

**TABAKALI KOMPOZİT PLAKLARIN GELİŞMİŞ GLOBAL
OPTİMİZASYON TEKNİKLERİYLE YAPISAL**

OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

Şükrü KARAKAYA

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ömer SOYKASAP

Makine Eğitimi

Temmuz 2007

AFYONKARAHİSAR KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans

**TABAKALI KOMPOZİT PLAKLARIN GELİŞMİŞ GLOBAL
OPTİMİZASYON TEKNİKLERİYLE YAPISAL OPTİMİZASYONU**

Şükrü KARAKAYA

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ömer SOYKASAP

Makine Eğitimi

Temmuz 2007

ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Ömer SOYKASAP danışmanlığında Şükrü KARAKAYA tarafından hazırlanan “TABAKALI KOMPOZİT PLAKLARIN GELİŞMİŞ GLOBAL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİYLE YAPISAL OPTİMİZASYONU”

başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 11/07/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

| | Ünvanı, Adı, SOYADI | İmza |
|--------|---------------------------|------|
| Başkan | Doç. Dr. Ömer SOYKASAP | |
| Üye | Doç. Dr. Yılmaz İÇAĞA | |
| Üye | Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ | |

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetin Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Emine SOYTÜRK
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| TEZ ÖZETİ | vi |
| ABSTRACT | vii |
| TEŞEKKÜR | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xii |
| | |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| | |
| 2. GENEL BİLGİLER | 2 |
| 2.1 Önceki Çalışmalar | 3 |
| | |
| 3. MATERYAL VE METOD | 7 |
| 3.1 Genetik Algoritma | 7 |
| 3.1.1 Genetik Algoritmanın Tarihçesi | 8 |
| 3.1.2 Genetik Algoritmaların Temel Teoremi | 9 |
| 3.1.3 Genetik Algoritmanın Aşamaları | 9 |
| 3.1.4 Genetik Algoritmada Kullanılan Operatörler | 11 |
| 3.1.4.1 Üreme | 12 |
| 3.1.4.2 Çaprazlama | 12 |
| 3.1.4.3 Mutasyon | 12 |
| 3.1.4.4 Elitizm | 13 |
| 3.1.5 Genetik Algoritma Parametreleri | 13 |
| 3.1.5.1 Çaprazlama ve Mutasyon Olasılığı | 13 |
| 3.1.5.2 Diğer Parametreler | 14 |
| 3.1.5.3 Seçim | 14 |
| 3.2 Paralel Genetik Algoritma | 15 |
| 3.2.1 Tekli Populasyon Usta-Çırak (Master-Slave) İlişkili model | 15 |
| 3.2.2 İri Taneli (Coarse Grain) Paralel Model | 16 |
| 3.2.3 İnce Taneli (Fine Grain) Paralel Model | 16 |

| | |
|--|------------|
| 3.3 Genetik Algoritma Uygulama Alanları | 17 |
| 3.3.1 Optimizasyon | 17 |
| 3.3.2 Otomatik Programlama ve Bilgi Sistemleri | 17 |
| 3.3.3 Mekanik Öğrenme | 18 |
| 3.4 Model Arama (Pattern Search) Yöntemi | 19 |
| 3.4.1 Modeller | 19 |
| 3.4.2 Izgaralar | 20 |
| 3.4.3 Taramalar | 20 |
| 3.5 Katmanlı Kompozit Plaklar ve Denklemleri | 22 |
| 3.5.1 Makromekaniksel analizler | 22 |
| 3.5.2 Anizotropik Malzemelerde Gerilme Deformasyon İlişkileri | 22 |
| 3.5.3 Orthotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu | 24 |
| 3.5.4 Mekanik Davranışın Yöne Bağlı Olarak Değişimi | 25 |
| 3.5.5 Bileşke Kuvvet ve Momentler | 27 |
| 3.5.6 N Tabakadan Oluşan Bileşik Tabaka Teorisi | 28 |
| 3.5.7 Basit Mesnetli Kompozit Plakın Burkulması | 30 |
| 4. BULGULAR | 32 |
| 4.1 Giriş | 32 |
| 4.2 Optimizasyon Çalışmaları | 33 |
| 4.2.1 Genetik Algoritma İle Yapılan Optimizasyon Çalışmaları | 35 |
| 4.2.2 Model Arama ile Yapılan Optimizasyon Çalışmaları | 56 |
| 4.2.3 İki Yöntemin Karşılaştırılması | 71 |
| 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER | 73 |
| 6. KAYNAKLAR | 74 |
| 6.1. İnternet Kaynakları | 77 |
| ÖZGEÇMİŞ | 78 |
| EKLER | |
| Ek 1. Kullanılan program ara yüz bilgisi ve Matlab M-file sayfası | xiv |

YÜKSEK LİSANS TEZ ÖZETİ

TABAKALI KOMPOZİT PLAKLARIN GELİŞMİŞ GLOBAL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİYLE YAPISAL OPTİMİZASYONU

ŞÜKRÜ KARAKAYA

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ömer SOYKASAP

Bu çalışmada eksenel basma yükleri altında tabakalı kompozit yapıların genetik algoritma ve model arama (Pattern Search) yöntemleriyle optimal tasarımı yapılmaktadır. Bunun için basit mesnetli kompozit bir plak iki doğrultuda statik eksenel basma yüklerine maruz kalmaktadır. Eksenel basma yüklerine maruz yapılarda burkulma yüklerinin belirlenmesi yapının kararlılığı açısından oldukça önemlidir ve bu türlü yapıların burkulma yükleri optimize edilebilir. Bu sebeple birçok araştırmacı kompozit malzemelerin optimizasyonu ile ilgilenmiştir.

Tezde kullanılan kompozit plak 64 tabakalı grafit/epoksiden oluşmakta, tabaka yönlenme açıları tasarım parametresi alınarak burkulma yükleri bulunmaktadır. Ele alınan problemde çok fazla sayıda birbirine eşit global maksimumlar olup klasik yöntemlerle bütün konfigürasyonların bulunması oldukça zordur. Genetik Algoritma ve Model arama (Pattern Search) yöntemlerini kullanarak çeşitli yük oranı ve plak geometrisi için burkulma yüklerini maksimize edecek bütün konfigürasyonların ekonomik bir şekilde bulunması sağlanmaktadır. Genetik algoritma ve model arama yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Ayrıca genetik algoritma ve model aramanın hesaplama zamanları karşılaştırılmıştır.

2007, 87 sayfa

Anahtar kelimeler: Genetik Algoritma, Model Arama, Tabakalı Kompozit Yapılar

ABSTRACT

MSc Thesis

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF LAMINATED COMPOSITES PLATES USING ADVANCED GLOBAL OPTIMIZATION TECHNIQS

ŞÜKRÜ KARAKAYA

Afyonkarahisar Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Education

Advisor: Ass. Prof. Dr. Ömer SOYKASAP

In this study, the structural optimization of laminated composite plates for maximum buckling load capacity has been investigated by using the genetic algorithm and pattern search. The optimization is considered a 64-layer plate made of graphite-epoxy composite layers with simple support under compressive biaxial loads and subject to given in plane static loads. In this structures are determined buckling load factor to stability of composites plates. For that reason many researcher interested in this structures optimization. For this structure fiber orientation was taken design variable. Genetic algorithm and pattern search was used to executed maximum buckling load for different load cases and aspect ratios. All of configurations were found to provide economically. Also genetic algorithm and pattern search methods were determined advantage and disadvantage for each other.

We investigated computational time for genetic algorithm and pattern search to found global optimum.

2007, 87 pages

Keywords: Genetic Algorithm, Pattern Search, Laminated Composites

TEŞEKKÜR

Yapılan tez çalışması sırasında danışmanlığımı yürüten hocam Doç. Dr. Ömer SOYKASAP' a ve desteklerini hep arkamda hissettiğim aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca desteklerini esirgemeyen Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Süleyman TAŐGETİREN' e ve aynı çalışma odasını paylaştığım arkadaşlarım Öğrt. Grv. İ. UCUN, Öğrt. Grv. İ. YAVUZ ve Arř Grv. Ő. A. BAYDIR' a teşekkür ederim.

Şükrü KARAKAYA

SİMGELER VE KISALTMALAR

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 |
| \bar{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} | Eğme Rijitliği |
| r | Plak Açıklık Oranı(a/b) |
| m | X Yönündeki Yarım Dalga İndisi |
| n | Y Yönündeki Yarım Dalga İndisi |
| a | Plağın X Doğrultusundaki Boyutu |
| b | Plağın Y Doğrultusundaki Boyutu |

Kısaltmalar

| | |
|-----|-------------------------|
| CPU | Merkezi Birim İşlemcisi |
| GA | Genetik Algoritma |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------------|--|----|
| Şekil 3.1 | Genetik Algoritma Akış Diyagramı | 11 |
| Şekil 3.2 | Genetik Algoritmada Rulet Seçimi | 14 |
| Şekil 3.3 | Usta-Çıracak ilişkili model (Master-Slave) | 15 |
| Şekil 3.4 | İri Taneli Paralel Model | 16 |
| Şekil 3.5 | İnce Taneli Paralel Model | 17 |
| Şekil 3.6 | Model Arama Akış Diyagramı | 21 |
| Şekil 3.7 | Bileşik Tabakadaki Kuvvetler | 28 |
| Şekil 3.8 | Bileşik Tabakadaki Momentler | 28 |
| Şekil 3.9 | Kompozit Plak Geometrisi | 29 |
| Şekil 3.10 | Çift eksenli yüklemeye maruz basit mesnetli kompozit plak | 30 |
| Şekil 4.1 | İki Eksenli Yük Altında Kompozit Plak | 34 |
| Şekil 4.2 | Optimal Açılışın Tabaka Sırasına Göre Değişimi $a/b=2$, $N_x/N_y=1$ (0_2° ve 90_2° lik tabakalar) | 47 |
| Şekil 4.3 | Optimal Açılışın Tabaka Sırasına Göre Değişimi $a/b=1/2$, $N_x/N_y=1$ (0_2° ve 90_2° lik tabakalar) | 48 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | | |
|---------------------|--|----|
| Çizelge 4.1 | Grafit/epoksi tabaka özellikleri | 34 |
| Çizelge 4.2 | Optimizasyonu yapılan plağın yükleme durumları ve tabaka boyutları | 35 |
| Çizelge 4.3 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1$ | 37 |
| Çizelge 4.4 | $N_x/N_y=1$ $a/b=2$ | 38 |
| Çizelge 4.5 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$ | 39 |
| Çizelge 4.6 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1$ | 40 |
| Çizelge 4.7 | $N_x/N_y=2$ $a/b=2$ | 41 |
| Çizelge 4.8 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$ | 42 |
| Çizelge 4.9 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$ | 43 |
| Çizelge 4.10 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$ | 44 |
| Çizelge 4.11 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$ | 45 |
| Çizelge 4.12 | Genetik algoritma ile 90° ve 0° tabakaları kullanarak farklı yükleme ve açıklık oranları için bulunan kritik burkulma katsayıları | 46 |
| Çizelge 4.13 | Popülasyon Büyüklüğünün ve Algoritma Çalışma Sayısının Global Optimum Sayısına Etkisi, $N_x/N_y=1$, $a/b=2$, (0° , $\pm 45^\circ$ ve 90°) | 48 |
| Çizelge 4.14 | İkili Popülasyon Gruplarının ve Algoritma Çalışma Sayısının Global Optimum Sayısına Etkisi, $N_x/N_y=1$, $a/b=2$, (0° , $\pm 45^\circ$ ve 90°) | 49 |
| Çizelge 4.15 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1$ | 50 |
| Çizelge 4.16 | $N_x/N_y=1$ $a/b=2$ | 51 |
| Çizelge 4.17 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$ | 51 |
| Çizelge 4.18 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1$ | 52 |
| Çizelge 4.19 | $N_x/N_y=2$ $a/b=2$ | 52 |
| Çizelge 4.20 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$ | 53 |
| Çizelge 4.21 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$ | 53 |
| Çizelge 4.22 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$ | 54 |
| Çizelge 4.23 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$ | 54 |
| Çizelge 4.24 | Global optimal tasarımlar, $a/b=2$, $N_x/N_y=1$ (0° , $\pm 45^\circ$ ve 90°) | 55 |
| Çizelge 4.25 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1$ | 58 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Çizelge 4.26 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$ | 59 |
| Çizelge 4.27 | $N_x/N_y=1$ $a/b=2$ | 60 |
| Çizelge 4.28 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1$ | 61 |
| Çizelge 4.29 | $N_x/N_y=2$ $a/b=2$ | 62 |
| Çizelge 4.30 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$ | 63 |
| Çizelge 4.31 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$ | 64 |
| Çizelge 4.32 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$ | 65 |
| Çizelge 4.33 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$ | 66 |
| Çizelge 4.34 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1$ | 67 |
| Çizelge 4.35 | $N_x/N_y=1$ $a/b=2$ | 68 |
| Çizelge 4.36 | $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$ | 68 |
| Çizelge 4.37 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1$ | 69 |
| Çizelge 4.38 | $N_x/N_y=2$ $a/b=2$ | 69 |
| Çizelge 4.39 | $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$ | 69 |
| Çizelge 4.40 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$ | 70 |
| Çizelge 4.41 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$ | 70 |
| Çizelge 4.42 | $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$ | 70 |
| Çizelge 4.43 | Genetik Algoritma ve Model Arama Arasında CPU ve Konfigürasyon Karşılaştırılması | 71 |

1.GİRİŞ

Genetik algoritma (GA) tabiattaki en uygun olanın yaşaması esasına dayanan doğal seçim işlemine dayanmaktadır. Genetik algoritmanın ana elemanlarından biri belirli sayıda kromozomu içeren organizmalardır. Her bir kromozoma bir veya daha fazla sayıda genetik bilgi taşımaktadır. Bir organizmanın büyüklüğü ve karmaşıklığı kromozomların sayısı ve uzunluğu ile kromozomlardaki genlerin sayısı ve büyüklüğü ile ilgilidir. GA da organizma gruplarının oluşturduğu popülasyonlarla işleme başlanır. Algoritmada bu popülasyonlar random olarak meydana getirilir, daha sonra bu popülasyonlardan gerek ayrık gerekse de etkileşimli olarak organizmalar meydana getirilir. Organizmalar daha sonra aynı ortamda popülasyonun diğer elemanları ile yarışma (rekabet) ve üremeleri için serbest bırakılır(Somerekun et all.2001).

Model arama yöntemi (Pattern Search Method) de temelde iterasyon ile optimumu yakalamaya çalışır. Genelde non-lineer optimizasyon çalışmalarında kullanılır. Geçerli bir nokta etrafında arama yapılır. Optimizasyon işlemi bir başlangıç noktasından başlar ve belirlenen tolerans aralığına gelince sona erer.

Yapılan çalışmada dört kenarından basit mesnetli simetrik tabakalı kompozit bir plağın burkulması optimize edilmektedir. Simetrik yapıdan dolayı Genetik Algoritmada genetik diziliş sadece plağın yarısını temsil etmektedir. Dizilişteki her bir gen tabakaların açılara karşılık gelen reel veya doğal sayılardır. Her iki optimizasyon tekniğinde de aynı bilgisayar programı kullanılmıştır. Tezde optimum konfigürasyonlar hem genetik algoritma ile hem de model arama yöntemi ile bulunarak her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Ayrıca genetik algoritma yönteminde çoklu popülasyon (Paralel Genetik Algoritma) ele alınmıştır. Çoklu popülasyon ile tekil popülasyonun aynı yükleme durumu ve açıklık oranı için farklı konfigürasyon sayıları, hesaplama zamanları ve maksimum burkulma durumu karşılaştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Mühendislik malzemelerini metal ve alaşımları, polimerler, seramikler, kompozitler olarak dört ana gruba ayırabiliriz. Kompozit malzemeleri de iki yada 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.

Tezdeki çalışmada 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 yapılan çalışmalarda malzemelerin elyaf halinde iken hacimsel durumdan daha dayanıklı oldukları bulunmuştur. Bunun sebebi olarak azalan çap ile birlikte malzemede oluşacak hasar olasılığının azalması olarak gösterilmektedir(Aydoğdu 2003). Ancak kompozit malzemelere uygulanacak statik veya dinamik yüklemelere karşı elyaf her zaman avantajlı olmadığı görülmüştür. Örneğin çekme durumunda çok avantajlı olan elyaf, basma durumunda gelen yükleri taşıyamaz. Bu sebepten dolayı elyaf malzeme bir takviye malzemesi gerektirir yani desteklenmesi gerekir.

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. Günümüzde de yüksek teknoloji malzemelerinin kullanıldığı (Uzay ve Havacılık, Otomotiv, Savunma Sanayi vb.) kompozit malzemeler sıklıkla karşımıza çıkmakta ve önümüzdeki yıllarda da daha optimum araç ve gereçlerin tasarım ihtiyacı ile birlikte kullanım yüzdeleri giderek artacaktır.

Kompozit malzemeler kullanım yerlerine göre farklı yapılarda karşımıza çıkmaktadır. Bu yapılar kiriş, plak, kabuk (metal matrisliler çok farklı geometrik yapılarda olabilir.) şeklindedir. **Plak**, paralel yüzeylerin yan yüzeylere oranla büyük olduğu yapılardır. Kompozit plaklar **tabaka** yada **katmanlar** halinde çok sayıda kompozit yapının bir araya gelmesi ile oluşur(Aydoğdu 2003). Tabii ki bu yapıların farklı yükleme durumlarına karşı dayanımlarının belirlenmesi ve tamamen güvenli yapıların oluşturulması gerçekten önemlidir. Yapılan tez çalışmasında burkulmaya maruz kalan kompozit plak sürekli fiberli ve katmanlardan oluştuğu kabul edilmiştir.

