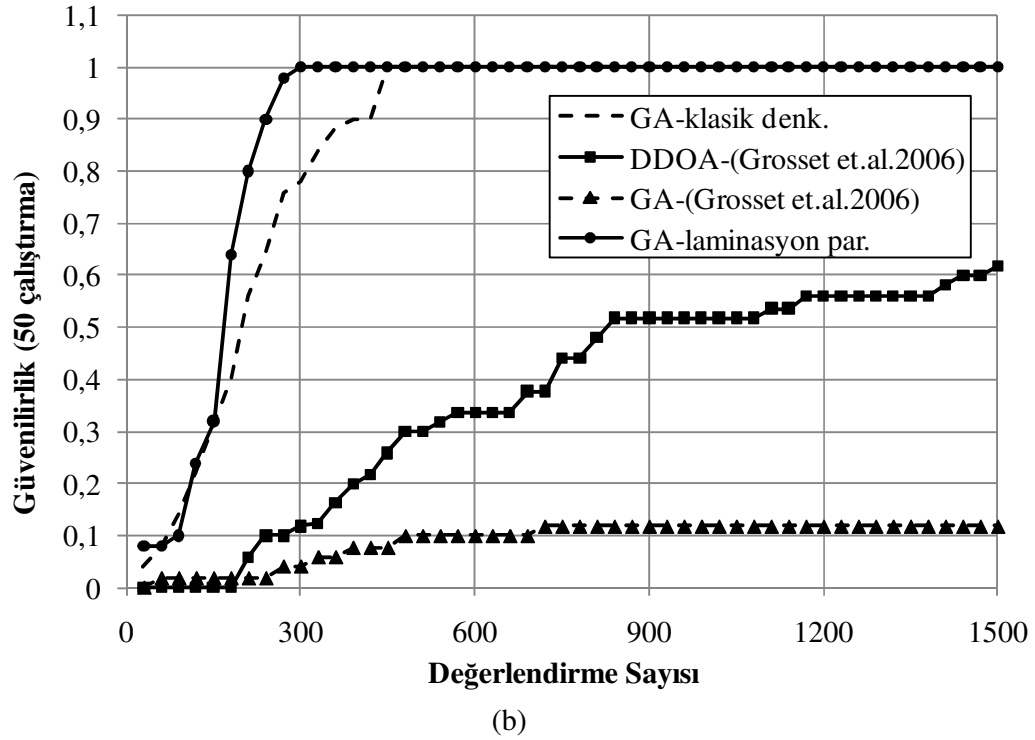
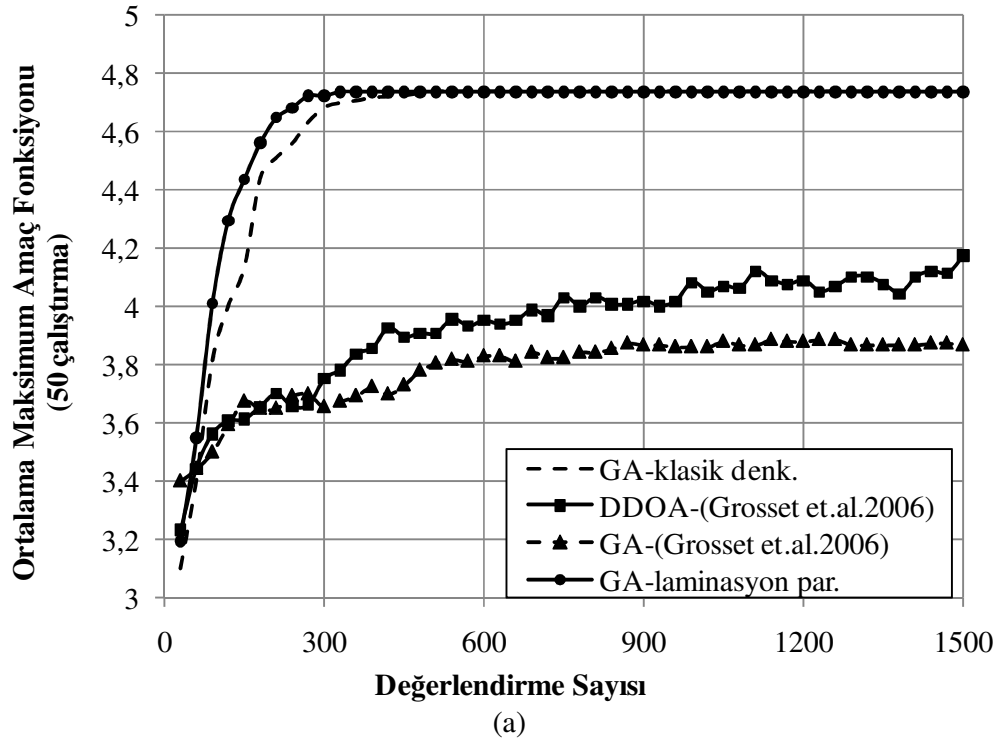
Tabakalama	50 çalıştırmada konfg. sayısı	λ_s
$[\pm 22.5_8/0_4/\pm 45_2]_s$	50(1)	4.7375
$[0_4/\pm 22.5_7/\pm 45_2/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_4/0_4]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_6/0_4/\pm 45/\pm 22.5_2/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/0_4/\pm 22.5_6/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_7/0_2/\pm 45_2/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_7/0_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5_6/\pm 45/\pm 22.5/0_4/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/0_2/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_7]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/0_2/\pm 22.5_6/\pm 45/0_2/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/0_4/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/0_4/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/\pm 45/0_2/\pm 45/\pm 22.5_5/0_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45_2/\pm 22.5_3/0_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_3/0_4]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/0_4/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_4/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_2/\pm 45_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_3]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_5/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_5/0_2/\pm 22.5/\pm 45_2/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5_6/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5/0_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 45/\pm 22.5_2/\pm 45/0_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_3]_s$	50(1)	4.7375

Çizelge 3.25(Devam) Optimum fiber tasarım açıları konfigürasyonu (laminasyon par.)

Tabakalama	50 çalıştırmada konfg. sayısı	λ_s
$[\pm 45/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_4/\pm 45/0_2/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_3]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45_2/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_4/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5/0_4/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_3]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2/0_4/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_3/0_2/\pm 45/0_2/\pm 22.5_4]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_6/\pm 45/0_2/\pm 22.5/0_2]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 45/\pm 22.5_5/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_3]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_4/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_2/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2/\pm 45/0_2/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/0_2/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/\pm 45/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_3]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_2/0_2/\pm 45/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5_3/0_2/\pm 45/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_4/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5/0_2]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_5/0_2/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5/\pm 45]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5_3/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	50(1)	4.7375
$[0_2/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_4]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/\pm 45/\pm 22.5_3/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5/0_2/\pm 22.5]_s$	50(1)	4.7375
$[\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_2/0_2/\pm 22.5/\pm 45/\pm 22.5_2]_s$	50(2)	4.7375

Ayrıca her iki denklemden elde edilen sonuçlar ve literatür sonuçları Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.6 sonuçları algoritmanın bağımsız olarak 50 defa çalıştırılmasından elde edilmiştir. Şekil 3.6'da yatay eksen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısının çarpımını ifade eder. Şekil 3.6 (a)'da dikey eksen elde edilen maksimum amaç fonksiyonunun ortalamasıdır. Şekil 3.6 (b)'de dikey eksen ise sonuçların güvenilirliğini yani optimum noktayı yakalama olasılığıdır. Şekil 3.6 (a)'da görüldüğü gibi GA-laminasyon parametreleri ve GA-klasik denklem sonuçları arasında rijitlik optimizasyonu kadar fark yoktur. Fakat GA-laminasyon parametreleri sonucunda başlangıç noktası daha yüksektir ve optimum noktayı daha erken bulmuştur. Nitekim GA-laminasyon parametreleri ilk optimum noktayı 330 değerlendirmede yakalayıp bundan sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler 570 değerlendirmede optimumu yakalayabilmiştir.

Şekil 3.6 (b)'de de aynı şekilde iki yöntem arasında fazla fark olmamasına rağmen GA-laminasyon parametrelerinin algoritma başlangıç noktası GA-klasik denklemlerden daha yüksektir. Ayrıca GA-laminasyon parametreleri 10. jenerasyonda ve sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler ancak 16. jenerasyonda optimum noktayı bulabilmiştir. Bu durumda GA-laminasyon parametrelerinin güvenilirliği % 70 iken GA-klasik denklemlerin güvenilirliği %50'dir.