Kompozit plaklarda sıkça rastlanan problemlerden biri burkulmadır. Düzlem içi kuvvetlerin etkimesi ile oluşur. Artan düzlem içi kuvvetlerin plağın düzlemselliğini bozması olarak tanımlanır ve burkulmanın gerçekleştiği en küçük kuvvet değerine kritik burkulma yükü adı verilir. Kompozit plakların tasarımında önemli bir faktördür(Aydoğdu 2003).

Piyasa şartlarında bir ürünün rekabet edebilmesi için o ürünün kaliteli, maliyetinin ucuz, dayanıklı olması gibi özelliklere sahip olması gerekiyor. Bu, piyasadaki her ürün için geçerli olduğu gibi kompozit malzemeler içinde geçerlidir. Bu durum da en uygun ürün tasarımına gereksinimini doğurur. Bu da ancak optimizasyon ile gerçekleştirilebilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi hem ekonomik hemde işlevini yerine getirebilecek bir ürün tasarımı için optimizasyon gereklidir. Bu sebeptendir ki mühendisler çeşitli optimizasyon teknikleri kullanırlar. Tez çalışmasında son yıllarda kullanım alanı gittikçe artan Genetik Algoritma ile Model Arama (Pattern Search) tekniğinin tabakalı kompozit plak optimizasyonunda avantaj ve dezavantajları karşılaştırılarak tabakalı kompozit yapıların burkulma durumunda optimal tasarımı gerçekleştirilmiştir.

2.1 Önceki Çalışmalar

Genetik algoritma ile ilgili literatürde yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Genetik algoritma bilimin tüm alanlarında farklı amaçlarla kullanılan bir teknik

olduğundan aşağıda sadece kompozit yapılarla ilgili olan kısmı verilecektir. Model aramada ise kompozit yapılarla ilgili literatür çalışmasına rastlanmamış ama farklı alanlarla ilgili yapılan çalışmalardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Genelleştirilmiş en iyinin seçimi (Generalized Elitist Selection, GES) ile tek birey seçim (Single Individual, SI) işlemini karşılaştırmış. GES'in SI'ya göre daha güvenli global optimumlar bulduğunu belirtmişlerdir(Somerekun et al. 2001).

Yayarak arama metodu (scatter search) ile tabakalı kompozit yapıların optimizasyonunu yapmışlardır. Standart GA ile yayarak arama (scatter search) arasında karşılaştırma yapmıştır. Yayarak arama metodunu hem kompozit plağın modal analizde hem de hibrit bir kompozit yapıda kullanmıştır. Metodun standart genetik algoritmaya nazaran dah iyi sonuçlar verdiğini bulmuştur(Mohan Rao and Arwind 2005).

Genetik algoritma ile yapılan çalışmalar üzerine literatürü taramış ve Genetik algoritmanın çözüm adımları ve uygulama alanları üzerine bilgiler vermişlerdir(Emel ve Taşkın 2002).

Tavlama benzetimi (Simulate Annealing) tekniğini kullanarak tabakalı kompozit yapıların optimizasyonunu yapmışlardır. Tavlama benzetimi yönteminin performansını incelemiştir(Erdal ve Sönmez 2005). Yine aynı yöntemle tabakalı kompozit bir plağın burkulma optimizasyonunu yapmışlardır. Kompozit plağın farklı geometrik boyutları için yapılan çalışmada başarılı sonuçlar elde etmişlerdir(Deng et al. 2005).

Permutasyonlu genetik algoritma ile maksimum burkulma yükü optimizasyonu yapmışlardır. Permutasyonlu genetik algoritmanın, standart genetik algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini örneklerle açıklamışlardır(Liu et al. 2000).

Hafızalı genetik algoritma ile sandwich plakların burkulma ve çekme yükleri altında ağırlık minimizasyonu yapılmıştır. Yerel ilerleme (Local improvement), eğrinin ara değer tahmini (Spline İnterpolation) yöntemlerini incelemiştir ve standart GA ile karşılaştırmışlardır(Gantovnik et al. 2002).

Kompozit plakların tabaka dizilimi için optimizasyon çalışması yapmışlardır. Genetik algoritmaya (Local improvement) yerel ilerleme eklentisi yapmış ve hesaplama zamanlarının önemli derecede azaldığını görmüştür(Lin and Lee 2004).

Ev ve iş yerlerinde enerji tüketim minimizasyonu yapmış ve standart genetik algoritma ile model arama metodunu karşılaştırmıştır. Genetik algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiğini belirlenmiş bunun nedeni olarak problemde local minimumların olduğu kanısına varmışlardır(Wetter and Wright 2003).

Model arama yöntemi liner kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemlerin çözümü üzerine çalışmışlar, özellikle problemin tarama adımının üzerinde çalışmışlardır. Metodun bilinen yakınsama özelliklerinden herhangi bir taviz vermeksizin daha az maliyetli bir tarama yapılabileceğini göstermişlerdir(Abramson et al. 2004).

Lineer kısıtlı optimizasyon problem için model aramada yöntem geliştirmişlerdir. Kısıtsız minimizasyon probleminde olduğu gibi, kısıtlı lineer minimizasyon problemlerinin de çözümü yönsel türevlemeye ve gradyana ihtiyaç duyulmadan başarılmıştır(Lewis et. all 1998). model arama yönteminin ne olduğunu ve nerelerde kullanıldığı hakkında genel bir çalışma yapmışlardır(Lewis and Torczon 2000).

Çizelgeleme problemi için paralel genetik algoritmayı kullanmışlardır. Çok kısıtlara sahip bir üniversite ders programındaki tüm dersleri belli bir zaman çizelge içine yerleştirmiş ve çeşitli eğitim ve öğretim kurumları için de cevap verecek bir program hazırlamışlardır(Özcan ve Alkan 2001).

Breeder genetik algoritması ile seri ve paralel genetik algoritmayı karşılaştırmış bunun için literatürdeki bilinen fonksiyonları kullanarak bu yöntemlerin problemleri çözme yeteneklerini incelemiştir(De Falco et al. 1996).

Paralel genetik algoritmayla ilgili literatürü taramışlar ve paralel genetik algoritmanın kullanım alanlarını, çeşitlerini, en son uygulama alanlarını, avantaj ve dezavantajları hakkında inceleme yapmışlardır(Winter et al. 2000).

Paralel genetik algoritmada model belirlemenin önemli olduğunu vurgulamışlardır ve kendileri bir model geliştirmişlerdir(iri taneli, Usta –çırak, İnce taneli paralel genetik algoritma modelleri gibi) (Nowostawski and Poli 1999).

Problemlerin paralel genetik algoritma ile dizaynının ve modellenmesinin nasıl yapılacağı açıklamış ve paralel genetik algoritmanın ilerleyen alt bölümleri hakkında bilgiler vermiştir. Usta-Çırak (Master-Slave), İnce Taneli Model (Fine Grain Model), İri Taneli Model (Coarse Grain Model) vb. (Cantu-Paz 1997).

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar (GA), karmaşık optimizasyon problemlerinin çözülmesinde kullanılan bir arama metodudur. Günümüzde zor ve karmaşık tipteki problemler araştırmacıları daha hızlı ve etkili metodları bulmaya zorlamıştır. GA'da bir problemi çözebilmek önce rastgele başlangıç çözümleri belirlenir. Daha sonra da çözümler birbirleri ile eşleştirilerek daha iyi çözümler üretilir. Bu şekilde çözümler birleştirilerek yeni çözümler aranır. Bu arama işlemi daha iyi çözümler bulunana kadar devam eder.

GA'lar doğal seçim ilkelerinin dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemidir. GA 1970'lerin başında John Holland tarafında ortaya atılmıştır. GA'lar doğada geçerli olan en iyinin yaşaması kuralına dayanarak sürekli iyileşen çözümler üretir. Bunun için problemin çözümünün ne olacağına belirleyen bir uygunluk fonksiyonu, yeni bireyler oluşturmak için bireyler arasında çaprazlama yapılması ve mutasyon gibi ilerdeki kısımlarda açıklayacağımız operatörleri kullanır.

Bugün bilgisayar yöntemleri biyolojik değerlendirmeden esinlenerek evrimsel hesaplama olarak adlandırılan bir şemsiye altında gruplandırılmıştır. Evrimsel hesaplamaların ana elemanlar aşağıda tanımlanmaktadır(İşçi ve Korukoğlu 2003):

- (1) Değerlendirme stratejileri
- (2) Evrimsel programlama
- (3) Genetik algoritmalar

Bu üç tekniğin her biri doğal değerlendirmedeki gözlemlenen süreci taklit eder ve verilen problem için aday çözümlerin değerlendirme popülasyonlarıyla etkili arama motorlar sunar. GA'lar genel olarak evrimsel hesaplama alanındaki en göze çarpan teknik olarak düşünülebilir.

GA' yı diğer yöntemlerden ayıran en önemli özellik seçme işlemidir. GA'da çözümün uygunluğu onun seçilme şansını artırır ama bunu garanti etmez. Seçimde seçilme olasılıklarını çözümlerin uygunluğu belirler.

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 2001).

“Reeves; Ulusal hükümetler ve organizasyonlar tarafından genetik algoritma tabanlı projelere, tavlama benzetimi (Simulated Annealing) ve yasaklı arama (Tabu Search) tabanlı projelere göre daha fazla kaynak ayrılmakta olduğunu belirtmektedir." Bu ifadeden anlaşılacağı üzere, genetik algoritmaların geleneksel optimizasyon yöntemlerinde olduğu gibi sözü edilen yapay zeka yöntemlerine göre de çeşitli alanlarda üstünlükleri bulunmaktadır. Bu üstünlükler, genetik algoritmaların arama yapısı ile ilgilidir. Genetik algoritmaların arama yapısı ise, alt diziler teoremi ve yapı blokları hipoteziyle açıklanmaktadır(Emel ve Taşkın 2001).

3.1.1 Genetik Algoritmanın Tarihçesi

Genetik algoritmalar yapay zekanın gittikçe genişleyen bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçasını oluşturmaktadır. GA'da herhangi bir problemin çözümü, problemi sanal olarak evrimden geçirmek suretiyle yapılmaktadır. Evrimsel hesaplama ilk olarak 1960'larda I. Rechenberg tarafından “evrim stratejileri “ isimli kitabında tanıtılmıştır. Daha sonra başka araştırmacılarda bu konuya ilgi duymuşlardır. John Holland evrim sürecini bir bilgisayar yardımı kullanarak bilgisayara çözüm yöntemlerinin öğretilebileceğini düşündü. GA böylece John Holland tarafından bu düşüncenin bir sonucu olarak bulundu(Somerekun 1997).

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 Arwind 2006). 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.

Yukarıda bahsedilen problemlerin hemen hepsi çok geniş bant aralığında çözümlerinin aranması gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerle bunun yapılabilmesi çok uzun süre almaktadır. GA ile ise kısa bir sürede kabul edilebilir bir sonuç alınabilmektedir(Osyczka 2002).

3.1.2 Genetik Algoritmaların Temel Teoremi

Genetik algoritmaların nasıl arama yaptığı alt dizi kavramı ile açıklanmaktadır. Alt diziler, genetik algoritmaların davranışlarını açıklamak için kullanılan teorik yapılarıdır. Bir alt dizi belirli dizi kümeleri arasındaki benzerliği tanımlayan bir dizidir. Alt diziler {0, 1, *} alfabeti kullanılarak tanımlanırlar Örneğin H dizisi, ilk konumunda 0, ikinci ve dördüncü konumunda 1 değeri olan kromozomlar kümesi içindir.

$$H = 0 1 * 1 *$$

* sembolü dizinin o konumunun hangi değeri alıp almadığının önemli olmadığı anlamındadır. Dizi o konumda 0 veya 1 değeri alabilir. Eğer bir x dizisi alt dizinin kalıbına uyarsa x dizisine "H 'ın bir örneğidir." denir(Emel ve Taşkın 2002).

3.1.3 Genetik Algoritmanın Aşamaları

Algoritma ilk olarak populasyon diye tabir edilen bir çözüm seti ile başlar ve bir sonraki populasyonun bir öncekinden daha iyi olacağı beklenir. Yeni populasyon uygunluk durumlarına göre seçilirler. Çünkü uyumlulukları yüksek olan bireylerin daha iyi sonuç vermesi olasıdır ve istenilen sonuç bulunana kadar devam ettirilir.

1. Başlangıç: N adet kromozom içeren popülasyonun oluşturulması (problemin uygun bir çözümü)

2. Uyumluluk: Her x kromozomu için uyumluluğun $f(x)$ değerlendirilmesi,

3. Yeni popülasyon: Yeni popülasyon oluşuncaya kadar aşağıdaki adımların tekrar edilmesi,

a. Seçim: İki ebeveyn kromozomun uyumluluğuna göre seçimi (daha iyi uyum seçilme şansını artırır.)

b. Çaprazlama: Yeni bir fert oluşturmak için ebeveynlerin bir çaprazlama olasılığına göre çaprazlanması. Eğer çaprazlama yapılmazsa yeni fert anne veya babanın kopyası olacaktır.

c. Mutasyon: Yeni ferdin mutasyon olasılığına göre kromozom içindeki konumu (lokus) değiştirilir.

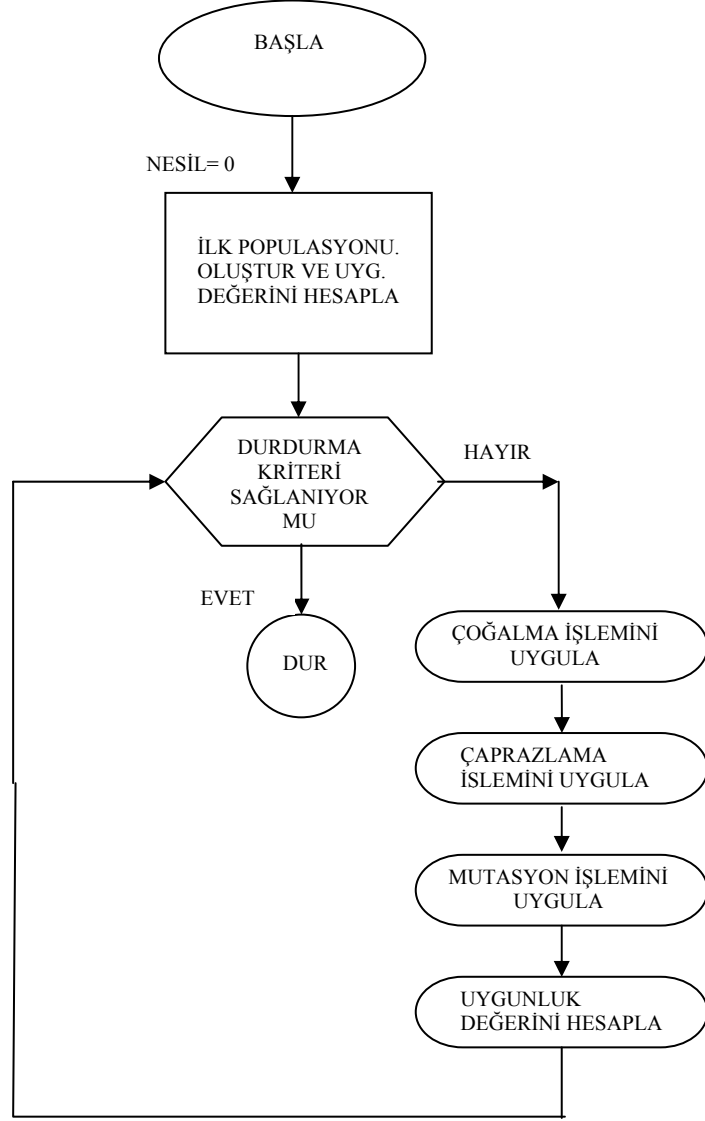
d. Ekleme: Yeni bireyin yeni popülasyona eklenmesi.

4. Değiştirme: Algoritmanın yeniden çalıştırılmasında oluşan yeni popülasyonun kullanılması,

5. Test: Eğer sonuç tatmin ediyorsa algoritmanın sona erdirilmesi ve son popülasyonun çözüm olarak sunulması.

6. Döngü: 2. adıma geri dönülmesi.

Adımlara bakıldığında GA'nın çok genel bir yapıya sahip olduğu görülür. GA'da genelde ikili düzendeki sayılar kullanılır. Bilgisayar tarafından algılanması kolaydır ama tam sayı veya reel sayılarda kullanılabilir. GA'nın belli bir sonlanma kriteri olmadığından algoritmanın ne zaman sonlanacağını kullanıcı kendi karar verir. Sonucun yakınsaması kullanıcı için yeterli ise algoritma durdurulur.



Şekil 3.1 Genetik Algoritma Akış Diyagramı

3.1.4 Genetik Algoritmada Kullanılan Operatörler

GA'nın en önemli kısımları mutasyon ve çaprazlama işlemlerdir. Bu işlemler bir olasılık değeri ile algoritma içinde uygulanır. Bir kromozomun ikilik sayı düzeniyle gösterilmesi aşağıdaki gibidir.

Kromozom 1 : 1110100010111

Kromozom 2 : 1110101100100

Kromozomların her biri çözümle ilgili bilgiler içerir. Bu dizi içinde bit adı verilen her bir sayı çözümün bir karakteristiğini temsil eder.