Şekil 3.6 (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması (b) güvenilirlik (maksimum λ_s)

Ayrıca Şekil 3.6’da elde edilen GA sonuçları ile literatür DDOA ve GA sonuçları belirtilmektedir. Başlangıçta üç algoritma birbirine yakın fakat optimum noktadan uzak noktalar bulmuşlardır. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi literatür DDOA ve GA sonuçları 1500 değerlendirme süresince optimum noktayı bulamamışlardır. Fakat yapılan bu GA çalışmasında 19. jenerasyonda optimum nokta yakalanmıştır.

Şekil 3.6 (b)’de ise yaklaşık 400 değerlendirmeye kadar üç algoritma da optimum noktayı bulamamıştır. Literatür DDOA ve GA sonuçları algoritma boyunca optimum noktayı yakalayamazken bu GA çalışması 15. jenerasyonda ve algoritma boyunca diğer jenerasyonlarda optimum noktayı yakalamıştır.

Ayrıca bu problem için farklı yükleme durumlarındaki hasar kriteri de araştırılmış olup çalışma sonuçları Çizelge 3.26’da verilmiştir. Buna göre kritik yükler belirlenmiştir.

Çizelge 3.26 Farklı yükleme durumlarında yük faktörü ve fiber açıları konfigürasyonu

Yükleme Durumları			Yük Faktörü	Fiber Açılar Konfigürasyonu
N_x (N/m)	N_y (N/m)	N_{xy} (N/m)	λ_s	
1.0×10^6	0	0	10.626	$[0_{24}]_s$
-1.0×10^6	0	0	8.694	$[0_{24}]_s$
2.0×10^6	0	0	5.313	$[0_{24}]_s$
-2.0×10^6	0	0	4.347	$[0_{24}]_s$
2.5×10^6	0	0	4.25	$[0_{24}]_s$
-2.5×10^6	0	0	3.477	$[0_{24}]_s$
10.5×10^6	0	0	1.012*	$[0_{24}]_s$
0	1.0×10^6	0	10.626	$[90_{24}]_s$
0	-1.0×10^6	0	8.694	$[90_{24}]_s$
0	2.0×10^6	0	5.313	$[90_{24}]_s$
0	-2.0×10^6	0	4.347	$[90_{24}]_s$
0	2.5×10^6	0	4.25	$[90_{24}]_s$

Çizelge 3.26(Devam) Farklı yükleme durumlarında yük faktörü ve fiber açıları konfg.

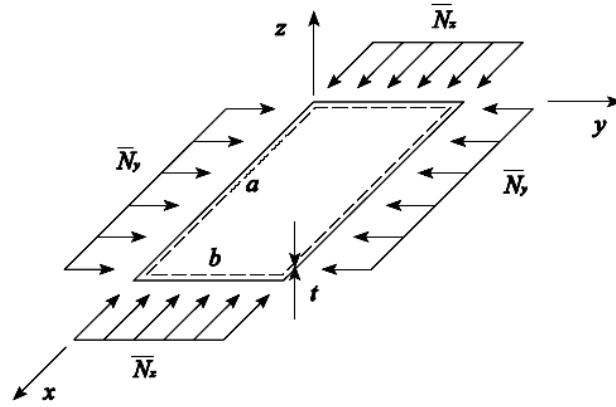
Yükleme Durumları			Yük Faktörü	Fiber Açılı Konfigürasyonu
N_x (N/m)	N_y (N/m)	N_{xy} (N/m)	λ_s	
0	-2.5×10^6	0	3.477	$[90_{24}]_s$
0	0	10.5×10^6	1.012*	$[90_{24}]_s$
0	0	1.0×10^6	2.584	$[\pm 45_{12}]_s$
0	0	-1.0×10^6	4.651	$[\pm 45_{12}]_s$
0	0	2.0×10^6	1.292	$[\pm 45_{12}]_s$
0	0	-2.0×10^6	2.325	$[\pm 45_{12}]_s$
0	0	2.5×10^6	1.033*	$[\pm 45_{12}]_s$
0	0	-2.5×10^6	1.86	$[\pm 45_{12}]_s$
-1.0×10^6	2.0×10^5	4.0×10^5	4.737	$[\pm 22.5_2/\pm 45/0_4/\pm 22.5_6/\pm 45]_s$
1.0×10^6	-2.0×10^5	-4.0×10^5	5.608	$[90_2/0_6/\pm 45/0_2/90_4/0_2/\pm 45_2/0_2]_s$
1.0×10^6	-2.0×10^6	-3.0×10^6	1.324	$[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45_6]_s$
-1.0×10^6	2.0×10^6	3.0×10^6	1.045*	$[\pm 45_8/\pm 22.5/\pm 45/0_4]_s$
1.0×10^6	2.0×10^6	1.0×10^6	2.451	$[\pm 45_8/90_4/\pm 45_2]_s$
-1.0×10^6	-2.0×10^6	-1.0×10^6	2.005	$[\pm 45_3/90_2/\pm 45_4/90_2/\pm 45_3]_s$
-1.0×10^6	3.0×10^6	2.0×10^6	1.195	$[90_4/\pm 22.5_4/\pm 45_2/90_2/\pm 22.5_3]_s$
1.0×10^6	-3.0×10^6	-2.0×10^6	1.501	$[\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_8/\pm 45_2]_s$

*Hasarın başlayacağı yük değerleri

Çizelge 3.26'da görüldüğü gibi plakta hasar meydana gelmeyecek şekilde yükler uygulanmıştır. x ve y yönlerinde aynı yüklerin negatif karşılığı yük faktörü değerini düşürürken xy yönünde durum tam tersidir. Ayrıca uygulanan yükler arttıkça yük faktörünün değeri düşmektedir. Bu tez çalışmasında hem detaylı çalışma yapıldığı hem de literatürle karşılaştırıldığı için özel olarak $N_x = -1000 \times 10^3$ N/m, $N_y = 200 \times 10^3$ N/m ve $N_{xy} = 400 \times 10^3$ N/m alınmıştır.

3.2.3 Burkulma Optimizasyonu Çalışması

Kompozit plakların Şekil 3.7'deki gibi çekme, basma gibi durumların yanında eksenel kuvvetlere maruz kalması ile stabiliteleri bozulur. Bu durumda burkulma yükü, üzerinde durulması gereken önemli bir noktadır.



Şekil 3.7 Çift eksenli yüklemeye maruz basit mesnetli kompozit plak (Karakaya 2007)

Bu çalışmada genetik algoritma yöntemiyle burkulma optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tabaka açıları 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° 'den oluşmaktadır. Optimizasyon çalışmasında kullanılan kompozit plak dikdörtgen bir geometriye sahiptir. Plakın rijitlik özellikleri Çizelge 3.27'de verilmektedir. Literatürle karşılaştırma yapılacağı için belli yükleme durumları ve tabaka geometrisi dikkate alınarak, çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ile ilgili bilgiler Çizelge 3.28'de verilmektedir.

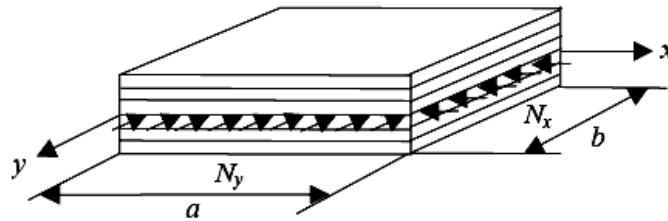
Burkulma optimizasyonu için daha önce literatürde ele alınan bir plak seçilmiştir. Plak boyutları $a=0.508$ m, $b=0.254$ m olup N_x ve N_y düzlem içi yayılı yüklere maruzdur ve tabaka kalınlıkları aynı olacak şekilde grafit/epoksiden yapılmıştır. Bu yükleme altında özel orthotropik kompozit plak için analitik çözüme dayalı burkulma katsayısı şu formülden bulunabilmektedir (Erdal ve Sönmez 2005).

$$\text{maksimum } \lambda_b(m, n) = \pi^2 \left[\frac{m^4 D_{11} + 2(D_{12} + D_{66})(rmn)^2 + (rn)^4 D_{22}}{(ma)^2 N_x + (ran)^2 N_y} \right] \quad (3.5)$$

(3.5) denkleminde λ_b burkulma katsayısı, m ve n sırayla x ve y yönlerindeki yarım dalga sayıları, r (a/b) açıklık oranı ve D_{ij} ise kompozit plağın eğilme rijitlikleridir. Burkulma yükleri (3.6) denkleminde bulunabilir. Burkulma katsayısı denklemi, özel orthotropik kompozit plak (0° ve 90° açılar içeren tabakalar) için geçerlidir. Ancak çok tabakalı simetrik plaklarda ardışık tabaka açıları $\pm\alpha$ şeklinde değişiyorsa D_{16} ve D_{26} , diğer D_{ij} 'lere göre oldukça küçük olduğu için burkulmada bu rijitliklerin etkisi ihmal edilebilir (Soremekun et al. 2001).

$$N_{x_{cb}} = \lambda_b N_x \quad N_{y_{cb}} = \lambda_b N_y \quad (3.6)$$

Burkulma katsayısı m ve n 'ye bağlı olarak değişmektedir. En düşük burkulma katsayısı kritik burkulma katsayısı λ_b olarak isimlendirilmekte ve m ve n 'nin kombinasyonlarını kullanarak bulunmaktadır. Bu problemde m ve n için 1 veya 2 alınması yeterlidir. Buna göre $\lambda_b(1,1)$, $\lambda_b(1,2)$, $\lambda_b(2,1)$, $\lambda_b(2,2)$ arasından en küçük olanı kritik burkulma yükü olarak alınmıştır (Erdal ve Sönmez 2005). Burkulma katsayısı plağa uygulanan yükün büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Şayet plağa birim yükler uygulanırsa kritik burkulma yükü kritik burkulma katsayısı büyüklüğüne eşit olacaktır. Şekil 3.8'de ele alınan kompozit plak görülmektedir.



Şekil 3.8 İki eksenli yük altında kompozit plak

Çizelge 3.27 Grafit/epoksi tabaka özellikleri

Malzeme	Grafit/epoksi
Elastik Modül; E_1 , GPa (psi)	127.6 (18.5)
Elastik Modül; E_2 , GPa (psi)	13.0 (1.89)
Kayma Modülü; G_{12} , GPa(psi)	6.4 (0.93)
Poisson Oranı; ν_{12}	0.3
Tabaka Kalınlığı; mm (in)	0.127 (0.005)

Çizelge 3.28 Optimizasyonu yapılan plağın yükleme durumları ve tabaka boyutları

Yükleme Durumu	a (cm)	b (cm)	N_x (N/m)	N_y (N/m)
1	50.8	25.4	1	1
2	50.8	50.8	1	1

Genetik algoritma parametreleri, karşılaştırma yapılması açısından literatürle aynı seçilmiştir. Buna göre popülasyon büyüklüğü 40, çaprazlama olasılığı 0.8, mutasyon olasılığı 0.01 ve seçim rulet olarak alınmıştır.

Çizelge 3.29 ve Çizelge 3.30’da her iki yük durumu için elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.29 Yükleme durumu 1 için optimum sonuçların karşılaştırılması

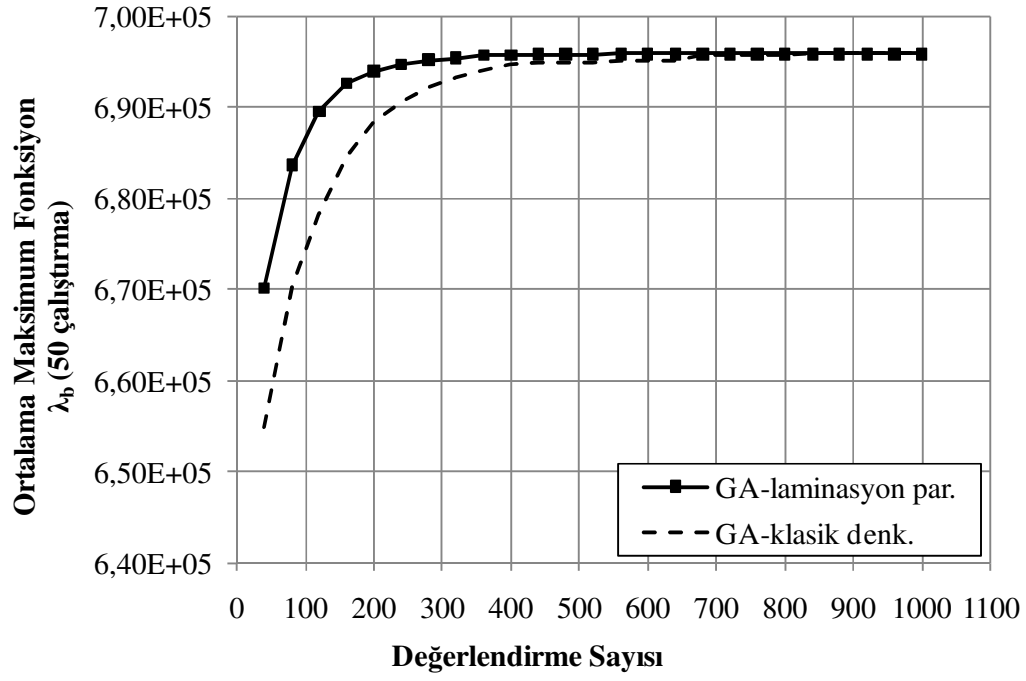
	GA	GA (Karakaya and Soykasap 2008)
λ_b	695781.3	695781.3
Optimum konfigürasyon	$[90_{10}/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4]_s$	$[90_{10}/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4]_s$
Konfigürasyon sayısı	9	9

Çizelge 3.30 Yükleme durumu 2 için optimum sonuçların karşılaştırılması

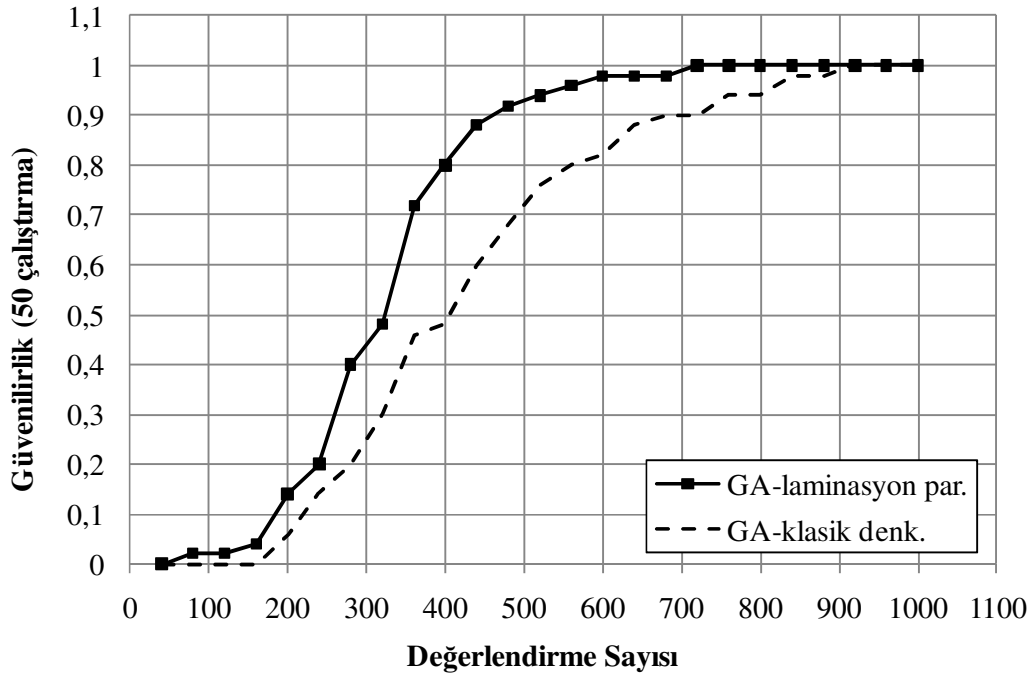
	GA	GA (Karakaya and Soykasap 2008)
λ_b	242823.1	242823.1
Optimum konfigürasyon	$[\pm 45_{16}]_s$	$[\pm 45_{16}]_s$
Konfigürasyon sayısı	1	1

Burkulma optimizasyonunda her iki yükleme durumu için problem hem klasik kompozit plak denklemleriyle hem de laminasyon parametreleriyle elde edilen denklemlerle çözülmüş, her iki yöntemin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.9 yükleme durumunun 1 olduğu ve algoritmanın bağımsız olarak 50 defa çalıştırılması sonuçlarından elde edilmiştir. Şekil 3.9'da yatay eksen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısının çarpımını ifade eder. Şekil 3.9 (a)'da dikey eksen elde edilen maksimum amaç fonksiyonunun ortalamasıdır. Şekil 3.9 (b)'de dikey eksen ise sonuçların güvenilirliğini yani optimum noktayı yakalama olasılığıdır. Şekil 3.9 (a)'da görüldüğü gibi GA-laminasyon parametreleri başlangıç noktasının yüksek olması ve optimum noktayı diğer yönteme göre erken bulması açısından avantajlıdır. Nitekim GA-laminasyon parametreleri ilk optimum noktayı 720 değerlendirmede yakalayıp bundan sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler 920 değerlendirmede optimumu yakalayabilmiştir.