3.1.4.1 Üreme

Üreme işlemi belli bir seçim kriterine göre bireylerin seçilip yeni kuşağın oluşturulması işlemidir. Uygunluk değeri yüksek olan bireyler seçilir. Böylece mutasyon ve çaprazlama geçirecek olan bireylerin daha yüksek uygunluk kriterine sahip bireyler oluşturması olasılığı yüksektir(Biroğul 2005).

3.1.4.2 Çaprazlama

Çaprazlama, bir sonraki kuşakta daha iyi niteliklere sahip kromozomlar oluşturmak için yapılır. Yeni popülasyondan rastlantısal olarak alınan 2 kromozom karşılıklı çaprazlama işlemine tabii tutulur.

Kromozom 1 : 1101100111

Kromozom 2 : 0011100110

Yeni birey 1 : 1101100111

Yeni birey 2 : 0011100110

En basit çaprazlama yöntemi tek noktalı olan çaprazlamadır. Bu çaprazlamanın yapılabilmesi için kromozomların aynı uzunlukta olması gerekir. Tek noktalı çaprazlamanın yanında farklı çaprazlama yöntemleri de vardır. Bunlar iki noktalı çaprazlama, çok noktalı çaprazlama, uniform çaprazlamadır(Goldberg 1989).

3.1.4.3 Mutasyon

Çaprazlama işlemi gerçekleştirildikten sonra mutasyon işlemi gerçekleştirilir. Mutasyon işleminde amaç oluşan yeni bireylerin önceki bireylere benzememesi için yapılır. Mutasyon işlemi çözümün hızlı gerçekleşmesi içinde yapılır. Algoritmaya çeşitli

yüzdeler etkir. (örneğin %1 mutasyon) mutasyon yeni bireyin bir bitini (eğer ikili düzende ifade edilmiş ise) rasgele değiştirir (Goldberg 1989).

Orjinal birey 1: 11 0 01001

Değişmiş birey 1: 11 1 01001

3.1.4.4 Elitizm

Üreme, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonrasında kuşakta bulunan en iyi uyumluluğa sahip birey sonraki kuşağa aktarılmayabilir. Bunu önlemek için bu işlemlerden sonra oluşan yeni kuşağa bir önceki kuşağın en iyi bireyi, yeni kuşaktan herhangi bir bireyle değiştirilir. Buna elitizm denir.

3.1.5 Genetik Algoritma Parametreleri

3.1.5.1 Çaprazlama ve Mutasyon Olasılığı

GA tekniğinin çaprazlama olasılığı ve mutasyon olmak üzere iki temel parametresi vardır.

Çaprazlama olasılığı çaprazlamanın hangi sıklıkta yapılacağını belirtir. Eğer çaprazlama hiç yapılmazsa (%0 çaprazlama olasılığı) yeni bireyler eski bireylerin eskisi olur ama bu yeni kuşağın eskisinin aynısı olacağı anlamına gelmez. Eğer bu oran %100 olursa yeni bireyler tamamıyla çaprazlama ile elde edilir(Osyczka 2002) Çaprazlama eski bireylerden iyi taraflar alınarak elde edilen yeni bireylerin daha iyi olması umuduyla yapılır. Mutasyon olasılığı ise; mutasyonun hangi sıklıkta yapılacağı belirtir. Mutasyon olmaz ise yeni birey çaprazlama veya kopyalama sonrasında olduğu gibi kalır (Goldberg 1989).

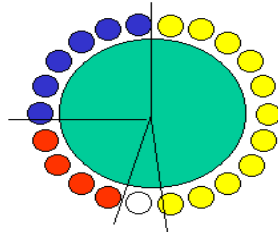
3.1.5.2 Diğer Parametreler

GA'da çaprazlama ve mutasyonun yanında bir diğer önemli parametrede populasyon büyüklüğüdür. Bu parametre populasyon içinde kaç birey olduğunu belirtir. Eğer populasyon sayısı az olursa GA çözüm aranan uzayın ancak bir kısmını gezebilir ve çaprazlama için fazla bir seçeneği yoktur. Populasyon sayısı çok fazla olursa GA çok yavaş çalışır, çözüm süresi uzar. Ayrıca yapılan araştırmalarla belli bir noktadan sonra populasyonun artırmanın bir yararı olmadığı belirlenmiştir(Osyczka 2002).

Yeni bireyler uyumluluğa göre veya rastgele seçilebilir. Rasgele seçilmesi durumunda yakınsama zorlaşabilir. Tüm bireyler uyumluluğa göre seçildiğinde ise yeni kuşak içinde bölgesel yakınsamalar gerçekleşebilir. Bu sorunların üstesinden gelmek için belli bir oranda da uyumluluk seçimi belli oranda rastgele seçim yapılabilir.

3.1.5.3 Seçim

GA'nın temel dayanağına göre iyi olan bireyler yaşamını sürdürmeli ve bireylerden yeni nesiller oluşturulmalıdır. Bu seçim işlemi belli kriterlere göre yapılmalıdır. Turnava seçimi, Sıralı seçim, Rulet seçimi bunların bazılarıdır. Rulet seçiminde kromozomlar uyumluluk değerlerine göre bir rulet etrafında toplanır. Bu rulet etrafında rastgele seçim yapılır. Ve uyumluluk değeri yüksek olanın seçilme olasılığı daha yüksektir. Rulet seçiminde uyumluluk çok fazla değişiyor ise o zaman problem yaşanabilir. Ama %90 oranında bir uyumluluk var ise, seçilmesi muhtemel olduğundan diğer kromozomların seçilme şansı yoktur. Bunu önlemek için sıralı seçim kullanılabilir. Sıralı seçimde en kötü değere sahip olana 1 değerine 2 değeri verilir. Böylece seçilme olasılığı yükselir. Fakat bu çözümün geç yakınsamasına yol açar(Osyczka 2002)



Şekil 3.2 Genetik Algoritmada Rulet Seçimi

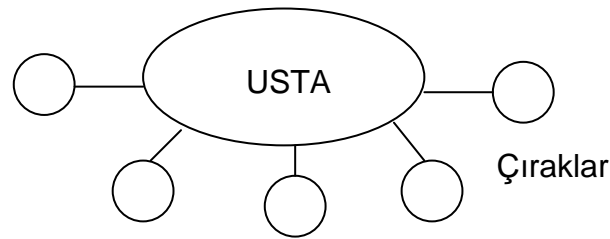
3.2 Paralel Genetik Algoritma

Paralel genetik algoritma Holland'ın sunduğu geleneksel genetik algoritmaya nazaran çok farklılıklar gösterir. Özellikle de populasyon yapısı ve seçim parametreleri açısından düşünüldüğünde problemin çözümünü etkileyecek derecede farklılıklar gösterir. Literatürde paralel genetik algoritma ile yapılan çalışmalar mevcuttur. Yapılan bu çalışmalarda paralel genetik algoritmanın avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir (Gordan and Whitley 1993). Standart genetik algoritmaya nazaran çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Temelde paralel genetik algoritmayı 3 ana grupta toplayabiliriz. Bunlar; Tekli populasyon Usta-Çırak ilişkisi, İnce Tanelenmiş Paralel Algoritma ve İri Taneli Paralel Algoritma'dır.

3.2.1 Tekli Populasyon Usta-Çırak (Master-Slave) İlişkili model

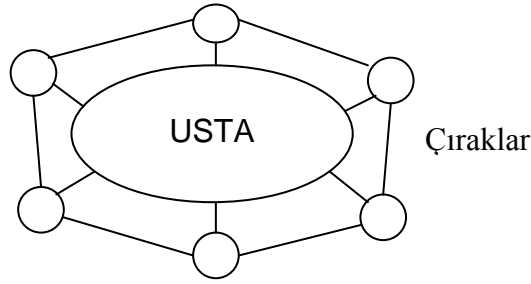
Bu model paralel algoritmanın en temel modelidir. Uygunluk değeri hesaplamaları farklı işlemcilerde dağıtılır ve hesaplamalar gerçekleştirir. Usta seçim, mutasyon, çaprazlama işlemlerini yaptırır. Her bir generasyonda işbirliği ustanın olası çözümleri çıraklara göndermesi ile başlar daha sonra çıraklarda hesapladıkları uygunluk değerlerini tekrardan ustaya gönderir. Yeni bireyler rastgele yerleştirir ve birbiri ile tekrardan rekabete başlar. Çok çırağın hesaplama maliyetini azalttırmasının yanında aynı zamanda çok çırak hesaplama maliyetini arttırır. Bu durum çok iyi bir şekilde değerlendirilip optimal olan seçilmelidir(Winter et all 2000).



Şekil 3.3 Usta-Çırak ilişkili model (Master-Slave)

3.2.2 İri Taneli (Coarse Grain) Paralel Model

Bu model de populasyon çok sayıda alt populasyonlara bölünür. Her biri birbirlerinden bağımsız şekilde evrimleşir. Her bir işlemci farklı alt populasyonlar ile ilgilenir. Alt populasyonlar arasındaki işbirliği göç yoluyla gerçekleşir ve bu işlem periyodik şekilde olur. Her bir alt populasyon için farklı mutasyon ve çaprazlama olasılıkları verilebilir. Göç aralığı bu model için önemli bir unsurdur. İyi bir göç stratejisi ile yakınsamalar hem güvenilir hem de hızlı gerçekleşebilir.

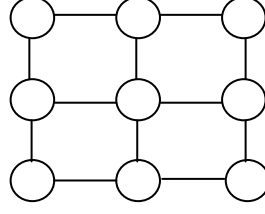


Şekil 3.4 İri Taneli Paralel Model

3.2.3 İnce Taneli (Fine Grain) Paralel Model

Bu model de populasyon çok küçük alt populasyonlara bölünür. Bu alt gruplar yüzlerce olabilir. bir ızgara geometrisi olacak şekilde populasyon dağıtılmıştır. Her bir alt populasyonun birbirleriyle haberleşmesi yoğun bir şekilde gerçekleşir. Seçim ve üreme durumlarını yanlarındaki komşularıyla gerçekleştirirler. Bu model de önemli parametreler ızgaranın büyüklüğü ve ızgaradaki her bir noktanın yarıçapıdır. Izgara yapısı bir, iki hatta üç boyutlu olabilir(Winter et all 2000).

Ayrıca yukarıda bahsettiğim durumların haricinde araştırmacılar daha iyi sonuçlar alabilmek için alt populasyonların birbirleriyle olan etkileşimleri, göç durumunun etkileri alt populasyonların geometrik yerleşimi, alt populasyonların büyüklüğü gibi daha birçok konu üzerinde çalışmalar devam etmekte ve birçok model geliştirmektedir (Winter et all 2000).



Şekil 3.5 İnce Taneli Paralel Model

3.3 Genetik Algoritma Uygulama Alanları

3.3.1 Optimizasyon

Bir arama yöntemi olarak genetik algoritmalar, farklı bilim dallarındaki optimizasyon problemlerinin çözümlerinde kullanılır. Genetik algoritmalar, geleneksel optimizasyon tekniklerine göre zor, süreksizlik içeren fonksiyonların çözümlerinde daha etkilidirler(Goldberg 1989). Optimize edilecek amaç fonksiyonunun süreksiz olması durumunda süreksizlik noktalarında fonksiyonun türevi alınamayacağından türev almaya dayalı optimizasyon teknikleri kullanılamamaktadır. Oysa GA'lar problemin çözümü için türev veya diğer yardımcı bilgilere gereksinim duymaz(Somerekun 1999).

Çeşitli avantajlarına rağmen GA'ların uygulama alanlarında bir takım sorunlarla karşılaşmaktadır. Buna kısıtların ele alınmasındaki soruna karşı ceza fonksiyonu yönteminin kullanılması örnek verilebilir. Bulunan çeşitli yöntemlere rağmen bu konuda yeni yaklaşımlara gereksinim duyulmaktadır(Emel ve Taşkın 2002).

3.3.2 Otomatik Programlama ve Bilgi Sistemleri

Belirli ve özel görevler için gerekli olan bilgisayar programlarını geliştirilmiştir. Örnek olarak bilgisayar çipleri tasarımı, ders programların hazırlanması, ağ çizelgelenmesi verilebilir.

3.3.3 Mekanik Öğrenme

Sınıflama sistemi, genetik algoritmaların mekanik öğrenme alanında bir uygulamasıdır. Basit dizi kurallarını öğrenen bir mekanik öğrenme sistemi olan sınıflama sisteminin kural-mesaj sistemi, özel bir üretim sistemi olarak adlandırılabilir(Emel ve Taşkın 2002). Bu üretim sistemi “eğer-sonra” kural yapısını kullanır.

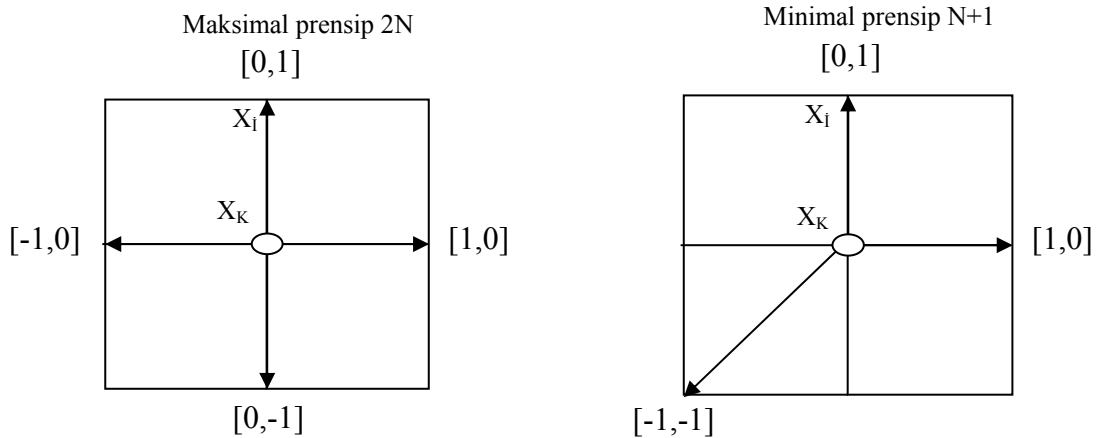
- **Finans**
- **Pazarlama**
- **Montaj hattı dengeleme**
- **Tesis Yerleşim**
- **Çizelgeleme Problemleri**
- **Gezgin Satıcı Problemi**
- **Araç Rotalama**

3.4 Model Arama (Pattern Search) Yöntemi

Model arama yöntemi amaç fonksiyonunun gradyanı hakkında hiçbir bilgi gereksini duymadan optimizasyon probleminin çözülmesini sağlayan bir yöntemdir. Çoğu gradyan ve türevlenebilir optimizasyon metotlarına aksine belirli bir nokta etrafında kümelenmiş noktalarla çözüm araştırması başlar. İlk olarak 1960'ların sonunda kullanıcılar tarafından çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Model aramada da genetik algoritmaya benzer olarak mutasyon, çaprazlama gibi optimize işlemini etkileyen operatörleri vardır. Bunları aşağıda açıklamaya çalışacağız(Lewis and Torczon 2000).

3.4.1 Modeller

Model arama metodu vektörlerin bir araya toplandığı ve her bir iterasyonda araştırmanın hangi noktaya gideceğine karar veren bir araştırma yöntemidir. Amaç fonksiyonundaki bağımsız değişkenler kadar vektör tanımlanmıştır. Yapılan araştırmalar ile modelin çok farklı tiplerde olabileceği belirlenmiştir. Optimizasyon işlemini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir(Lewis et. all 1998). Çalıştığımız programda kullanılan modeller $2N$ maksimal prensibi, ikincisi $N+1$ minimal prensibidir(Mathworks 2005).



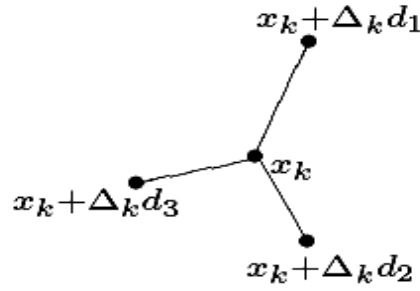
$$v_1 = [1 \ 0], v_2 = [0 \ 1], v_3 = [-1 \ 0], v_4 = [0 \ -1]$$

$$v_1 = [1 \ 0], v_2 = [0 \ 1], v_3 = [-1 \ -1]$$

3.4.2 Izgaralar

Model arama da her bir adımda noktalar kümesi araştırılır. Bu küme ızgara yapısı olarak noktalardan oluşur. Amaç fonksiyonunun gelişimi açısından bu noktaların değerlendirilmesi önemlidir. Izgaranın belli bir büyüklüğü vardır. Bu büyüklüğü Δ^m denirse.