Şekil 3.9 (b)'de GA-laminasyon parametreleri 18. jenerasyonda ve sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler ancak 23. jenerasyonda optimum noktayı bulabilmiştir.



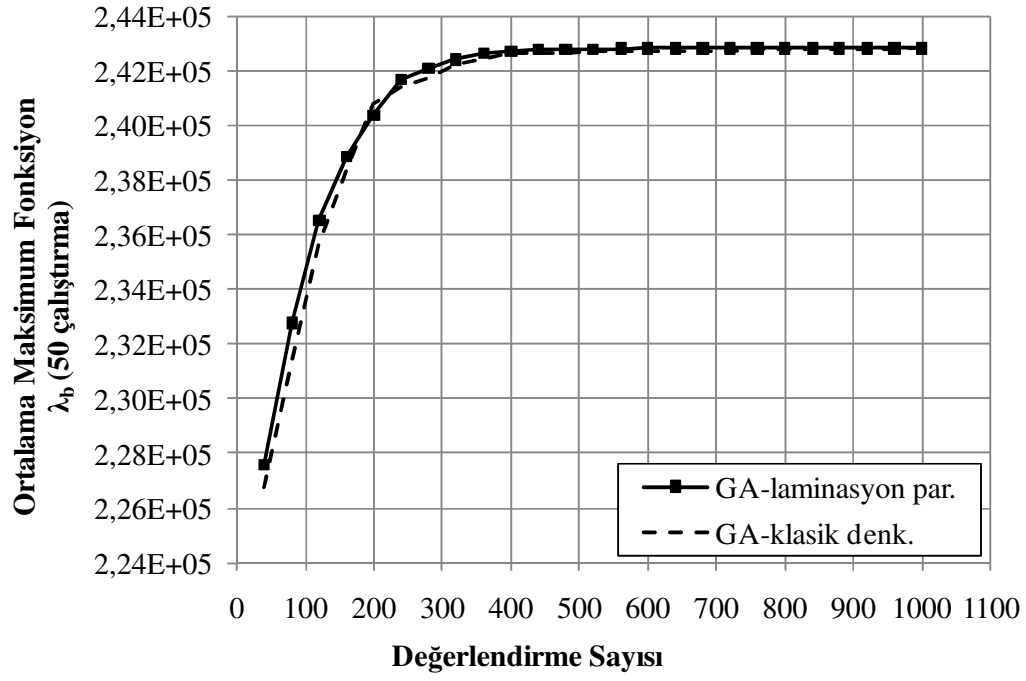
(a)



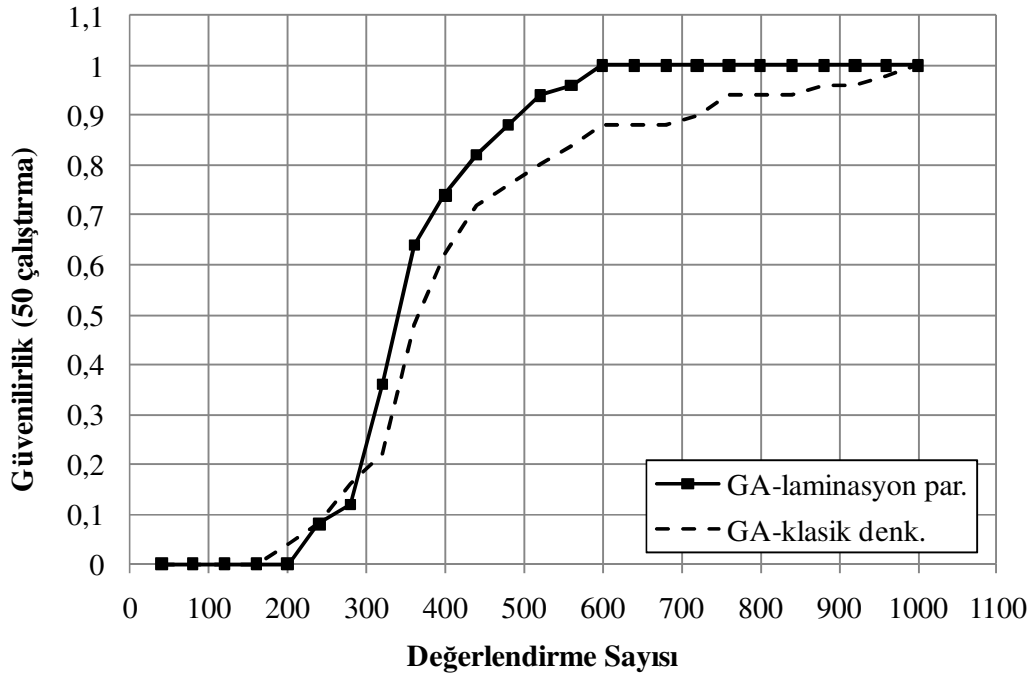
(b)

Şekil 3.9 Yükleme durumu 1 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması

(b) güvenilirlik (maksimum λ_b)



(a)



(b)

Şekil 3.10 Yükleme durumu 2 için (a) maksimum amaç fonksiyonu ortalaması

(b) güvenilirlik (maksimum λ_b)

Şekil 3.10 ise yükleme durumunun 2 olduğu ve algoritmanın bağımsız olarak 50 defa çalıştırılması sonuçlarından elde edilmiştir. Şekil 3.10’da yatay eksen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısının çarpımını ifade eder. Şekil 3.10 (a)’da dikey eksen elde edilen maksimum amaç fonksiyonunun ortalamasıdır. Şekil 3.10 (b)’de dikey eksen ise sonuçların güvenilirliğini yani optimum noktayı yakalama olasılığıdır. Şekil 3.10 (a)’da görüldüğü gibi GA-laminasyon parametreleri ile GA-klasik denklemler ile elde edilen sonuçların birbirine yakın olmasına rağmen GA-laminasyon parametreleri ilk optimum noktayı 600 değerlendirmede yakalarken GA-klasik denklemler 1000 değerlendirmede optimumu yakalayabilmiştir.

Şekil 3.10 (b)’de GA-laminasyon parametreleri 15. jenerasyonda ve sonraki her jenerasyonda optimum noktayı bulurken GA-klasik denklemler ancak 25. jenerasyonda optimum noktayı bulabilmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada tabakalı kompozit bir plağın rijitlik ve dayanım optimizasyonu hem klasik kompozit plak denklemleriyle hem de laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerle çözülmüş, her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Yaptığımız her iki optimizasyon çalışmasında tabaka açıları imalat kolaylığı açısından 0_2° , $\pm 22.5^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 67.5^\circ$ ve 90_2° olarak belirlenmiştir. Rijitlik optimizasyonunda 24 ve 48 tabakaya göre ayrı çalışmalar yapılmıştır. Dayanım optimizasyonunda 48, burkulma optimizasyonunda ise 64 tabakaya göre optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmalarında bazı lokal takılmalar meydana gelmiştir. Bu lokal takılmalardan kurtulmak için program operatörlerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu durum yapılan optimizasyon çalışmalarında operatörlerin ne kadar önemli olduğunun göstergesidir.

Rijitlik optimizasyonunda her iki denklem kullanılarak çalıştırılan algoritma aynı optimum sonuçları bulmasına rağmen genel rijitlik denklemleriyle çalıştırılan algoritma daha fazla zaman almıştır. Ayrıca klasik rijitlik denklemleri kullanılarak yapılan çalışma, başlangıçta optimum noktadan çok uzak noktalar bulmuş ve optimum noktayı, laminasyon parametreleri kullanılarak elde edilen denklemlerle çalıştırılan algoritmanın bulunduğu jenerasyondan daha geç jenerasyonlarda bulmuştur. Ancak her iki algoritma farklı konfigürasyon sayısı bulma bakımından birbirinden çok farklı değildir. Optimizasyon sonuçları daha sağlıklı sonuçlar almak bakımından algoritmaların bağımsız olarak 50 defa çalıştırılması sonucu elde edilmiştir. Her iki yöntemde de eğer program çalışma sayısı arttırılırsa bulunacak olan farklı konfigürasyon sayısı da buna bağlı olarak artacaktır. Yapılan çalışma, referans makale (Grosset et al. 2006) sonuçları ile karşılaştırıldığında bu GA çalışmasının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bunun sebebi GA parametrelerinin iyi seçilmiş olması gibi programla ilgili işlemlerdir.

Dayanım optimizasyonu çalışmasında da genel kompozit plak denklemleri ve laminasyon parametreleri denklemleri karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu çalışmada da yöntemlerin her ikisi aynı optimum noktayı bulmuş fakat genel denklemler kullanılarak çalıştırılan algoritma daha fazla zaman almıştır. Aynı şekilde laminasyon parametreleri kullanılarak çalıştırılan algoritma başlangıçta optimuma yakın

noktalar bulmuş ve global optimumu diğer yöntemden çok daha erken yakalamıştır. Bu optimizasyon çalışmasında da farklı fiber tasarım açıları konfigürasyonu elde etme bakımından iki yöntem arasında fark gözlenmemiştir. Her yöntem için algoritmalar 50 defa çalıştırılmış olup daha fazla çalıştırılması farklı konfigürasyon sayısını arttırmaktadır. Yapılan çalışma, referans makale (Grosset et al. 2006) sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca bu optimizasyon için farklı yükleme durumlarına göre kompozit plağın hasar kriteri incelenmiş, hasar meydana getirmeyen çeşitli yük alternatifleri belirlenmiştir.

0_2 , $\pm 22.5^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 67.5^\circ$ ve 90_2 tabaka açıları kullanılarak yapılan çalışmalarda her iki optimizasyon için birçok global optimum bulunmuştur. Bunun gradyan esaslı klasik optimizasyon yöntemleri ile bulunması daha zordur. Kompozit bir tabakanın genleşme rijitliğini attırmak için farklı rijitlik matrisi bileşenleri (A_{11} , A_{12} , A_{22} ve A_{66}) maksimize edilebilir. Tabakanın eğilmeye karşı rijitliği üzerinde bir çalışma yapılacaksa eğilme rijitliği matrisi bileşenleri (D_{11} , D_{12} , D_{22} ve D_{66}) maksimize edilebilir. Dayanım optimizasyonu için değişik yönlerde verilen yükleme durumlarında hasar meydana gelip gelmeyeceği araştırılabilir veya yük faktörü kısıt olarak belirlenip maksimum hangi yüklerin uygulanabileceği belirlenebilir. Ayrıca kısıtlandırılmış tabaka açıları olmaksızın rastgele açılar düşünülerek bir optimizasyon çalışması yapılabilir ve açıların hangi açılar arasında yığılacağı belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Arslan, A., Turğut, P., 2001, Sürekli Bir Kirişte Maksimum Momentlerin Genetik Algoritmalar ile Belirlenmesi, DEÜ Mühendislik Fak. Fen ve Mühendislik Dergisi, 3: (3), 1-9
- Aydoğdu, M., 2003, Katmanlı Kompozit Dikdörtgen Plakların Burkulma ve Titreşim Analizi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Bekiroğlu, S., Ayvaz, Y., Dede, T., 2003, Değer Kodlaması Kullanılarak Kafes Sistemlerinin Genetik Algoritma ile Minimum Ağırlıklı Boyutlandırılması, 3.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Bolat, B., Erol, K. ve İmrak, C., 2004, Genetic Algorithms in Engineering Applications and the Function of Operators, Journal of Engineering and Natural Sciences, s. 264-265, Sigma.
- Ceylan, H., Haldenbilen, S., 2005, Şehirler Arası Ulaşım Talebinin Genetik Algoritma ile Modellenmesi, İMO Teknik Dergi, Yazı 238, 3599-3618.
- Cheng, R., Gen, M., Tsujimura, Y., 1999, A Tutorial Survey of Job Shop Scheduling Problems Using Genetic Algorithms: Part II. Hybrid Genetic Search Strategies, Computers and Industrial Engineering 37, 51-55.
- Cortes, P., Larraneta, J., Onieva, L., 2004, Genetic Algorithm for Controllers in Elevator Groups: Analysis and Simulation During Lunchpeak Traffic, Applied Soft Computing, 4:(2), 59-174.
- Daniel, I. M., Ishai, O., 1994, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, New York, 37-187.
- Davis, L., 1991, Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York, NY.

- Demirkesen, E., 1991, Kompozit Malzemeler, Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları, No:3/1991, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dengiz, B., Altıparmak, F., 1998, Genetik Algoritmalar, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11: (3), 523-541.
- Diaconu, C. G, Sato, M., Sekine, H., 2002, “Feasible region in general design space of lamination parameters for laminated composites. AIAA J; 40(3):559–65.
- Eksin, I., Erol, O. K., 2001, Evolutionary Algorithm with Modifications in the Reproduction Phase, IEE Proceedings-Software, 75-80, 148 (2).
- Elmas, Ç., 2003, Bulanık Mantık Denetleyiciler, Birinci Baskı, s. 24, Seçkin Yayınevi, ss. 225, Ankara.
- Emel, G. G., Taşkın, Ç., 2002, Genetik Algoritma ve Uygulama Alanları, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, CiltXXI, Sayı 1, 129-152, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Engin, O., 2001, Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma ile Çözümün Performansının Artırılmasında Parametre Optimizasyonu, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Engin, O., Fırlı, A., 2002, Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma Yardımı ile Çözümünde Uygun Çaprazlama Operatörünün Belirlenmesi, Doğuş Üniversitesi Dergisi, 6, 27-35.
- Foldager, J., Hansen, J. S., Olhoff, N., 1998, “A General Approach Forcing Convexity of Ply Angle Optimization In Composite Laminates”, Struct. Optim., 16:201-211.
- Goldberg, D. E., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, Mass.
- Grosset, L., LeRiche, R., Haftka, R. T., 2006, A Double-Distribution Statistical Algorithm for Composite Laminate Optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 31:49-59.

- Gür, M., 1994, “Kompozit Malzemeli Faturalı Kirişlerde Takviye Açısına Bağlı Olarak Gerilme Analizi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Gürdal, Z., Haftka, R. T., 1992, “Elements of Structural Optimization”, 3rd edn. Kluwer Academic Publishers.
- Hashin, Z., Rotem, A., 1980, “Failure Criteria For Unidirectional Fibre Composites”, Journal of Applied Mechanics, 47: 329-334.
- Holland, J., 1975, “Adaptation in natural and artificial systems”, University of Michigan Press, Ann Arbor, Mich.
- Jeniciens, W. M., 1993, “Plane Frame Optimum Design Environment Based on Genetic Algorithms”, Journal of Structures Engineering, V. 118, No. 11, pp:3103-3112.
- Jones, R. M., 1999, “Mechanics of Composite Materials”, Taylor & Francis Inc., 2nd ed., p.519, PA.
- Karaboğa, D., 2004, “Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları”, Atlas, s.199.
- Karakaya, Ş., 2007, “Tabakalı Kompozit Plakların Gelişmiş Global Optimizasyon Teknikleriyle Yapısal Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Karakaya, Ş. and Soykasap, Ö., 2009, “Buckling Optimization of Laminated Composite Plates Using Genetic Algorithm and Generalized Pattern Search Algorithm”, Structural and Multidisciplinary Optimization, 39 (5), 477-486.
- Kurt, M., Semetay, C., 2001, “Genetik Algoritma ve Uygulama Alanları”, Mühendis ve Makine, 42 (501), 19-24.
- Lessard, L. B. and Shokrieh, M. M., 1995, “Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure”, Journal Of Composite Materials, 29 (5): 671-697.

- Luger, G. F., 2002, "Artificial Intelligence, Structures and Strategies for Complex Problem Solving", Fourth Edition, at page 471, Harlow, England: Addison-Wesley.
- Matsuzaki, R. and Todoroki, A., 2007, "Stacking-Sequence Optimization Using Fractal Branch-and-Bound Method for Unsymmetrical Laminates", Composite Structures, 78;537-550.
- Miki, M. and Sugiyama, Y., 1993, "Optimum Design of Laminated Composite Plates Using Lamination Parameters", AIAA Journal, Vol.31, No.5.
- Miki, M., 1986, "Optimum Design of Laminated Composite Plates Subject to Axial Compression", In:Kawabata, K., Umekawaand, S., Kobayashi, A. (eds) Proc. Japan-U.S, CCM-III, pp 673-680.
- Mohan Rao, R., Arvind, N., 2005, "A Scatter Search Algorithm for Stacking Sequence Optimization of Laminate Composites", Composite Structures, Vol.70, 383-402.
- Papadrakakis, M., Lagaros, N. D., 1994, "Advances in Structural Optimization, Institute of Structural Analysis and Seismic Research", National Technical University, Zografou Campus, GR-157 73 ,Civil-Comp Press, Athens, Greece.
- Reeves, C. R., 1995, "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems", McGraw-Hill, Maidenhead, UK.
- Soremekun, G., Gürdal, Z., Haftka, R. T., Warson, L. T., 2001, "Composite Laminate Design Optimization by Genetic Algorithm with Generalized Elitist Selection", Computers and Structures, Vol.79, pp. 131-143.
- Sönmez, O. F. ve Erdal, Ö., 2005, "Optimal Design of Composite Laminates for Maximum Load Capacity using Simulated Annealing", Composite Structures, Vol.71, pp. 45-52.
- Şen, Z., 2004, "Genetik Algoritmalar ve En İyileme Yöntemleri", s.142, Su Vakfı, İstanbul.