$\Delta^m = \frac{\|x_k - x_{k-1}\|}{\|d_k\|}$ olarak tanımlanabilir. Ayrıca yeni nokta $x_k = x_{k-1} + d_i$



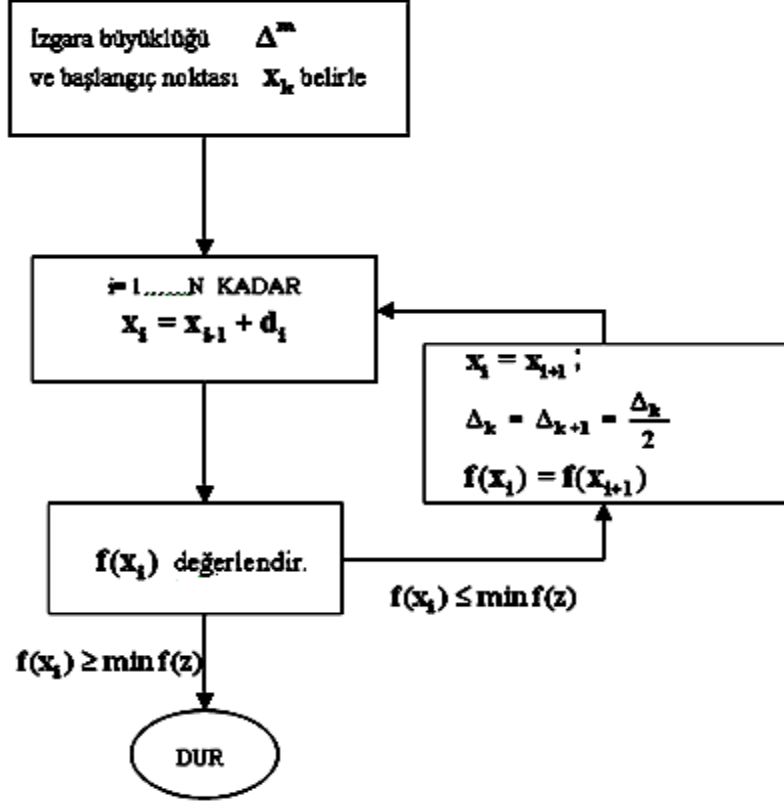
Burada x_k ; yeni nokta x_{k-1} ; bir önceki nokta d_k ; belirlenen yön ve uzunluğudur. (Mathworks 2005)

3.4.3 Taramalar

Değerlendirilecek noktaların belirlenmesinde d_i 'nin yönü ve uzunluğu, ızgaranın büyüklüğü ve tarama metodu model aramada optimizasyonu etkileyen operatörlerdir. Problemin yakınsama durumuna göre ızgara küçülebilir. Izgara büyüklüğü problemin öncesinde belirlenir. Temelde $2N$ veya $N+1$ olarak 2 adet tarama metodu vardır. Burada N bağımsız değişken sayısı ise $2N$ ve $N+1$ toplam vektör sayısıdır.

Tarama sırasında belirlenen nokta amaç fonksiyonu uygunluk değerinden daha küçük bir değere sahipse bu nokta o ızgara için başarılı bir taramayı gösterir ve yeni başlangıç noktası o nokta olur. Ama bu durumun terside gerçekleşebilir. Belirli nokta, amaç

fonksiyonu değerinden daha büyük uygunluk değerine sahip olabilir. Bu durumda tarama başarısız bir tarama olur ve program durdurulur(Lewis et. all 1998)



Şekil 3.6 Model Arama Akış Diyagramı

3.5. Katmanlı Kompozit Plaklar ve Denklemleri

3.5.1 Makromekaniksel analizler

Makromekaniksel analizlerde, fiberlerle pekiştirilmiş bir tabakanın mikromekaniksel analizlerle veya deneysel olarak belirlenmiş ortalama rijitliklerinden hareket ederek iki veya üç eksenli gerilme altındaki davranışları incelenecektir.

3.5.2 Anizotropik Malzemelerde Gerilme Deformasyon İlişkileri

Gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkiyi tanımlayan Hook Kanunu kısaltılmış notasyonlarla;

$\sigma_i = c_{ij}\varepsilon_j$ $i, j : 1, \dots, 6$ şeklinde yazılabilir. Bu eşitlik matris formunda gösterilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.1]$$

$\sigma_i = c_{ij}\varepsilon_j$ matrisinde 36 elastik sabit vardır. Ancak matrisde $c_{ij} = c_{ji}$ simetri özelliği nedeniyle bağımsız elastik sabitlerin sayısı 21 dir. [3.1] denklemi hiçbir simetri düzlemi içermeyen anizotropik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisini tanımlar. Hiçbir simetri düzlemi olmayan bu tür malzemelere “triklinik malzeme” olarak adlandırılır(Demirkesen 1991).

Gerilme deformasyon bağıntısının tersi kompliyans matrisi s_{ij} ile ifade edilir ve gerime deformasyon ilişkisini verir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{14} & s_{24} & s_{34} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{15} & s_{25} & s_{35} & s_{45} & s_{55} & s_{56} \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & s_{46} & s_{56} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.2]$$

$\varepsilon_{ij} = s_{ij} \sigma_i \quad i, j: 1, \dots, 6$ s_{ij} matrisinde aynı c_{ij} matrisi gibi simetri özelliği gösterir. $s_{ij} = s_{ji}$ 'dir. Malzeme özelliklerinin simetri özelliği gösterdiği bir simetri düzlemi mevcut ise, rijitlik ve kompliyans matrisleri 13 bağımsız elastik sabit içerir. Bu tür malzemelere “monoklinik” malzeme adı verilir. Monoklinik malzeme için gerilme deformasyon ve deformasyon gerilme ilişkileri [3.3] denklemde verilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{45} & c_{55} & 0 \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \text{ ve } \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & s_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{45} & s_{55} & 0 \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.3]$$

Bir malzemenin birbirine dik üç simetri düzlemi varsa, bu düzlemin ara kesitlerine paralel koordinatlardaki gerilme deformasyon ve deformasyon gerilme ilişkileri [3.4] denklemindeki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \text{ ve } \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & s_{16} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & s_{26} \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & s_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{45} & s_{55} & 0 \\ s_{16} & s_{26} & s_{36} & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [3.4]$$

Bu tür özellikleri gösteren malzemelere “orthotropik malzeme” adını alırlar ve 9 bağımsız elastik içerirler. Tek yönlü sürekli fiberlerle pekiştirilmiş bir tabaka orthotropik malzemeye örnek teşkil eder. Orthotropik karakterli malzemelerde, anizotropik malzemelerden farklı olarak $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ normal gerilmeleri ile $\gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$ kayma deformasyonları ve $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31}$ kayma gerilmeleri ile $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ normal deformasyonları arasında bir etkileşim yoktur (Demirkesen 1991). Bir sonraki kısımda orthotropik plaklarla ilgili denklemler verilecektir.

3.5.3 Orthotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu

Elyaf takviyeli tabakalar çoğunlukla ince olduklarından düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu, yani düzleme dik gerilmelerin etkimeidiği kabul edilebilir. ($\sigma_3 = 0, \sigma_4 = 0, \sigma_5 = 0$). bu durumda 3 boyutlu Q_{ij} matrisi kullanılır. Böylece Hooke bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad [3.5]$$

şeklini alır. Burada matrisin bağımsız elemanlarının sayısı 4’te inmiştir ve bunların mühendislik sabitleri cinsinden ifadeleri [4.6] denklemlerindeki gibidir.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad [3.6]$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{66} = G_{12}$$

Burada E malzemenin elastisite modülünü, ν poisson oranı ve G ise kayma modülünü ifade etmektedir.

3.5.4 Mekanik Davranışın Yöne Bağlı Olarak Değişimi

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

Örneğin, etkiyen gerilmeler malzemenin asal doğrultuları 1 ve 2 yönlerinde değil, x ve y yönlerinde etkimesi halinde bu gerilme halinin malzeme asal eksenleri ile çakışan bir koordinatta transformasyonu [3.7] denklemi gibi yazılabilir(Topçu 1998).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad \text{olur.} \quad [3.7]$$

Benzer şekilde

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{1/2} \end{bmatrix} \quad [3.8]$$

(-1) üsteki matris tersini belirtmektedir ve transformasyon matrisi $[T]$ aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad [3.9]$$

Bununla beraber bir $[R]$ matrisi,

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

Kullanırsa $\frac{1}{2}$ çarpanı yok edilir ve

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix} \quad [3.10]$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix}$$

elde edilir.

Eğer gerilmenin uygulandığı eksenler olan x ve y, malzemenin asal eksenleri olan 1 ve 2 eksenleri ile çakışmıyor ise Gerilme – Şekil değişimi bağıntısı şöyle yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{x12/2} \end{bmatrix} \quad [3.11]$$

$$= [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy/2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Burada, $[T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} = [\bar{Q}]$ ile gösterilirse xy eksenlerine ait gerilme – şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad [3.12]$$

Olarak elde edilir. $[\bar{Q}]$ 'nun bileşenleri

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{22} \cdot \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{12} \cdot (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{22} \cdot \cos^4 \theta \end{aligned} \quad [3.13]$$

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

Burada \bar{Q}_{ij} (indirgenmiş Q_{ij} rijitlik matrisi yerine) transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir.

Aynı şekilde malzeme asal eksenleri ile çakışmayan bir gerilme hali için de şekil değiştirme – gerilme bağıntısı bulunabilir (Topçu 1998).

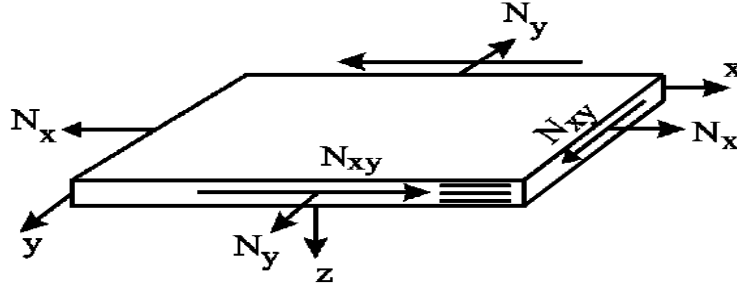
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad [3.14]$$

Burada $[R][T]^{-1} \cdot [R]^{-1} \cdot [S][T] = [\bar{S}]$ olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\bar{S}_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{22} \cdot \sin^4 \theta \\ \bar{S}_{12} &= S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta \\ \bar{S}_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{22} \cdot \cos^4 \theta \\ \bar{S}_{16} &= (2S_{11} - S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cdot \cos^3 \theta + (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cdot \cos \theta \\ \bar{S}_{26} &= (2S_{11} - S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cdot \cos \theta + (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cdot \cos^3 \theta \\ \bar{S}_{66} &= (S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 2S_{66}) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)\end{aligned} \quad [3.15]$$

3.5.5 Bileşke Kuvvet ve Momentler

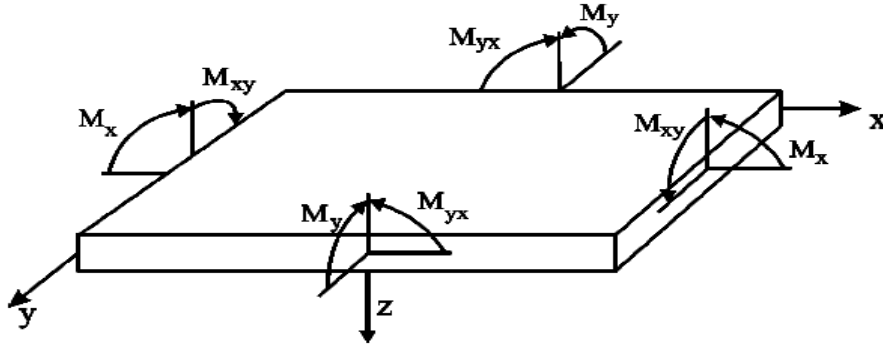
Bileşik bir tabakada gerilmeler her bir tabaka farklı olduğundan, bu gerilmelerin bileşik tabakanın kalınlığı boyunca integrasyonu ile elde edilen bileşke kuvvet ve moment aşağıdaki gibidir (Şekil 3.7 ve 3.8).



Şekil 3.7 Bileşik Tabakadaki Kuvvetler

$$N_X = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad N_Y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y dz \quad N_{XY} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xy} dz \quad [3.16]$$

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

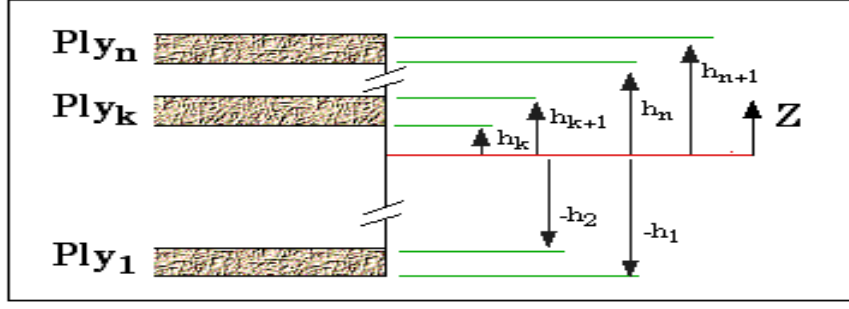


Şekil 3.8 Bileşik Tabakadaki Momentler

$$M_X = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad M_Y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z dz \quad M_{XY} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xy} z dz \quad [3.17]$$

4.5.6 N Tabakadan Oluşan Bileşik Tabaka Teorisi

N tabakadan oluşan bir kompozit plaktaki tabaka kalınlıklarının gösterimi Şekil 3.9'deki gibidir. Burada h_k simetri düzleminin sonraki ilk tabaka kalınlığıdır. h_n , N'inci tabakanın simetri düzlemine olan uzunluğudur.



Şekil 3.9 Kompozit Plak Geometrisi[İnt.Kyn.2]

\bar{Q}_{ij} (indirgenmiş Q_{ij} rijitlik matrisi yerine) transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir.

$$\begin{Bmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\}$$

$$\begin{Bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad [3.18]$$

$$\begin{Bmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{kısaca [3.19] gibi yazılabilir.}$$

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad [3.19]$$

Aşağıdaki formülde A,B ve D rijitlik matrisleridir.

A; Genleşme rijitliği,

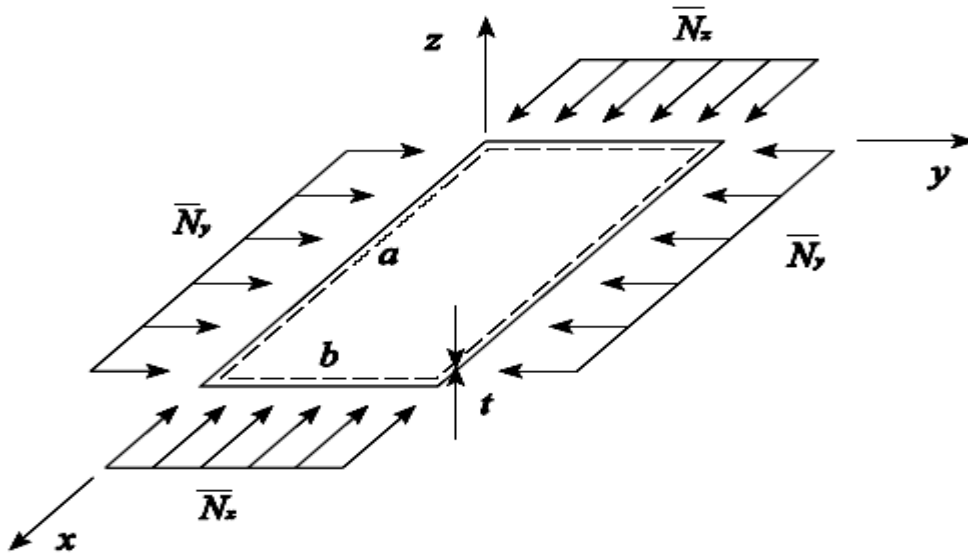
B; Bağlantı rijitliği

D; Eğilme rijitliği olarak adlandırılır(Demirkesen 1991)

$$\begin{aligned}
A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\
B_{ij} &= 1/2 \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \\
D_{ij} &= 1/3 \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

3.5.7 Basit Mesnetli Kompozit Plağın Burkulması

Kompozit plaklar basma, çekme gibi durumların yanında aksenal kuvvetlere maruz kalması (Şekil 3.10) ile stabiliteleri bozulur. Burkulma yükü, tabaka diye tabir edilen her malzeme için önemle dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Burkulma yükünün tespiti tasarımcılar için büyük önem arz etmektedir.



Şekil 3.10 Çift eksenli yüklemeye maruz basit mesnetli kompozit plak

Simetrik tabakalama yapılıması ile $[B]=0$ olur. Ayrıca indeksleri 16, 26, 61, 62 olan $[D]$ matrisleride hesaplanmaz orthotropik indeks olduğundan dolayı;

$$\lambda_b(m,n) = \pi^2 \left[\frac{m^4 D_{11} + 2(D_{12} + D_{66})(rmn)^2 + (rn)^4 D_{22}}{(am)^2 N_x + (ran)^2 N_y} \right] \tag{3.21}$$

Denklem [3.21]'e baktığımızda çıkarılması gereken birtakım sonuçlar vardır. Burada m ve n burkulma yüklemesi durumunda dalga sayılarıdır m ve n 'nin en az bir tanesi 1 olmalıdır. Birisine bağlı olarak diğeri değiştirilerek farklı sonuçlar elde edilir. Ayrıca m ve n 'den hangisinin 1 olduğu önemlidir. Açıklık oranı olarak bilinen r , a/b 'yi yani tabakayı geometrik olarak ifade eder. çizelge 4.2 yükleme durumları ve tabaka geometrik boyutları verilmektedir.

4. BULGULAR

4.1 Giriş

Endüstride kullanılan kompozit yapılar genelde tabaka halindedir. Hava uzay yapıları, marineleri, otomotiv vb. bu yapılara sıklıkla rastlamak mümkündür. Bir tabaka matris ve fiberlerden oluşur. Fiberler çok küçük yapıda olan malzemedir ve matrisle birleşerek tabakayı oluştururlar. Matris ise bu fiberleri bir arada tutan yapıdır. Herhangi bir kompozit yapı statik ve dinamik yükler altında kendisine gelen kuvvetleri matris yardımıyla fiberlere iletir. Ayrıca matris tabakadaki fiber yapıyı daha stabil ve uniform yapıda kalmasını sağlar. Bir tabaka fiber doğrultusunda dayanımı maksimum iken, fibere dik doğrultuda 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.