- Todoroki, A., Haftka, R. T., 1998, "Lamination Parameters for Efficient Genetic Optimization of the Stacking Sequence of Composite Panels", In:Proc. 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Symposium, pp 870-879.
- Todoroki, A. and Sasai, M., 2003, "Stacking Sequence Optimizations Using GA with Zoomed Response Surface on Lamination Parameters", Adv. Composite Mater., Vol.11, No. 3, pp. 299-318.
- Toğan, V., Daloğlu, A., 2003, "Genetik Algoritma ile Çatı Makaslarının Şekil ve Boyut Optimizasyonu", 3.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Topçu, M., 1998, "Kompozit Malzemelerin Mekaniği", Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli.
- Tsai, S. W., Pagano, N. J., 1968, "Invariant Properties of Composite Materials", In:Tsai, S. W., Halpin, J. C., Pagano, N. J. (eds), Composite Materials Workshop.
- Tserpes, K. I., Labeas, G., Papanikos, P., Th. Kermanidis, 2002, "Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates", Composites Part B: engineering, 33: 521-529.
- Uçaner, M. ve Özdemir, O., 2002, "Genetik Algoritmalar ile İçme Suyu Şebekelerinde Ek Klorlama Optimizasyonu", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 17, No 4, 157-170.
- Yılmaz, E., Öztürk, F., 2003, "Makine Tasarım Optimizasyon Problemlerinin Genetik Algoritma ile Çözümü", Proceedings of the International 12th Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks TAINN-03, 210-212.
- Yurtçu, Ş. ve İçağa, Y., 2006, "Evrimsel Algoritmaların İnşaat Mühendisliği Sistemlerinde Kullanımı", Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt 1, 51-59.

İnternet Kaynakları

- [1] http://tr.wikipedia.org/wiki/Genetik_algoritma (16.11.2009)
- [2] <http://www.odevlik.com/odev-id/16805.html> (09.02.2010)
- [3] http://www.ozbilen.net/makaleler/GA_Roting_seminer_i2.pdf (02.03.2010)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kezban Banu YİĞİT

Doğum Yeri : SAKARYA

Doğum Tarihi : 23.05.1987

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Şehit Üsteğmen İbrahim Abanoz Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi

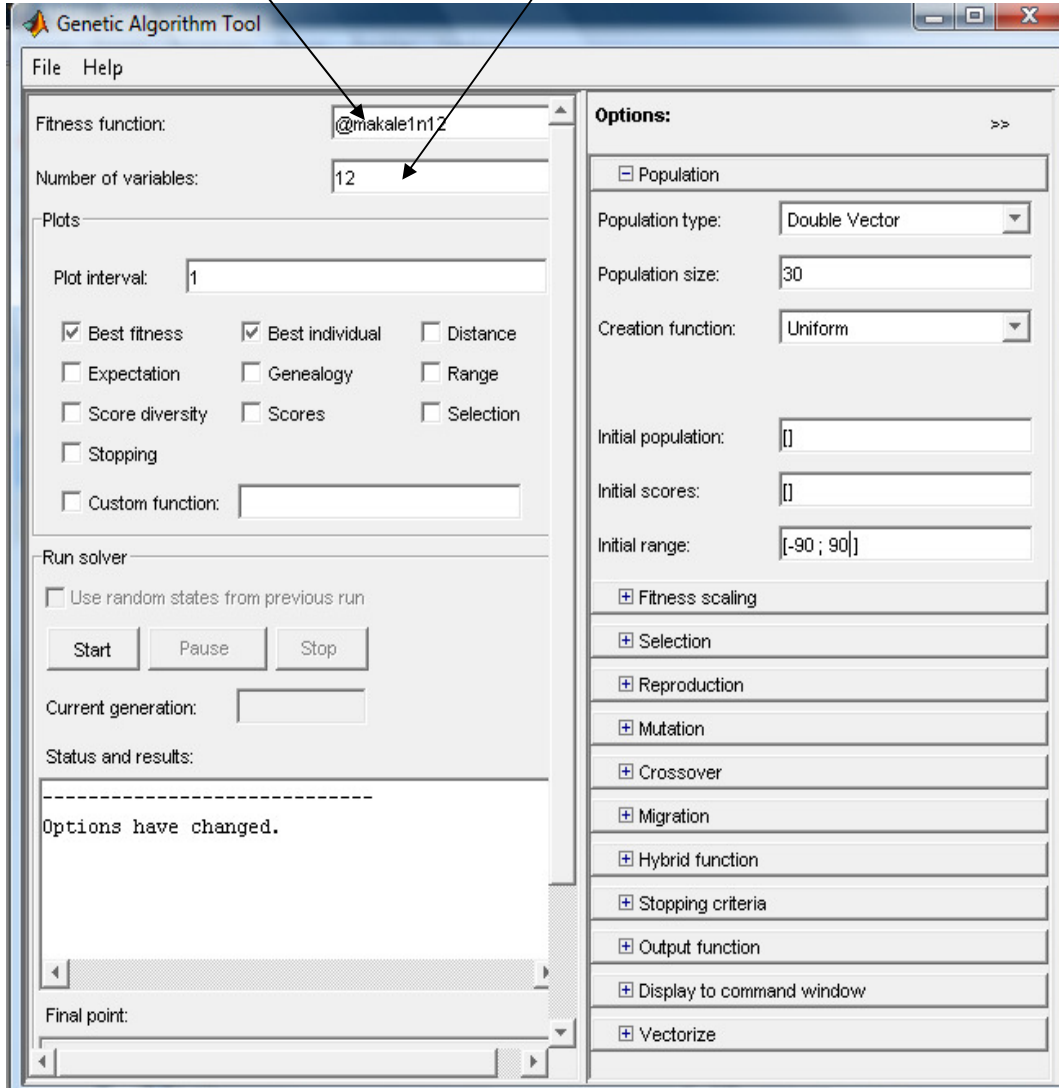
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi / 2008

Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

EK-1 Genetik Algoritma Arayüzü

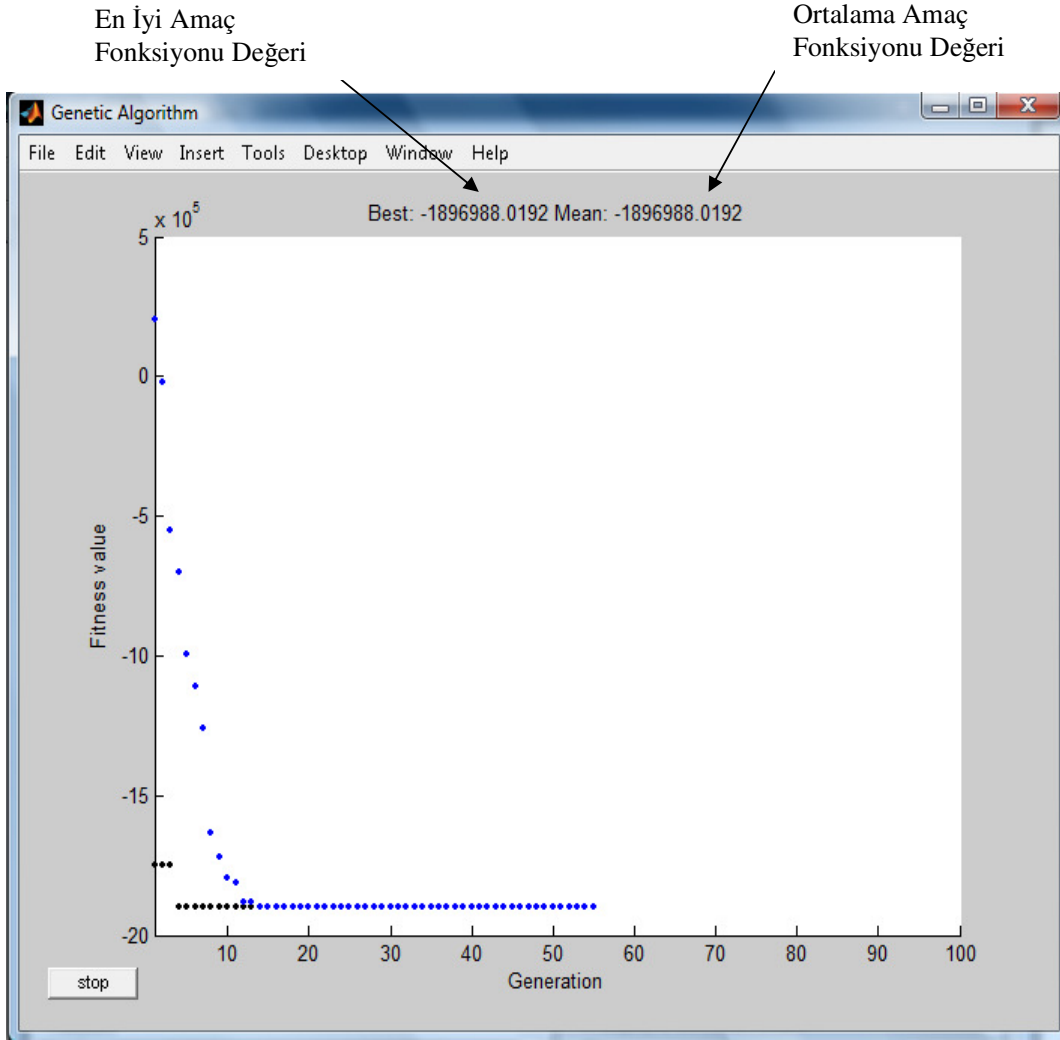
Amaç Fonksiyonunun
Yazıldığı Bölüm

Değişken Sayısının
Yazıldığı Bölüm



Şekil 1. Genetik algoritma programı araç menüsü (rijitlik optimizasyonu)