Tabakalı kompozit yapıların optimizasyonu geçmişte klasik sürekli optimizasyon yöntemleri ile yapılmıştır. Tasarım parametreleri olarak tabaka açıları sürekli değişkenler olarak alınmakta ve sürekli olan amaç fonksiyonu gradyan esaslı optimizasyon teknikleri ile çözülmektedir. Bulunan tabaka açıları, daha sonra imalat açısından pratik açılara dönüştürmek için en yakın değere yuvarlatılmakta bu da gerek amaç fonksiyonundan farklı değerleri gerekse de kısıt fonksiyonlarının sağlanmamasını sonuçlandırmaktadır(Gantovnik et all. 2002). Ayrıca gradyan esaslı optimizasyon tekniklerinde optimum değer genellikle başlangıç şartlarına bağlı ve de başlangıç noktasına en yakın lokal noktalarında bulunmaktadır. Global optimumun bulunması için farklı başlangıç değerleri alınarak sonuca ulaşılması amaçlanmaktadır.

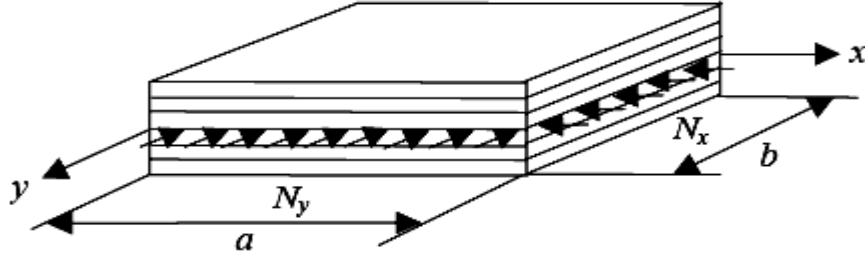
4.2 Optimizasyon Çalışmaları

Bu çalışmada gerek genetik algoritma gerekse model arama yöntemleriyle ilgili çeşitli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan tabaka açıları sadece 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° den oluşmaktadır. Optimizasyon çalışmasında kullanılan kompozit plak dikdörtgen bir geometriye sahiptir. Plâğın rijitlik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Farklı yükleme durumları ve farklı tabaka geometrisi dikkate alınarak, çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ile ilgili bilgiler Çizelge 4.2’de verilmektedir. Her iki optimizasyon metodu ile ayrı ayrı yapılan optimizasyon çalışmaları Çizelge 4.3 ile 4.40 arasında verilmiştir. Optimizasyon çalışması sırasında kullanılan Bilgisayar 1.73 Centrino işlemci ve 512 MB Ram’a sahip bir bilgisayardır.

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 maruz olup tabaka kalınlıkları aynı olacak şekilde grafit/epoksiden yapılmıştır. Bu yükleme altında özel ortotropik kompozit plak için analitik çözüme dayalı burkulma katsayısı şu formülden bulunabilmektedir (Erdal ve Sönmez 2005).

$$\lambda_b(m,n) = \pi^2 \left[\frac{m^4 D_{11} + 2(D_{12} + D_{66})(rnmn)^2 + (rn)^4 D_{22}}{(am)^2 N_x + (ran)^2 N_y} \right] \quad [4.1]$$

[4.1] denkleminde λ_b burkulma katsayısı; m ve n sıra ile x ve y yönlerindeki yarım dalga sayıları; açıklık oranı $r = a/b$ ve D_{ij} ise kompozit plâğın eğilme rijitlikleridir. Burkulma yükleri ise $N_{x_{cb}} = \lambda_b N_x$ ve $N_{y_{cb}} = \lambda_b N_y$ den bulunabilir. Burkulma katsayısı denklemini, özel orthotropik kompozit plak (0° ve 90° açılar içeren tabakalar) için geçerlidir. Ancak çok tabakalı simetrik plâklarda 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 (Somerekun 2001).



Şekil 4.1 İki Eksenli Yük Altında Kompozit Plak

Burkulma katsayısı m ve n ye bağlı olarak değişmektedir. En düşük burkulma katsayısı kritik burkulma katsayısı λ_{cb} 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 4.1'de ele alınan tabakalı plak görülmektedir.

Optimizasyon çalışmaları için Matlabın genetik algoritma ve model arama araç kutularından faydalanılmıştır. Programın arayüzü hakkında bilgiler kısa olarak **Ek. 1**'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 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 4. 2 Optimizasyonu yapılan 64 tabakalı plağın yükleme durumları ve tabaka boyutları

| Yükleme durumu | a (m) | b (m) | N_x (N/m) | N_y (N/m) |
|-----------------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.508 | 0.508 | 1 | 1 |
| 2 | 0.508 | 0.508 | 1 | 2 |
| 3 | 0.508 | 0.508 | 1 | 0.5 |
| 4 | 0.508 | 0.254 | 1 | 1 |
| 5 | 0.508 | 0.254 | 1 | 2 |
| 6 | 0.508 | 0.254 | 1 | 0.5 |
| 7 | 0.508 | 0.1016 | 1 | 1 |
| 8 | 0.508 | 0.1016 | 1 | 2 |
| 9 | 0.508 | 0.1016 | 1 | 0.5 |

4.2.1 Genetik Algoritma İle Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

Yapılan çalışmada dört kenarından basit mesnetli simetrik tabakalı kompozit bir plağın burkulması 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. Reel sayıların kullanımı ile yapılan optimizasyonda bulunacak tabaka açıları küsurlu olabilmekte, pratik olarak kullanılabilmesi için en yakın doğal sayıya yuvarlatma yapılması gerekmektedir. Bu da optimum sonuçtan sapmalara yol açmaktadır. İmalat açısından pratik çözüm için genlere karşılık değerler doğal sayılar alınmaktadır. Örneğin tasarımda sadece 0° ve 90° lik tabaka açıları kullanılacaksa genlerin alacağı değerler bu açılara karşılık gelecek şekilde sırayla 0 ve 1 olmaktadır. İkiden fazla tabaka açıları kullanılacaksa yine bunlar da ilave doğal sayılarla

ifade edilebilir. Plakada 64 tabaka olmakla birlikte, simetrik tabakalama ile parametre sayısı 32'ye ve tabaka açılarının aynı ikili gruplardan oluşması ile 16'ya düşmektedir. Bu durum model arama yöntemi için de geçerlidir. Genetik algoritma işleminde gen uzunluğu sabit alınmıştır. Genetik algoritma parametreleri için bir ön çalışma yapılmış olup Popülasyon Büyüklüğü=40, Çaprazlama Olasılığı=0.8, Mutasyon Olasılığı=0.01 olarak alınmıştır. Yapmış olduğumuz yükleme durumu ve plak geometrisi bağlı olarak elde edilen maksimum burkulma için tabaka açılarının yanında çoklu popülasyon (paralel genetik algoritma) kullanılarak ta çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan program ile ilgili birtakım bilgiler **Ek. 1** kısmında verilmektedir.

Tasarım değişkeni olarak 0_2° ve 90_2° açılı tabakalar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri *Çizelge 4.3 ile 4.12* arasında verilmiştir. Genetik algoritma ile 0_2° ve 90_2° tabakaları için yapılan optimizasyon çalışmalarında her bir tablo için 40 çalışma yapılmıştır. Birbirinin aynısı olan birçok konfigürasyon elde edilmiştir. Yapılan çalışma da birden fazla global optimum konfigürasyon bulunmuştur.

Çizelge 4.12'da gösterilen konfigürasyonlar ve kritik burkulma yükleri Çizelge 5.3 ile 5.12 arasında elde edilen çizelgelerin kısa bir özeti denilebilir. Çizelge 4.12'de farklı olarak imalat açısından üretimi kolay ve diğer konfigürasyonlara nazaran daha ekonomik olan konfigürasyonlar seçilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi konfigürasyonlar 3 veya 4 farklı tabaka diziliminden oluşmaktadır. Kritik burkulma katsayısı açısından ele alındığında ise plak geometrisini büyümesiyle kritik burkulma katsayısı düşmekte, plak geometrisin küçülmesiyle kritik burkulma katsayısı artmaktadır. Çizelge 4.3 ile 4.12 arasında elde edilen konfigürasyonlar da bizim amacımız sadece en basit, üretimi kolay ve ekonomik konfigürasyonu bulmak değildi. Ayrıca bulunabilecek kaç farklı konfigürasyon olduğunu bulmaktı

Çizelge 4.3 $N_x/N_y=1$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₁₆ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] | 150111.7 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₆ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₂] | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₁₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₈] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₁₈ /0 ₁₀] | 150111.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |

Çizelge 4.4 $N_x/N_y=1$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|-------------------------|
| [90 ₂₀ /0 ₁₀ /90 ₂] | 600443.4 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂] | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₈] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₂₂ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 600443.4 |

Çizelge 4.5 $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [0 ₂₀ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₂₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₆ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₁₂ /90 ₈ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |

Çizelge 4.6 $N_x/N_y=2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₄ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₈] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₆] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₁₆] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₈] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₁₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₆ /90 ₈] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄] _s | 200147.2 |

Çizelge 4.7 $N_x/N_y=2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|-------------------------|
| [90 ₂₀ /0 ₁₀ /90 ₂] | 800590.6 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₁₀] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 800590.6 |

Çizelge 4.8 $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| [0 ₂₄ /90 ₂ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₄ /90 ₆ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₂ /90 ₄ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₁₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₁₀ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₈ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₂ /0 ₈] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /0 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₂₀ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₂ /0 ₈ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₂ /0 ₁₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₁₄ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₁₄ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₁₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₁₂ /90 ₄] _s | 200147.2 |

Çizelge 4.9 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₈ /0 ₁₀ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₆ /0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₂ /0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₆ /90 ₈] _s | 100072.7 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₆ /90 ₈] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₁₀] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |

Çizelge 4.10 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| [90 ₂₄ /0 ₂ /90 ₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₁₀] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₆ /90 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₁₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 400294.5 |

Çizelge 4.11 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [0 ₂₂ /90 ₄ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₂₀ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₂₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₁₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₁₀ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₁₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |

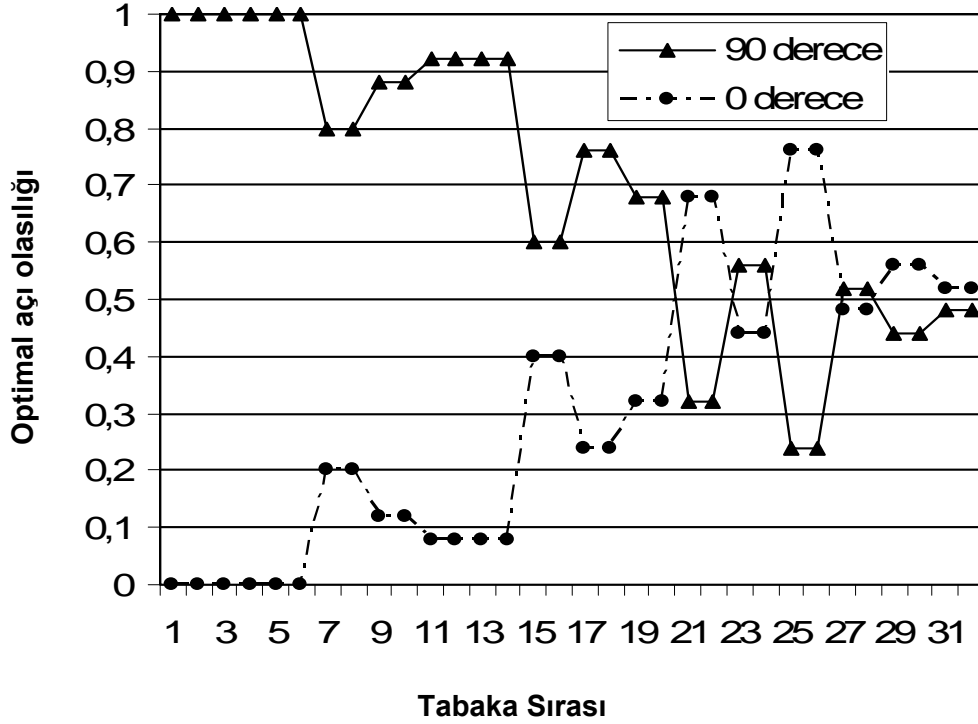
Yaptığımız çalışmada program her bir durum için 40 kez çalıştırıldı ve elde edilen farklı konfigürasyon sayısı örneğin; $N_X/N_Y=1$, $a/b=2$ için 40 çalışma da 25 farklı konfigürasyondur. Şayet program eğer 100 kez çalıştırılırsa bulunacak olan farklı konfigürasyon sayısı da her bir yükleme durumu için değişecektir. Ayrıca bulunan farklı konfigürasyonlar ile birlikte tabakalı kompozit yapıların burkulma yükleri altında nasıl refleks gösterdiği belirlendi.

Çizelge 4.12’de $N_X/N_Y=1$, $a/b=1$ ile $N_X/N_Y=1$, $a/b=1/2$ durumları incelenirse her ikisinin de kritik burkulma katsayıları eşittir. Buna karşın geometrileri farklıdır. Biri kare plak iken diğeri dikdörtgen plaktır. $N_X/N_Y=1$ $a/b=2$ ile $N_X/N_Y=1/2$ $a/b=2$ incelersek açıklık oranları aynı olmasına rağmen kritik burkulma katsayısı birincisinin 600443.4 iken ikincisinin 400294.4’tür. Yani Y yönündeki birim yük yarıya düştüğü zaman kritik burkulma 1.5 kat azalmaktadır. Bu durumun tersi yani $N_X/N_Y=1$ $a/b=1$ ile $N_X/N_Y=2$ $a/b=1$ incelenirse açıklık oranı aynıdır ve Y yönündeki birim yük iki katına çıkarıldığı zaman kritik burulmada 1.5 kat artmaktadır.

Çizelge 4.12 Genetik algoritma ile 90° ve 0° tabakaları kullanarak farklı yükleme ve açıklık oranları için bulunan kritik burkulma katsayıları

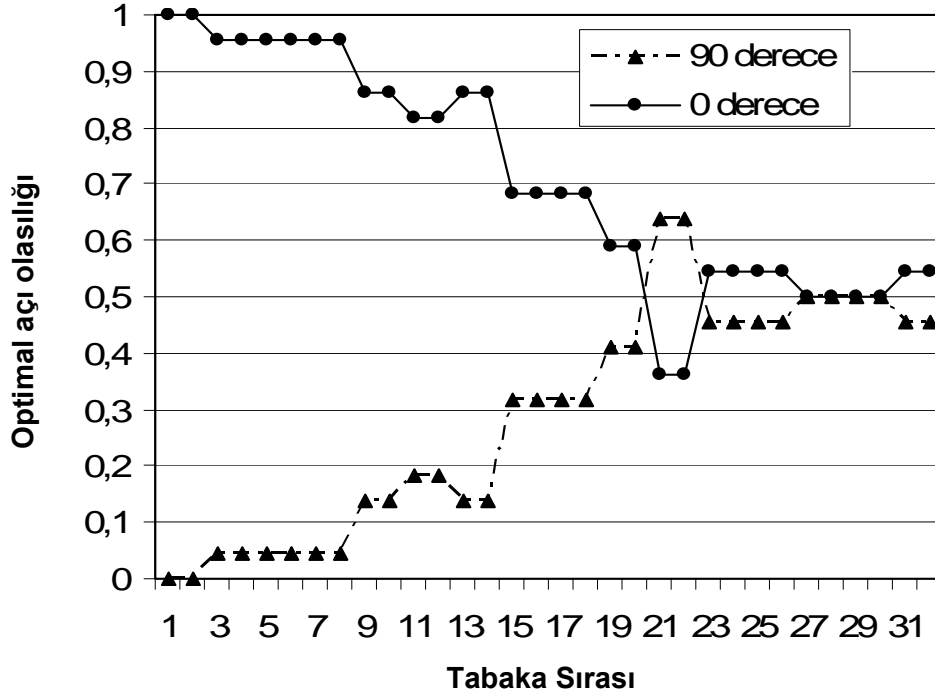
| Yükleme Durumu | Açıklık Oranı (r) | Global Optimum İçin Bir Örnek | Kritik Burkulma Katsayısı λ_{cb} | Bulunan Global Optimum Konfigürasyonlar |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--|---|
| $N_X/N_Y=1$ | $a/b=2$ | $[90_{20}/0_{10}/90_2]_s$ | 600443.4 | 40(25) |
| | $a/b=1$ | $[0_4/90_{18}/0_{10}]$ | 150111.7 | 40(27) |
| | $a/b=1/2$ | $[0_{12}/90_{12}/0_4/90_4]_s$ | 150111.7 | 40(25) |
| $N_X/N_Y=2$ | $a/b=2$ | $[90_{18}/0_2/90_2/0_{10}]_s$ | 800592.4 | 40(26) |
| | $a/b=1$ | $[90_{14}/0_4/90_2/0_{12}]_s$ | 200147.2 | 40(24) |
| | $a/b=1/2$ | $[0_{20}/90_{12}]_s$ | 200147.2 | 40(23) |
| $N_X/N_Y=1/2$ | $a/b=2$ | $[90_{22}/0_{10}]_s$ | 400294.4 | 40(26) |
| | $a/b=1$ | $[90_{18}/0_{10}/90_4]_s$ | 100072.7 | 40(29) |
| | $a/b=1/2$ | $[0_{10}/90_{22}]_s$ | 100072.7 | 40(27) |

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de 0_2° ve 90_2° lik tabaka açıları kullanılarak bulunan global optimum tabakalama açılarının plak kalınlığı boyunca istatistiksel dağılımı görülmektedir. Simetriden dolayı ilk 32 tabaka verilmektedir. Şekilde tabaka sırası 1 en alt ve 32 ise ortadaki tabakayı göstermektedir.