Şekil 1’de genetik algoritma programının ara yüzü görülmektedir. Burada amaç fonksiyonu kısmına daha önce matlab da oluşturulmuş bir M-File uzantılı dosyanın ismi yazılır. Bu dosya problemin tanımlandığı dosyadır. Optimizasyonu yapılacak olan amaç fonksiyonu, programın okuyabileceği şekilde yazılmalıdır. Programın sağ kısmındaki seçenekler (option) kısmında programla ilgili birçok operatörün ayarlaması yapılabilir. Sol alt kısmında ise optimizasyon sonrası elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 2. Programın çalıştırılması sonucu elde edilen grafikler

Şekil 2'deki grafik programın best fitness kısmının işaretlenmesi ile elde edilir. Bunun gibi ilgili kısımlar işaretlenerek 9 farklı grafik elde edilebilir. Yukarıdaki grafik jenerasyon ile uygunluk değeri arasındaki ilişkiyi gösterir. Tez çalışmasında elde edilen güvenilirlik grafikleri bu grafikte her bir jenerasyonda optimum noktayı bulup bulamamasının tespitiyle elde edilir. Bu grafikler optimizasyon işleminin görselliğini sağlamaktadır.

EK-2 Rijitlik Optimizasyonu İçin Genel Rijitlik Denklemleriyle Yazılan M-File Sayfası

```
function f=makale1a(x)
% veriler pascal cinsinden
% E1=1.503057026e11;
% E2=9514764660;
% G12=1068687335;

% veriler psi cinsinden
E1=2.18e7;
E2=1.38e6;
G12=1.55e5;
v12=0.26;
v21=0.016;
q11=E1/(1-v12*v21);
q22=E2/(1-v12*v21);
q12=(v12*E2)/(1-v12*v21);
q66=G12;
% veri metre cinsinden
% h=5.08e-3;
% veri inch cinsinden
h=0.2;
n=6;
for i=1:n
    if x(i)>54;
        x1(i)=90/180*pi;
        Q12=(q11+q22-4*q66) * (sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12* ((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
        A12(i)=Q12*(h/24);
        Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i)))^4;
        A22(i)=Q22*(h/24);
```

```

elseif x(i)>18;
    x1(i)=67.5/180*pi;
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i))))^4);
    A12(i)=Q12*(h/24);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i))))^4;
    A22(i)=Q22*(h/24);
elseif x(i)>-18;
    x1(i)=45/180*pi;
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i))))^4);
    A12(i)=Q12*(h/24);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i))))^4;
    A22(i)=Q22*(h/24);
elseif x(i)>-54;
    x1(i)=22.5/180*pi;
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i))))^4);
    A12(i)=Q12*(h/24);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i))))^4;
    A22(i)=Q22*(h/24);
else
    x1(i)=0;
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i))))^4);
    A12(i)=Q12*(h/24);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i))))^4;
    A22(i)=Q22*(h/24);

```

```

    end
end
A_12=0; A_22=0;
for i=1:n
    A_12=A_12+A12(i);
    A_22=A_22+A22(i);
end
At=4*[A_12 A_22];
A_12=At(1,1);
A_22=At(1,2);
for i=1:n
    x(i)=x1(i);
end
veff=A_12/A_22;
vl=0.48; vu=0.52; A=(veff/vl)-1; B=1-(veff/vu);
g=min(A,B);
if g >=0
    f=-A_22;
else
    f=-(A_22+5e6*g);
end
% A22
% veff

```

EK-3 Rijitlik Optimizasyonu İçin Laminasyon Parametreleriyle Yazılan M-File Sayfası

```
function f=makale1(x)
% Grafit epoksinin ozellikleri
e1=2.18e7;
e2=1.38e6;
g12=1.55e5;
v12=0.26;
v21=0.016;
q11=e1/(1-v12*v21);
q22=e2/(1-v12*v21);
q12=(v12*e2)/(1-v12*v21);
q66=g12;
u1=(3*q11+3*q22+2*q12+4*q66)/8;
u2=(q11-q22)/2;
u3=(q11+q22-2*q12-4*q66)/8;
u4=(q11+q22+6*q12-4*q66)/8;
u5=(q11+q22-2*q12+4*q66)/8;
% Toplam tabaka kalınlığı
h=0.2;
% Tabaka sayısı
n=6;
for i=1:n
    if x(i)>54;
        x1(i)=90/180*pi;
    elseif x(i)>18;
        x1(i)=67.5/180*pi;
    elseif x(i)>-18;
        x1(i)=45/180*pi;
    elseif x(i)>-54;
        x1(i)=22.5/180*pi;
    else
```

```

        x1(i)=0;
    end
end
for i=1:n
    x(i)=x1(i);
end
v1=(1/n)*(cos(2*x(1))+cos(2*x(2))+cos(2*x(3))+cos(2*x(4))+cos(2*x(5))+cos(2*x(6))
);
v3=(1/n)*(cos(4*x(1))+cos(4*x(2))+cos(4*x(3))+cos(4*x(4))+cos(4*x(5))+cos(4*x(6))
);
A22=h*(u1-u2*v1+u3*v3);
A12=h*(u4-u3*v3);
veff=A12/A22;
v1=0.48;
vu=0.52;
A=(veff/v1)-1;
B=1-(veff/vu);
g=min(A,B);
if g >=0
    f=-A22;
else
    f=-(A22+5e6*g);
end
% A22
% veff

```

EK-4 Dayanım Optimizasyonu İçin Genel Denklemlerle Yazılan M-File Sayfası

```
function lamda=makale3(x)
% Glass-epoksinin malzeme ozellikleri
E1=69e9;
E2=10e9;
G12=4.5e9;
v12=0.31;
v21=0.045;
q11=E1/(1-v12*v21);
q22=E2/(1-v12*v21);
q12=(v12*E2)/(1-v12*v21);
q66=G12;
u1=(3*q11+3*q22+2*q12+4*q66)/8;
u2=(q11-q22)/2;
u3=(q11+q22-2*q12-4*q66)/8;
u4=(q11+q22+6*q12-4*q66)/8;
u5=(q11+q22-2*q12+4*q66)/8;
% u1=31.58e9;
% u2=27.91e9;
% u3=6.48e9;
% u4=9.63e9;
% u5=10.98e9;
e1t=7.7e-3;
e1c=6.3e-3;
e2t=3.5e-3;
e2c=11e-3;
y12ult=15.6e-3;
N=[-1000e3; 200e3; 400e3];
h=0.02;
n=12;
for i=1:n
```

```

if x(i)>54;
    x1(i)=90/180*pi;
    Q11=q11*(cos(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(sin(x1(i)))^4;
    A11(i)=Q11*(h/48);
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
    A12(i)=Q12*(h/48);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i)))^4;
    A22(i)=Q22*(h/48);
    %Q16=(q11-q12-2*q66)*sin(x1(i))*(cos(x1(i)))^3+(q12-q22+2*q66)*(sin(x1(i)))^3*
cos(x1(i));
    %A16(i)=Q16*(h/48);
    %Q26=(q11-q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^3*cos(x1(i))+(q12-q22+2*q66)*sin(x1(i))*
(cos(x1(i)))^3;
    %A26(i)=Q26*(h/48);
    Q66=(q11+q22-2*q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q66*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
    A66(i)=Q66*(h/48);
elseif x(i)>18;
    x1(i)=67.5/180*pi;
    Q11=q11*(cos(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(sin(x1(i)))^4;
    A11(i)=Q11*(h/48);
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
    A12(i)=Q12*(h/48);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i)))^4;
    A22(i)=Q22*(h/48);