Şekil 4.2 Optimal açı olasılığının tabaka sırasına göre değişimi $a/b=2$, $N_x/N_y=1$ (0_2° ve 90_2° lik tabakalar)

Plağın simetri düzlemine yakın bölgelerde 0° ve 90° tabakaların bulunma olasılıkları birbirine yakın iken plağın alt veya üst kısımlarına yaklaşıldığında 90° tabakaların bulunma olasılığı artmakta ve 0° tabakaların bulunma olasılığı ise azalmaktadır. Bu da plak genişliği boyunca burkulma yükünü artırmak için daha rijit bir yapıda olması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.3 Optimal açılış olasılığının tabaka sırasına göre değişimi $a/b=1/2$, $N_x/N_y=1$ (0_2^0 ve 90_2^0 lik tabakalar)

Çizelge 4.13 Popülasyon büyüklüğünün ve algoritma çalışma sayısının global optimum sayısına etkisi, $N_x/N_y=1$, $a/b=2$, (0_2^0 , $\pm 45^\circ$ ve 90_2^0)

| Popülasyon Büyüküğü | Ortalama CPU Zamanı (s)* | Program Çalışma Sayısı | | | |
|------------------------|-----------------------------------|------------------------|------|-------|-------|
| | | 25 | 50 | 75 | 100 |
| [20] | 1.566 | 2(1) | 4(1) | 8(2) | 9(3) |
| [40] | 3.555 | 2(2) | 4(2) | 6(4) | 10(5) |
| [60] | 4.766 | 4(2) | 6(2) | 8(4) | 12(6) |
| [80] | 7.842 | 3(2) | 6(3) | 10(4) | 13(6) |

* :Bulunan ilk 10 global optimum için
Parantez içindeki değerler bulunan farklı konfigürasyonları göstermektedir.

Çizelge 4.13’de 0_2° , $\pm 45^\circ$ ve 90_2° açıları kullanılarak ve $N_x/N_y=1$, $a/b=2$ durumu için çalışma yapılmıştır. Çalışmada popülasyon büyüklüğünün ve algoritma çalışma sayısının global optimum sayısına etkisi incelenmiştir. Çizelgeye genel olarak bakıldığında popülasyon sayısı arttıkça bulunan global optimum sayısı ve ortalama CPU süresi de artmaktadır. Çizelgedeki birkaç değeri karşılaştıracak olursak popülasyon sayısı 40 iken 100 çalışma sonrasında 10 adet global optimum bulunmuştur ve bunların 5’i farklı konfigürasyondur. CPU süresi 3.555’tir.

Popülasyon sayısı 80 iken aynı çalışma sayısında 13 adet global optimum bulunmuş bunların 6’sı farklı konfigürasyonlardır. CPU süresi ise 7,842’dır. Yaklaşık olarak aynı sayıda global optimumu bulan (10-13) farklı popülasyonların CPU süresi biri diğerinin yaklaşık iki katı kadardır.

Çizelge 4.14’de 0_2° , $\pm 45^\circ$ ve 90_2° açıları kullanılarak ve $N_x/N_y=1$, $a/b=2$ durumu için çalışma yapılmıştır. İkili popülasyon gruplarının ve algoritma çalışma sayısının global optimum sayısına etkisi incelenmiştir

Çizelge 4.14 İkili popülasyon gruplarının ve algoritma çalışma sayısının global optimum sayısına etkisi, $N_x/N_y=1$, $a/b=2$, (0_2° , $\pm 45^\circ$ ve 90_2°)

| Popülasyon Büyüküğü | Ortalama CPU zamanı (s)* | Program Çalışma Sayısı | | | |
|------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| | | 25 | 50 | 75 | 100 |
| [20,20] | 3.602 | 5(3) | 8(4) | 15(8) | 18(8) |
| [20,30] | 4.426 | 3(3) | 8(4) | 12(6) | 17(6) |
| [20,40] | 4.818 | 4(2) | 10(6) | 15(6) | 17(7) |
| [30,30] | 5.160 | 4(3) | 13(6) | 16(6) | 19(8) |
| [30,40] | 5.900 | 6(5) | 11(6) | 14(7) | 20(7) |
| [40,40] | 6.850 | 7(6) | 13(7) | 19(8) | 25(8) |

* : Bulunan ilk 10 global optimum için
: Parantez içindeki değerler bulunan farklı konfigürasyonları göstermektedir.

Aynı çalışma sayısı için ikili populasyon sayısı arttıkça, bulunan global optimum sayısı da artmaktadır. [20,20] ile [40,40] ikili populasyonları karşılaştıracak olursak birincisinde 18 ikincisinde ise 25 global optimum bulunmuştur. Bulunan farklı global optimum sayısına bakacak olursak her ikisinde de eşit sayıda global optimum bulunmuştur. Ama CPU süresi açısından biri diğerinin yaklaşık iki katı kadardır.

Çizelge 4.13 ile Çizelge 4.14'ü karşılaştırdığımızda ikili populasyon gruplarının, bulunan global optimum sayıları genel anlamda fazladır. [40] ile [20,20] populasyonlarına bakacak olursak birincisinde bulunan global optimum sayısı 100 çalışma sonrası 10 adettir. İkili populasyon grubunda ise 17 adettir. Bununla birlikte her iki populasyon grubunda CPU süresi eşittir. Ayrıca ikili populasyon grubundan elde edilen farklı global optimum sayıları da [20,20] için 8 adetken [40] için 6 adettir. Sonuçta her iki çalışmanın da populasyon sayıları eşit olmasına karşın ikili populasyon gruplarıyla yapılan çalışmada, hem çok sayıda hem farklı global optimumlar elde edilmiştir.

Tabaka açıları olarak 0_2° , $\pm 45^\circ$ ve 90_2° kullanılarak elde edilen burkulma yükleri ve konfigürasyonlar Çizelge 4.15 ile 5.23 arasında verilmiştir. Yapılan çalışmada 0_2° ve 90_2° tabaka açıları kullanılarak yapılanın aksine program her bir yükleme durumu için farklı sayılarda çalıştırılmıştır. Bunun sebebi global optimumun o nokta olup olmadığını anlamak ve aynı kritik burkulma yükünde farklı konfigürasyonların varlığını belirlemektir.

Çizelge 4.15 $N_x/N_y=1$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|----------------------------|--|
| $[\pm 45_{16}]_s$ | 242823.9 |

Çizelge 4.15 için program 30-40 kez çalıştırılmıştır. Bir tane global optimum vardır. Ancak bu nokta civarında lokal minimumlar mevcuttur.

Çizelge 4.16 $N_x/N_y=1$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açıları | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[90_{10}/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4]_s$ | 695781.0 |
| $[90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45_7/90_2/\pm 45]_s$ | 695781.0 |
| $[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{14}]$ | 695781.0 |
| $[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_6]$ | 695781.0 |
| $[90_4/\pm 45_2/90_{16}/\pm 45/90_6]_s$ | 695781.0 |
| $[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]$ | 695781.0 |
| $[90_2/\pm 45/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_{10}]_s$ | 695781.0 |
| $[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_8/\pm 45/90_8]_s$ | 695781.0 |
| $[\pm 45/90_8/\pm 45/90_{18}/\pm 45]_s$ | 695781.0 |

Çizelge 4.16 için program 200 kez çalıştırıldı. Global optimuma yakın çok sayıda local minimum olduğu görülmüştür. Bulunan global optimum sayısı toplam 9 adettir.

Çizelge 4.16 aynı zamanda literatürde de kullanılmıştır(*Erdal ve Sönmez 2005*). Bizim çalışmamızda da daha ayrıntılı bir şekilde Çizelge 4.24 ele alınacaktır.

Çizelge 4.17 $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| $[0_{10}/\pm 45_2/0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45_4]_s$ | 173944.8 |
| $[0_{10}/\pm 45/0_2/\pm 45_7/0_2/\pm 45]_s$ | 173944.8 |
| $[0_8/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_{14}]$ | 173944.8 |
| $[0_8/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_6]$ | 173944.8 |
| $[0_4/\pm 45_2/0_{16}/\pm 45/0_6]_s$ | 173944.8 |
| $[0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_{10}/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4]$ | 173944.8 |
| $[0_2/\pm 45/0_6/\pm 45/0_8/\pm 45/0_{10}]_s$ | 173944.8 |
| $[\pm 45/0_{10}/\pm 45/0_8/\pm 45/0_8]_s$ | 173944.8 |
| $[\pm 45/0_8/\pm 45/0_{18}/\pm 45]_s$ | 173944.8 |

Çizelge 4.17 için program 200 kez çalıştırıldı. Global optimuma yakın çok sayıda local minimum olduğu görülmüştür. Bulunan global optimum sayısı toplam 9 adettir.

Çizelge 4.16 ile Çizelge 4.17 simetrik özellik göstermektedir. Kullanılan tabaka açıları dikdörtgen plağın durumuna göre refleks göstermiş. 0_2° ve 90_2° 'ler birbirleriyle burkulma zorlanmasına göre yer değiştirmişlerdir. Açıklık oranından dolayı ise kritik burkulma yükleri farklılık göstermektedir. Çizelge 4.17 için $[0_8/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_{14}]$ konfigürasyonu, Çizelge 4.16 için ise $[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{14}]_s$ konfigürasyonunda sadece 0_2° ve 90_2° 'ler farklıdır.

Çizelge 4.18 $N_x/N_y=2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---------------------|-------------------------|
| $[\pm 45_{16}]_s$ | 323764.0 |

Çizelge 4.18 için program 30-40 kez çalıştırılmıştır. Bir tane global optimum vardır. Program her çalıştırıldığında aynı kritik burkulma yükünü bulmuştur. Local minimumlar yoktur.

Çizelge 4.19 $N_x/N_y=2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|-------------------------|
| $[90_4/\pm 45_5/90_6/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_6/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45_2/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_6/\pm 45_3/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_4/\pm 45/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_2/90_6]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45_2/90_8/\pm 45_2/90_2/\pm 45]_s$ | 1057948.3 |

| | |
|---|-----------|
| $[\pm 45/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_6/\pm 45_4/90_2/\pm 45/90_4]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_8/\pm 45/90/\pm 45_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45_4/90_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_{12}/\pm 45_4]_s$ | 1057948.3 |

Çizelge 4.19 için program 120 kez çalıştırıldı. Global optimuma yakın çok sayıda local minimumlar vardır. Bulunan farklı konfigürasyon sayısı toplam 16 adettir.

İmalatı en kolay konfigürasyon olarak ise $[\pm 45/90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_{12}/\pm 45_4]_s$ gösterilebilir. Şayet çalışma sayısı artırılabilecek olursa veya genetik algoritma operatörleri ile ilgili farklı varyasyonlar denenirse daha farklı konfigürasyonlarda bulunabilir.

Çizelge 4.20 $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[0_{16}/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_s$ | 206493.8 |

Çizelge 4.20 için bir tane global optimum bulunmuştur. Program 80 kez çalıştırılmıştır. Bulunan nokta civarında çok sayıda lokal minimumlar mevcuttur.

Çizelge 4.21 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|----------------------------|--------------------------------|
| $[\pm 45_{16}]_s$ | 161882.0 |

Çizelge 4.21 için tek global optimum vardır ve program her çalıştırıldığında aynı değer bulunmuştur. Global optimuma yakın civarda lokal minimum yoktur.

Çizelge 4.22 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[90_{16}/\pm 45/90_6/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2]_s$ | 412985.9 |

Çizelge 4.22 için bir tane global optimum bulunmuştur. Program 80 kez çalıştırılmıştır. Bulunan nokta civarında çok sayıda lokal minimumlar mevcuttur.

Çizelge 4.23 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[\pm 45_3/0_{12}/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45_2/0_4/\pm 45/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_6/\pm 45_5/0_8/\pm 45_2/0_2]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_6/\pm 45_3/0_2]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_8/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_4/\pm 45]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_4]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_4/0_6]_s$ | 132243.6 |
| $[\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_8/\pm 45_3]_s$ | 132243.6 |
| $[0_4/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_s$ | 132243.6 |
| $[0_4/\pm 45_2/0_2/\pm 45_5/0_{10}/\pm 45]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45_4/0_{12}/\pm 45/0_2/\pm 45_3]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45_3/0_6/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45_2]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45_3/0_2/\pm 45/0_6/\pm 45/0_6/\pm 45_3]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45_3/0_8/\pm 45_5/0_6]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45_3/0_4/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2]_s$ | 132243.6 |
| $[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_3/0_4/\pm 45/0_2]_s$ | 132243.6 |

Çizelge 4.23 için program 120 defa çalıştırılmış ve yukarıdaki konfigürasyonlar elde edilmiştir. Global minimum etrafında birçok local minimum noktası mevcuttur. Bulunan konfigürasyonlar sıklıkla kendini tekrar etmiştir. 120 çalışma sonrasında bulunan farklı konfigürasyon sayısı sadece 18 adettir. İmalatı en kolay konfigürasyon olarak ise $[0_2/\pm 45_3/0_8/\pm 45_5/0_6]_s$ gösterilebilir. Şayet çalışma sayısı artırılacak olursa veya genetik algoritma operatörleri ile ilgili farklı varyasyonlar denenirse daha farklı konfigürasyonlarda bulunabilir.

Çizelge 4.24 Global optimal tasarımlar, $a/b=2$, $N_x/N_y=1$ (0_2° , $\pm 45^\circ$ ve 90_2°)

| Tabakalama açıları | λ_{cb} Genetik Alg. | λ_{cb} [1] | λ_{cb} [2] | λ_{cb} [3] |
|---|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $[90_{10}/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | 3973.01 | - |
| $[90_{10}/\pm 45/90_2/\pm 45_7/90_2/\pm 45]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | - | - |
| $[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45_3/90_{14}]_s$ | 695781 (3973.01) | - | - | - |
| $[90_8/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_6]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | - | - |
| $[90_4/\pm 45_2/90_{16}/\pm 45/90_6]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | 3973.01 | 3977.12 |
| $[90_4/\pm 45/90_2/\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_4/\pm 45/90_4]_s$ | 695781 (3973.01) | - | - | - |
| $[90_2/\pm 45/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_{10}]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | 3973.01 | 3977.12 |
| $[\pm 45/90_{10}/\pm 45/90_8/\pm 45/90_8]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | 3973.01 | 3977.12 |
| $[\pm 45/90_8/\pm 45/90_{18}/\pm 45]_s$ | 695781 (3973.01) | 3973.01(-) | 3973.01 | - |

Çizelge 4.24’de $a/b=2$, $N_x/N_y=1$; 0_2° , $\pm 45^\circ$ ve 90_2° lik tabaka açıları için genetik algoritma ile yapılan çalışma sonucu elde edilen global optimum konfigürasyonlar literatürdeki sonuçlarla birlikte verilmektedir. Burkulma katsayıları Amerikan sisteminde verilmektedir. Buna göre *Erdal ve Sönmez* (2005) yedi, *Somerekun ve arkadaşları* (2001) beş, *Mohan Rao ve Arwind* (2006) ise üç adet konfigürasyon bulunduğu görülmektedir. Bizim yaptığımız çalışmada ise dokuz farklı global optimum konfigürasyon bulunmuştur.. Farklı global optimum konfigürasyonları bulabilmek için program 120 kez çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonucu bazı konfigürasyonların diğerlerine göre daha fazla bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca problemde global optimuma çok yakın lokal optimumlarda olduğu için bazı çalışmalarda global optimum yakalanamamıştır.

Burkulma katsayıları karşılaştırıldığında bulunan sonuçlar *Somerekun ve arkadaşları* (2001) ile tamamen aynıdır; fakat *Erdal ve Sönmez* (2005) ile karşılaştırıldığında burkulma katsayısı arasında yaklaşık 175 kat fark vardır. Burkulma katsayısı boyutsuz bir büyüklüktür. Aynı malzeme ve konfigürasyon için burkulma yüklerinin ele alınan birim sisteminden bağımsız olarak eşit olması gerekir. Örneğin bu durumda kritik burkulma yükleri metrik sistemde $N_{x_{cb}} = N_{y_{cb}} = \lambda_{cb} N_x = 695781 \times (1\text{N/m}) = 695781 \text{ N/m}$ ve Amerikan sisteminde $N_{x_{cb}} = N_{y_{cb}} = \lambda_{cb} N_x = 3973.01 \times (1 \text{ lbf/in}) = 3973.01 \text{ lbf/in}$ 'dir. Bu iki değer birim dönüşümü yapılırsa aynı sonucu vermektedir. Burkulma hesabında genellikle birim yükler uygulanmakta ve buna bağlı olarak burkulma katsayısı elde edilmektedir. Dolayısı ile burkulma katsayısı, ele alınan birim sistemine göre farklılık göstermektedir. *Somerekun ve arkadaşları* (2001) ile *Erdal ve Sönmez* (2005) farklı birim sistemleri kullanmalarına rağmen, *Erdal ve Sönmez* (2005)'in *Somerekun ve arkadaşları* (2001) ile aynı burkulma katsayısını bulması ilginçtir. Bu da *Erdal ve Sönmez* 2005'in optimizasyon yaparken aslında Amerikan birim sistemini kullandığını fakat sonuçları metrik sistemde verirken burkulma katsayısını dönüştürmeden verdiğini göstermektedir. Ayrıca *Mohan Rao ve Arwind* (2006) 'ü diğer literatür çalışmaları ve bizim yaptığımız çalışmayla karşılaştıracak olursak bulduğu kritik burkulma katsayısı 3977.12'dir. Ancak bulduğu konfigürasyonlar ne bizim ne de literatürdeki konfigürasyonlardan hiçbir farkı yoktur. Aynı malzeme özelliklerini kullanarak aynı konfigürasyon için *Mohan Rao ve Arwind'nın* (2006) farklı bir burkulma katsayısını (3977.12) bulması ilginçtir.

4.2.2 Model Arama ile Yapılan Optimizasyon Çalışmaları

Genetik algoritmaya benzer şekilde optimizasyon çalışması model arama yöntemini kullanılarak da yapılmıştır.

Yapılan çalışmada dört kenarından basit mesnetli simetrik tabakalı kompozit bir plâğın burkulması optimize edilmektedir. Simetrik yapıdan dolayı GA da olduğu gibi model aramada da sadece plâğın yarısını temsil etmektedir. Model arama ile yapılan çalışmada global optimumu önemli derecede etkileyen parametreler için bir ön çalışma yapılmış

olup Izgara (Mesh) büyüklüğü 0.5, Genişleme (Expansion) Faktörü=2, Gerileme(kısalma) Faktörü=0.5, Tarama (Poll) Metodu olarak Pozitif 2N kullanılmıştır. Yapmış olduğumuz yükleme durumu ve plak geometrisi bağlı olarak elde edilen maksimum burkulma için tabaka açıları bulunmuştur. Model arama yönteminde kullanılan program ile temel bilgiler **Ek 1** kısmında verilmektedir.

Tasarım değişkeni olarak 0_2° ve 90_2° açılı tabakalar kullanılarak elde edilen kritik burkulma yükleri ve konfigürasyonlar çizelge 4.25 ile 4.33 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.25 $N_x/N_y=1$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| [90 ₁₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₆ /90 ₆] | 150111.7 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [90 ₆ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₆ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /90 ₁₀ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₁₄ /90 ₆ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 150111.7 |

Çizelge 4.26 $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₈] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₈] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₀] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₂₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₁₀] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₁₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂₆] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂₂ /90 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄] _s | 150111.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂] _s | 150111.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₈ /90 ₂ /0 ₈] _s | 150111.7 |

Çizelge 4.27 $N_x/N_y=1$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|-------------------------|
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₆ /0 ₆ /90 ₁₀] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₆ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₄ /90 ₁₂ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₁₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₂ /0 ₆ /90 ₈ /0 ₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₁₈ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 600443.4 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₈] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₁₀ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₈ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₈ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₁₆ /0 ₈] _s | 600443.4 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₈ /90 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₆ /90 ₈] _s | 600443.4 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 600443.4 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₈] _s | 600443.4 |

Çizelge 4.28 $N_x/N_y=2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [90 ₁₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₁₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₁₀ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₆] _s | 200147.2 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₁₄] _s | 200147.2 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₁₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₁₀] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₈] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 200147.2 |
| [0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 200147.2 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 200147.2 |

Çizelge 4.29 $N_x/N_y=2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|-------------------------|
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₄ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₄] _s | 800590.6 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 800590.6 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 800590.6 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂₀ /0 ₄] _s | 800590.6 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂₄] _s | 800590.6 |
| [0 ₂ /90 ₂₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 800590.6 |
| [0 ₂ /90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 800590.6 |

Çizelge 4.30 $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| $[0_{28}/90_2/0_2]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{26}/90_2/0_4]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{24}/90_6/0_2]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{22}/90_2/0_2/90_6]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{22}/90_2/0_2/0_6]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{22}/90_4/0_2/90_2/0_2]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{22}/90_2/0_2/90_6]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{22}/90_2/0_4/90_2/0_2]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{20}/90_2/0_2/90_2/0_2/90_4]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{20}/90_2/0_{10}]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{20}/90_2/0_2/90_4/0_2/90_2]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{20}/90_2/0_2/90_2/0_6]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{18}/90_2/0_{12}]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{18}/90_2/0_6/90_4/0_2]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{16}/90_2/0_8/90_2/0_4]_s$ | 200147.2 |
| $[0_{14}/90_2/0_{16}]_s$ | 200147.2 |

Çizelge 4.31 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₄ /90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₆ /0 ₈ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₆ /0 ₈ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₁₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₁₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |

Çizelge 4.32 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| [90 ₂₄ /0 ₆ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₄ /0 ₂ /90 ₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₄ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₁₀] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₄ /90 ₈] _s | 400294.5 |
| [90 ₂₀ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₁₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₈ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /0 ₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₆ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₁₆] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₁₂ /0 ₂ /90 ₂] _s | 400294.5 |
| [90 ₁₄ /0 ₂ /90 ₁₀ /0 ₂ /90 ₄] _s | 400294.5 |

Çizelge 4.33 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|-------------------------|
| [0 ₁₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₈ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₁₂ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₂ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₁₄ /0 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₈ /0 ₂ /90 ₈] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₆ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₈ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₄ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₆ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₁₀] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₈ /90 ₆] _s | 100072.7 |
| [0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₆ /90 ₂ /0 ₆ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₄ /0 ₁₂ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₄ /0 ₆ /90 ₆ /0 ₁₄] _s | 100072.7 |
| [0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₂ /0 ₄ /90 ₂ /0 ₁₀] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₆ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₈ /90 ₄ /0 ₂ /90 ₂] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₀ /90 ₄ /0 ₈ /90 ₄] _s | 100072.7 |
| [90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /0 ₁₈ /90 ₈] _s | 100072.7 |

Model arama ile Çizelge 4.25 ile 4.33 arasında her bir yükleme durumu ve açıklık oranı için 40 çalışma yapılmış ve birbirine benzer konfigürasyonlar elde edilmiştir. GA'ya göre konfigürasyon sayısı biraz daha azdır ve benzer konfigürasyonların birbirini daha fazla tekrarladığı görülmüştür. Bu durumun gerekçesi olarak model arama vektörel bir modelden yola çıkarak optimumu bulmaya çalışır. Bilinmeye sayısı kadar vektörden algoritma başlar. Bu da algoritmanın gidebileceği yolu kısıtlar. Genetik algorithmada ise olası çözümler rastgele uzaya dağıtılır ve belirli bir yönlenme yoktur. Bu da farklı olası konfigürasyonların sayısını artırır. Her tablo için global maksimum bir tanedir ve GA'ya göre global maksimum yakınlarında daha fazla sayıda lokal minimum tespit edilmiştir. Çizelge 4.12 'deki Genetik Algoritma ile yapılan 0_2° ve 90_2° tabaka açılarını kullanılarak elde edilen optimizasyon çalışmalarının benzeri Model Arama içinde geçerlidir.

Genetik algorithmada yapılan çözümler gibi model aramada da programın her çalıştırılmasında global optimum kolay bir şekilde bulunmuştur. Çizelge 4.12 'de genetik algoritma için bulunan farklı global optimum sayıları her bir yükleme ve açıklık oranı için yaklaşık olarak model aramayla benzerlik gösterir. Kritik burkulma katsayısı açısından ise plak geometrisini büyümesiyle kritik burkulma katsayısı düşmekte, plak geometrisin küçülmesiyle kritik burkulma katsayısı artmaktadır.

Tabaka tasarım değişkeni olarak 0_2° , $\pm 45^{\circ}$ ve 90_2° açıları kullanılarak elde edilen burkulma yükleri ve konfigürasyonlar Çizelge 4.34 ile 4.42 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.34 $N_x/N_y=1$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|----------------------------|--------------------------------|
| $[\pm 45]_{16}_s$ | 242823.9 |

Çizelge 4.34 için program 30-40 kez çalıştırılmıştır. Bir tane global optimum vardır. Ancak bu nokta civarında lokal minimumlar mevcuttur.

Çizelge 4.35 $N_x/N_y=1$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| $[90_4/\pm 45_2/90_{16}/\pm 45/90_6]_s$ | 695781.0 |
| $[90_{10}/\pm 45_2/90_2/\pm 45_3/90_2/\pm 45_4]_s$ | 695781.0 |
| $[\pm 45/90_8/\pm 45/90_{18}/\pm 45]_s$ | 695781.0 |
| $[90_2/\pm 45/90_6/\pm 45/90_8/\pm 45/90_{10}]_s$ | 695781.0 |

Çizelge 4.35 için program 200 kez çalıştırıldı. Global optimuma yakın çok sayıda local minimum olduğu görülmüştür. 200 çalıştırılmasına rağmen bulunan farklı konfigürasyon sayısı sadece 4 adettir.

Çizelge 4.36 $N_x/N_y=1$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|--|--------------------------------|
| $[0_8/\pm 45/0_2/\pm 45_3/0_{14}]$ | 173944.8 |
| $[0_4/\pm 45_2/0_{16}/\pm 45/0_6]_s$ | 173944.8 |
| $[0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_{10}/\pm 45/0_4/\pm 45/0_4]$ | 173944.8 |
| $[\pm 45/0_{10}/\pm 45/0_8/\pm 45/0_8]_s$ | 173944.8 |
| $[\pm 45/0_8/\pm 45/0_{18}/\pm 45]_s$ | 173944.8 |

Çizelge 4.36 için program 200 kez çalıştırıldı. Global optimuma yakın çok sayıda local minimum olduğu görülmüştür. Çizelge 4.35 ile simetri özelliği göstermektedir. 0_2^0 ve 90_2^0 açıları birbirleriyle yer değiştirmiştir. Çizelge 4.36'da sadece farklı olan bir konfigürasyon vardır. Bu konfigürasyon da çalışma sayısı artırılırsa bulunabilir.

Çizelge 4.37 $N_x/N_y=2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|----------------------------|--------------------------------|
| $[\pm 45_{16}]_s$ | 323764.0 |

Çizelge 4.37 için program 30-40 kez çalıştırılmıştır. Bir tane global optimum vardır. Program her çalıştırıldığında aynı kritik burkulma yükünü bulmuştur. Local minimumlar yoktur.

Çizelge 4.38 $N_x/N_y=2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[90_4/\pm 45_3/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45_4/90_8]_s$ | 1057948.3 |
| $[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45_3/90_4/\pm 45/90_2/\pm 45]_s$ | 1057948.3 |
| $[90_2/\pm 45_2/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_4/\pm 45]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_2/\pm 45/90_8/\pm 45_3]_s$ | 1057948.3 |

Çizelge 4.38 için program 120 kez çalıştırıldı. Global optimuma yakın çok sayıda local minimumlar vardır. Bulunan farklı konfigürasyon sayısı toplam 4 adettir.

Çizelge 4.39 $N_x/N_y=2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[0_{16}/\pm 45/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_s$ | 206493.8 |

Çizelge 4.39 için bir tane global optimum bulunmuştur. Program 80 kez çalıştırılmıştır. Bulunan nokta civarında çok sayıda lokal minimumlar mevcuttur.

Çizelge 4.40 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|----------------------------|--------------------------------|
| $[\pm 45_{16}]_s$ | 161882.0 |

Çizelge 4.40 için tek global optimum vardır ve program her çalıştırıldığında aynı değer bulunmuştur. Global optimuma yakın civarda lokal minimum yoktur.

Çizelge 4.41 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|-----------------------------|--------------------------------|
| $[90_{20}/\pm 45_5/90_2]_s$ | 412922.4 |

Çizelge 4.41 için 120 çalışma sonucunda bir tane global optimum değer bulundu. Ancak GA ile bulunan sonuca göre biraz daha düşük değerdedir. Bu da gösteriyor ki aslında bu değer lokal optimumdur. Bulunan konfigürasyon da GA'dakine göre farklıdır.

Çizelge 4.42 $N_x/N_y=1/2$ $a/b=1/2$

| Fiber Tasarım Açısı | Kritik Burkulma Yükleri |
|---|--------------------------------|
| $[0_4/\pm 45_4/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45/0_8/\pm 45]_s$ | 1057948.3 |
| $[0_4/\pm 45_4/0_2/\pm 45/0_8/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_6/\pm 45/0_2/\pm 45/0_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[0_2/\pm 45_2/0_2/\pm 45_2/0_8/\pm 45/0_6/\pm 45_2]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_8/\pm 45/0_4/\pm 45_2/0_4/\pm 45]_s$ | 1057948.3 |
| $[\pm 45/0_2/\pm 45/0_4/\pm 45/0_2/\pm 45_2/0_8/\pm 45/0_2/\pm 45]_s$ | 1057948.3 |

Çizelge 4.42 için program 120 defa çalıştırılmış ve yukarıdaki konfigürasyonlar elde edilmiştir. Global optimum etrafında birçok local minimum noktası mevcuttur. Bulunan konfigürasyonlar sıklıkla kendini tekrar etmiştir. 120 çalışma sonrasında bulunan farklı

konfigürasyon sayısı sadece 6 adettir. Şayet çalışma sayısı artırılabilecek olursa veya genetik algoritma operatörleri ile ilgili farklı varyasyonlar denenirse daha farklı konfigürasyonlarda bulunabilir.

4.2.3 İki Yöntemin Karşılaştırılması

Çizelge 5.43’de Genetik Algoritma ile Model Aramayı karşılaştırmak için 0_2^0 , $\pm 45^0$ ve 90_2^0 lik tabaka açıları kullanılarak bir çalışma yapılmıştır.

Çizelge 4.43 Genetik algoritma ve model arama arasında Cpu ve konfigürasyon karşılaştırılması

| Farklı yük, açıklık oranları ve global optimumlar konfigürasyonlardan biri | Kritik burkulma λ_{cb} | Genetik Algoritma | | Model Arama | |
|---|--------------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | | Global Konfig. Sayısı | *Ort. CPU (s) | Global Konfig. Sayısı | *Ort. CPU (s) |
| $a/b=2 N_X/N_Y=1$ [90 ₁₀ /±45 ₂ /90 ₂ /±45 ₃ /90 ₂ /±45 ₄] _s | 695781.0 | 9 | 5.90 | 4 | 1.8 |
| $a/b=1 N_X/N_Y=1$ [±45 ₁₆] _s | 242823.9 | 1 | 7.25 | 1 | 1.4 |
| $a/b=1/2 N_X/N_Y=1$ [0 ₁₀ /±45 ₂ /0 ₂ /±45 ₃ /0 ₂ /±45 ₄] _s | 173944,7 | 9 | 7.84 | 5 | 1.4 |
| $a/b=2 N_X/N_Y=2$ [90 ₄ /±45 ₅ /90 ₆ /±45/90 ₄ /±45 ₂ /90 ₂] _s | 1057948.0 | 16 | 5.08 | 4 | 1 |
| $a/b=1 N_X/N_Y=2$ [±45 ₁₆] _s | 323764.0 | 1 | 4.11 | 1 | 1.4 |
| $a/b=1/2 N_X/N_Y=2$ [0 ₁₆ /±45/0 ₆ /±45/0 ₂ /±45/0 ₂] _s | 206493,8 | 1 | 4.68 | 1 | 1.5 |
| $a/b=2 N_X/N_Y=1/2$ [90 ₁₆ /±45/90 ₆ /±45/90 ₂ /±45/90 ₂] _s | 412985,9 | 1 | 5.44 | - | - |
| $a/b=1 N_X/N_Y=1/2$ [±45 ₁₆] _s | 161882.5 | 1 | 4.9 | 1 | 2 |
| $a/b=1/2 N_X/N_Y=1/2$ [0 ₄ /±45 ₂ /0 ₂ /±45 ₅ /0 ₁₀ /±45] _s | 132243,5 | 18 | 6.27 | 6 | 1.3 |
| * : Ortalama CPU bulunan ilk 10 global optimum için | | | | | |

Çizelge 4.2 'de verilen durumlar için dokuz farklı çalışma yapılmış ve bulunan konfigürasyon sayıları, bir adet örnek konfigürasyon, kritik burkulma katsayısı ve ortalama CPU'lar Çizelge 4.43'de verilmiştir. Örneğin $a/b=2$, $N_X/N_Y=2$ durumu için genetik algoritma ile 16 farklı konfigürasyon bulunurken Model Arama ile sadece 4 adet farklı konfigürasyon bulunmuştur. Ayrıca bazı yükleme durumlarında model aramanın global optimumu bulamadığı görülmektedir. Örneğin $a/b=2$ $N_X/N_Y=1/2$ durumunda model arama global optimumu bulamamış çok yakın olan local optimuma takılmıştır. Çizelge 4.43 için program 200 kez çalıştırılmıştır. Genetik algoritma ile bulunan konfigürasyonların sayısı model arama göre daha fazla olduğu Çizelge 4.43'de görülmektedir.

CPU'lara bakıldığında ise model arama genetik algoritmaya oranla yaklaşık olarak 4-5 katı kadar daha az sürede çözüme ulaştığı görülmektedir. Örneğin $a/b=2$, $N_X/N_Y=2$ durumu için tam olarak 5 kat fark vardır. Farklı konfigürasyon sayısının önemli olduğu durumlarda genetik algoritma tercih sebebi olabilir. Çünkü farklı konfigürasyon bulmada daha başarılı bir yöntem olduğu Çizelge 4.43'de görülmektedir. $a/b=1/2$ $N_X/N_Y=1$ yükleme durumu ve açıklık oranı için GA 9 farklı global optimum bulurken Model Arama 5 farklı global optimum bulabilmiştir

Aynı durum $a/b=2$ $N_X/N_Y=2$ içinde geçerlidir. GA'da 16, Model arama ise 4 farklı global optimum bulabilmiştir. Farklı konfigürasyon bulma açısından daha yetersiz olan model arama kritik burkulmanın gerektiği durumlarda zaman açısından genetik algorithmadan daha avantajlı olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada genetik algoritma ve model arama yöntemini kullanarak burkulmaya maruz bir kompozit plağın yapısal optimizasyonu yapılmış ve her iki yönteminde avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Yaptığımız çalışmada sabit tabaka kalınlığında (64 tabaka) 0_2° , 90_2° ve $\pm 45^{\circ}$ tabaka açıları kullanarak optimizasyon işlemi yapılmıştır. Her 3 açıdaki tabakaları kullanarak yapılan çalışmada her iki programda da bazı local takımlar gerçekleşmiştir. Bu lokal takımlardan kurtulabilmek için program operatörlerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu da her iki optimizasyon yönteminde de operatörlerin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

0_2° ve 90_2° tabaka açıları için gerek Model Arama olsun gerekse Genetik Algoritma yaklaşık olarak benzer sonuçları vermişlerdir. Ancak genel bir değerlendirme yapılacak olursa model arama benzer konfigürasyonları daha sıklıkla tekrarlamıştır. Bu da daha az farklı konfigürasyon bulmasını sebep olmuştur. Her iki yöntem içinde eğer program çalışma sayısı arttırılacak olursa bulunacak olan farklı konfigürasyon sayısı da buna bağlı olarak artacaktır.