```

```

%Q16=(q11-q12-2*q66)*sin(x1(i))*(cos(x1(i)))^3+(q12-q22+2*q66)*(sin(x1(i)))^3*
cos(x1(i));
%A16(i)=Q16*(h/48);
%Q26=(q11-q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^3*cos(x1(i))+(q12-q22+2*q66)*sin(x1(i))*
(cos(x1(i)))^3;
%A26(i)=Q26*(h/48);
    Q66=(q11+q22-2*q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q66*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
    A66(i)=Q66*(h/48);
elseif x(i)>-18;
    x1(i)=45/180*pi;
    Q11=q11*(cos(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(sin(x1(i)))^4;
    A11(i)=Q11*(h/48);
    Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
    A12(i)=Q12*(h/48);
    Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i)))^4;
    A22(i)=Q22*(h/48);
%Q16=(q11-q12-2*q66)*sin(x1(i))*(cos(x1(i)))^3+(q12-q22+2*q66)*(sin(x1(i)))^3*
cos(x1(i));
%A16(i)=Q16*(h/48);
%Q26=(q11-q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^3*cos(x1(i))+(q12-q22+2*q66)*sin(x1(i))*
(cos(x1(i)))^3;
% A26(i)=Q26*(h/48);
    Q66=(q11+q22-2*q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q66*((sin(x1(i)))^4+
cos(x1(i)))^4);
    A66(i)=Q66*(h/48);
elseif x(i)>-54;
    x1(i)=22.5/180*pi;

```



```

Q11=q11*(cos(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(sin(x1(i)))^4;
A11(i)=Q11*(h/48);
Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
A12(i)=Q12*(h/48);
Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i)))^4;
A22(i)=Q22*(h/48);
%Q16=(q11-q12-2*q66)*sin(x1(i))*(cos(x1(i)))^3+(q12-q22+2*q66)*(sin(x1(i)))^3*
cos(x1(i));
%A16(i)=Q16*(h/48);
%Q26=(q11-q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^3*cos(x1(i))+(q12-q22+2*q66)*sin(x1(i))*
(cos(x1(i)))^3;
%A26(i)=Q26*(h/48);
Q66=(q11+q22-2*q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q66*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
A66(i)=Q66*(h/48);
else
x1(i)=0/180*pi;
Q11=q11*(cos(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(sin(x1(i)))^4;
A11(i)=Q11*(h/48);
Q12=(q11+q22-4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q12*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
A12(i)=Q12*(h/48);
Q22=q11*(sin(x1(i)))^4+(2*q12+4*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q22*
(cos(x1(i)))^4;
A22(i)=Q22*(h/48);
%Q16=(q11-q12-2*q66)*sin(x1(i))*(cos(x1(i)))^3+(q12-q22+2*q66)*(sin(x1(i)))^3*
cos(x1(i));
%A16(i)=Q16*(h/48);

```

```

%Q26=(q11-q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^3*cos(x1(i))+(q12-q22+2*q66)*sin(x1(i))*
(cos(x1(i)))^3;
%A26(i)=Q26*(h/48);
    Q66=(q11+q22-2*q12-2*q66)*(sin(x1(i)))^2*(cos(x1(i)))^2+q66*((sin(x1(i)))^4+
(cos(x1(i)))^4);
    A66(i)=Q66*(h/48);
end
end

A_11=0; A_12=0; A_16=0; A_22=0; A_26=0; A_66=0;
for i=1:n
    A_11=A_11+A11(i);
    A_12=A_12+A12(i);
%    A_16=A_16+A16(i);
    A_22=A_22+A22(i);
%    A_26=A_26+A26(i);
    A_66=A_66+A66(i);
end
% A=4*[A_11 A_12 A_16; A_12 A_22 A_26; A_16 A_26 A_66];
A=4*[A_11 A_12 0; A_12 A_22 0; 0 0 A_66];
Ex=[A^-1]*[N];
for i=1:n
    T=[(cos(x1(i)))^2 (sin(x1(i)))^2 sin(x1(i))*cos(x1(i)); (sin(x1(i)))^2 (cos(x1(i)))^2 -
sin(x1(i))*cos(x1(i)); -2*sin(x1(i))*cos(x1(i)) 2*sin(x1(i))*cos(x1(i)) (cos(x1(i)))^2-
(sin(x1(i)))^2];
    E=[T]*Ex;
    et(i,1)=E(1,1);
    et(i,2)=E(2,1);
    et(i,3)=E(3,1);
end
for i=1:n
    x(i)=x1(i);

```

```

end
for i=1:n
    if e1t/et(i,1)>-e1c/et(i,1);
        a=e1t/et(i,1);
    else
        a=-e1c/et(i,1);
    end
    if e2c/et(i,2)>-e2t/et(i,2);
        b=e2c/et(i,2);
    else
        b=-e2t/et(i,2);
    end
    c=y12ult/abs(et(i,3));
    f=[a b c];
    lamda1(i)=min(f);
end
lamda=-min(lamda1);

```

EK-5 Dayanım Optimizasyonu İçin Laminasyon Parametreleriyle Yazılan M-File Sayfası

```
function lamda=makale3a(x)
% Glass-epoksinin malzeme ozellikleri
E1=69e9;
E2=10e9;
G12=4.5e9;
v12=0.31;
v21=0.045;
q11=E1/(1-v12*v21);
q22=E2/(1-v12*v21);
q12=(v12*E2)/(1-v12*v21);
q66=G12;
u1=(3*q11+3*q22+2*q12+4*q66)/8;
u2=(q11-q22)/2;
u3=(q11+q22-2*q12-4*q66)/8;
u4=(q11+q22+6*q12-4*q66)/8;
u5=(q11+q22-2*q12+4*q66)/8;
% u1=31.58e9;
% u2=27.91e9;
% u3=6.48e9;
% u4=9.63e9;
% u5=10.98e9;
e1t=7.7e-3;
e1c=6.3e-3;
e2t=3.5e-3;
e2c=11e-3;
y12ult=15.6e-3;
N=[-1000e3; 200e3; 400e3];
h=0.02;
n=12;
```

```

for i=1:n
    if x(i)>54;
        x1(i)=90/180*pi;
        v1(i)=(cos(2*x1(i)));
        v3(i)=(cos(4*x1(i)));
    elseif x(i)>18;
        x1(i)=67.5/180*pi;
        v1(i)=(cos(2*x1(i)));
        v3(i)=(cos(4*x1(i)));
    elseif x(i)>-18;
        x1(i)=45/180*pi;
        v1(i)=(cos(2*x1(i)));
        v3(i)=(cos(4*x1(i)));
    elseif x(i)>-54;
        x1(i)=22.5/180*pi;
        v1(i)=(cos(2*x1(i)));
        v3(i)=(cos(4*x1(i)));
    else
        x1(i)=0;
        v1(i)=(cos(2*x1(i)));
        v3(i)=(cos(4*x1(i)));
    end
end
v_1=0; v_3=0;
for i=1:n
    v_1=v_1+v1(i);
    v_3=v_3+v3(i);
end
v_1=v_1/n;
v_3=v_3/n;
Az=h*[u1 v_1 v_3; u1 -v_1 v_3; u4 0 -v_3; u5 0 -v_3]*[1;u2;u3];
A_11=Az(1,1);A_12=Az(3,1);A_22=Az(2,1);A_66=Az(4,1);

```

```

A=[A_11 A_12 0; A_12 A_22 0; 0 0 A_66];
Ex=[A^-1]*[N];
for i=1:n
    T=[(cos(x1(i)))^2 (sin(x1(i)))^2 sin(x1(i))*cos(x1(i)); (sin(x1(i)))^2 (cos(x1(i)))^2 -
sin(x1(i))*cos(x1(i)); -2*sin(x1(i))*cos(x1(i)) 2*sin(x1(i))*cos(x1(i)) (cos(x1(i)))^2-
(sin(x1(i)))^2];
    E=[T]*Ex;
    et(i,1)=E(1,1);
    et(i,2)=E(2,1);
    et(i,3)=E(3,1);
end
for i=1:n
    x(i)=x1(i);
end
for i=1:n
    if e1t/et(i,1)>=e1c/et(i,1);
        a=e1t/et(i,1);
    else
        a=-e1c/et(i,1);
    end
    if e2c/et(i,2)>=e2t/et(i,2);
        b=e2c/et(i,2);
    else
        b=-e2t/et(i,2);
    end
    c=y12ult/abs(et(i,3));
f=[a b c];
lamda1(i)=min(f);
end
lamda=-min(lamda1);

```