0_2° ve 90_2° tabaka açıları kullanılarak yapılan çalışmalarda aynı yük ve açıklık oranı için çok fazla sayıda global optimum bulunmuştur. Bunun gradyan esaslı klasik optimizasyon yöntemleri ile bulunması zordur. Bu global optimumlar aynı burkulma yükünü vermekle birlikte bunlar arasından imalat açısından en kolay olanı tasarım için seçilebilir. Farklı yük oranı ve açıklık oranı için kritik burkulma yükü değişmektedir. Belirli bir açıklık oranı verildiği takdirde plağa pratikte uygulanacak yük oranları ve bu yük oranlarındaki muhtemel değişiklikleri de göz önüne alınarak daha genel bir optimizasyon çalışması yapılabilir. Ayrıca kısıtlandırılmış tabaka açıları olmaksızın rastgele açılar düşünülerek bir optimizasyon çalışması yapılabilir. Bu açılar hangi açılar arasında yığılacağı belirlenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Adali, S. Verijenko, V.E. 2001, "Optimum Stacking Sequence Design of Symetric Hybrit Laminates Undergoing Free Vibrations" Composites Structures Vol: 54,131-138
- Aydoğdu, M. 2003, "Katmanlı Kompozit Dikdörtgen Plakların Burkulma ve Titreşim Analizi", Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdađ
- Biroğul, S. 2005. "Genetik Algoritma Yaklaşımı İle Atölye Çizelgeleme", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Cantú- Paz, E. 1997. "A Survey of Parallel Genetic Algorithms". Technical Report illegal 97003, University of Illinois at Urbana-Champaign, Chicago
- Deng, S. Pai, P. Lai, C.C. Wu, P. 2005, "A Solution To The Stacking Sequence of A Composite Laminate Plate with Constant Thickness Using Simulated Annealing Algorithms", Manufacture Technol Vol.26, 499–504.
- Demirkesen, E. 1991. "Kompozit Malzemeler", Kimya-Metalurji Fakültesi Yay. No:3/1991, İ.T.Ü
- Ding, M. Nowostawski, R. Poli, 1999, "Parallel Genetic Algorithm Taxonomy", Third International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems, 31 Aug-1 Sept , Adelaide, Australia
- Emel, G. G. Taşkın, Ç. 2002. "Genetik algoritma ve uygulama alanları" Uludađ Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, CiltXXI, Sayı1, S. 129-152
- Falco, D. Balio, R. D. Cioppa, A. D. Tarantino, E. 1996. "A Comparative Analysis Evolutionary Algorithms for Function Optimization" Proc.\ of the Second Online Workshop on Evolutionary Computation Pages : 29-32
- Gantovnik, V.B. Gurdal, Z. Watson, L.T. 2002. "A Genetic Algorithm with Memory For Optimal Design Of Laminated Sandwich Composite Panels", Composite Structures Vol. 58, 513–520
- Gibson, R.F. 1994, "Principles of Composite Material Mechanics" 1st ed. USA: Mc-Graw-Hill Inc.

- Jones, R. M. 1998, "Mechanics of Composites Material" second ed. USA. Taylor& Francis, Inc
- İşçi, Ö. Korukoğlu, S. 2003, "Genetik Algoritma Yaklaşımı ve Yöneylem Araştırmasında Bir Uygulama", Yönetim ve Ekonomi, Cilt:10 Sayı :2 Celal Bayar Üniversitesi, İ.İ.B.F. Manisa
- Goldberg, David E. 1989. "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning"
- Gordon, V. S. Whitley, D. 1993, "Serial and Parallel Genetic Algorithms as Functions Optimization" Technical Report Cs 93-114, Colorado State University, USA
- Le Riche, R. Haftka, R.T. 1993. "Optimization of Laminate Stacking Sequence for Buckling Load Maximization by Genetic Algorithm", AIAA Journal, Vol. 31, No: 5, 951-956
- Le Riche, R. Haftka, R.T. 1994, "Improved Genetic Algorithm for Minimum Thickness Composite Laminate Design", Proceeding of the International Conference on Composite Engineering, Aug 28-31, New Orleans, LA,
- Lewis, R. M. Torczon, V. Trosset, V. M. 1998. "Why Pattern Search Works" Mathematical Programming Society Newsletter, Optima No:59
- Lin, C.C, Lee, Y.J. 2004, "Stacking Sequence Optimization of Laminated Composite Structures Using Genetic Algorithm With Local Improvement", Composite Structures Vol. 63, 339-345.
- Li, S. 2003, "Buckling Of Laminated Composites", Department of Mechanical Aerospace and Manufactures Engineering, University of Manchester, UK
- The Mathworks, 2005. "Genetic Algorithm And Direct Search Toolbox User's Guide" The Mathworks, Inc, Versiyon 2
- Nowostawski, m. Poli, r. 1999 "Review and Taxonomy of Parallel Genetic Algorithm" Technical Report CSRP-99-11.
- Osyczka, A. 2002 "Evolutionary Algorithms for Single and Multicriteria Design Optimization", Springer-Verlag Company, Germany
- Özcan, E. Alkan, A. 2001. "Çok Nüfuslu Kararlı Hal Genetik Algoritması Kullanarak Otomatik Çizelgeleme", Yeditepe Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
- Park, J.H. Hwang, J.H, Lee, C.S. Hwang, W. 2001. "Stacking Sequence Design of

- Composite Laminates for Maximum Strength using Genetic Algorithm”,
Composite Structures, Vol.52, pp. 217–31
- Punth, W. F. Averill, R. C. Goodman, E. D. Chang-Lin, S. Ding, R. 1995, “Using Genetic Algorithms to Design Laminated Composite Structures”, IEEE, Michigan State University
- R. Mohan Rao, A. Arvind, N. 2005, “A Scatter Search Algorithm for Stacking Sequence Optimization of Laminate Composites”, Composite Structures Vol.70, 383–402.
- Qi, T. Zhou, S. J. Ji.Chang, G. 2003. “Parallel Genetic Algorithm For Multi-Knapsack Problem”, Toward a Caring and Humane Technology, May 4 to 7th , Montreal, Canada
- Sivakumar, K. Iyengar NGR, Deb K. 1998. “Optimum Design of Laminated Composite Plates with Cutouts using a Genetic Algorithm”, Composite Structures, Vol.42, pp. 265–279.
- 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,
- 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
- Soremekun, G. 1997. “Genetic Algorithms for Composite Laminate Design and Optimization”, Master Of Science in Engineering Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia
- Topçu, M, 1998. “Kompozit Malzemelerin Mekaniği”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli
- Yazıcı, M. 1999, “Kare Delikli Plaklarda Elasto-Plastik Gerilme Analizi Ve Burkulma Yükleri”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa
- Wetter, M. Polak, E. 2003 “A Convergent Optimization Method Using Pattern Search Algorithms with Adaptive Precision Simulation” *Eighth International IBPSA Conference* Eindhoven, Netherlands

7.1. İnternet Kaynakları

1. http://composite.about.com/od/swlamanalysis/Laminate_Analysis_Software.htm 12/12/2006
2. <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/class6/class6.html> 28/12/2006
3. <http://www.composite-design.vt.edu/sresources/tutorials/tutorials.htm> 28/12/2006

ÖZGEÇMİŞ

| | |
|--|----------------------------------|
| Adı Soyadı | ŞÜKRÜ KARAKAYA |
| Doğum Yeri | AFYONKARAHİSAR |
| Doğum Tarihi | 03/09/82 |
| Medeni Hali | BEKAR |
| Yabancı Dili | İNGİLİZCE |
| | Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) |
| Lise | FATİH LİSESİ (ÇOK PROG. LİSE) |
| Lisans | SELÇUK ÜNİ. MAK. MÜH. BÖLÜMÜ |
| Yüksek Lisans | |
| Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl aralığı | |
| <u>KONTENSAN A.Ş</u> | 2004-2005 (Makine Mühendisi) |
| <u>A.K.Ü</u> | 2005-..... (Araştırma Görevlisi) |

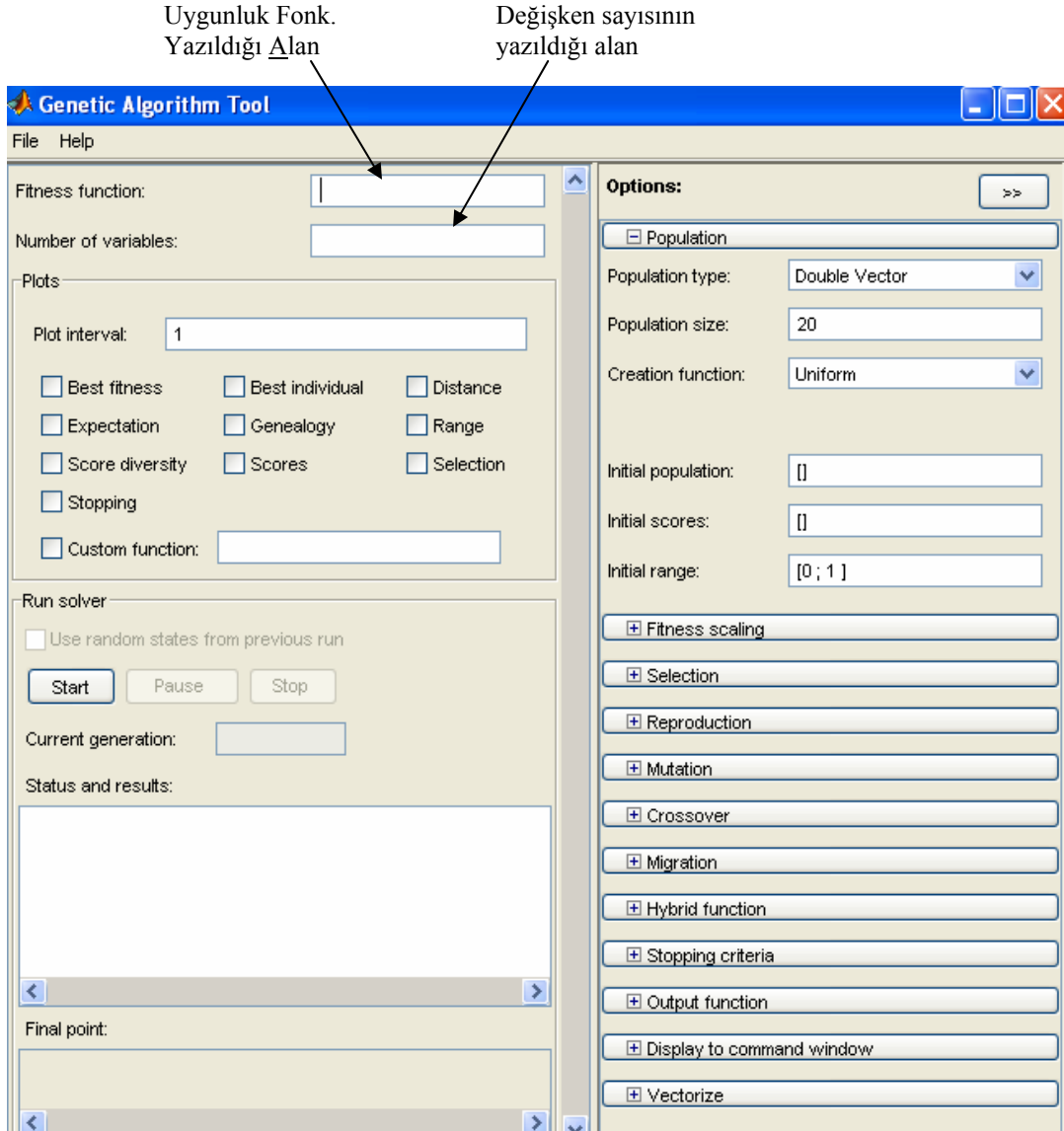
Yayınları (SCI ve diğer)

- Soykasap Ö. and Karakaya Ş. “Tabakalı Kompozit Plakların Genetik Algoritma ile Burkulma Optimizasyonu,” 1.Ulusal Uzay Ve Havacılık Konferansı, ODTU, Ankara, 21-23 Eylül 2006
- Soykasap Ö. and Karakaya Ş “Structural Optimization of Laminated Composite Plates For Maximum Buckling Load Capacity Using Genetic Algorithm” Key Engineering Materials Vols. 348-349, 2007

EKLER

Ek.1

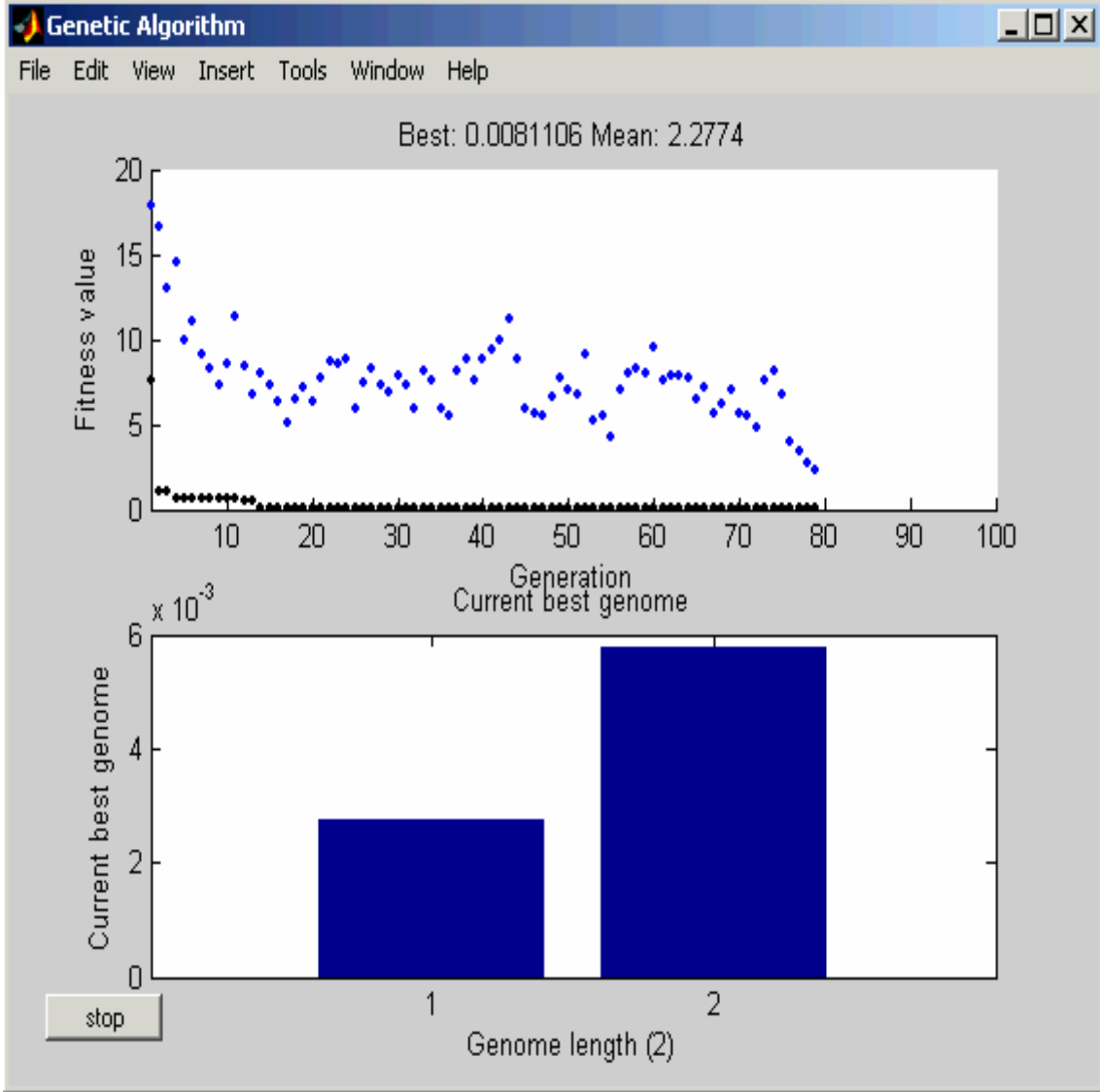
Genetik algoritma arayüzü



Şekil 1 Genetik algoritma programı araç menüsü

Şekil 1'de genetik algoritmanın yönteminin kullanıldığı program ara yüzü görülmektedir. Burada uygunluk fonksiyonu kısmına önceden Matlab da oluşturulmuş bir M-FILE uzantılı dosyanın ismi yazılır bu dosya problemin tanımlandığı dosyadır. Optimizasyonu yapılacak olan amaç fonksiyonu, programın okuyabileceği şekilde

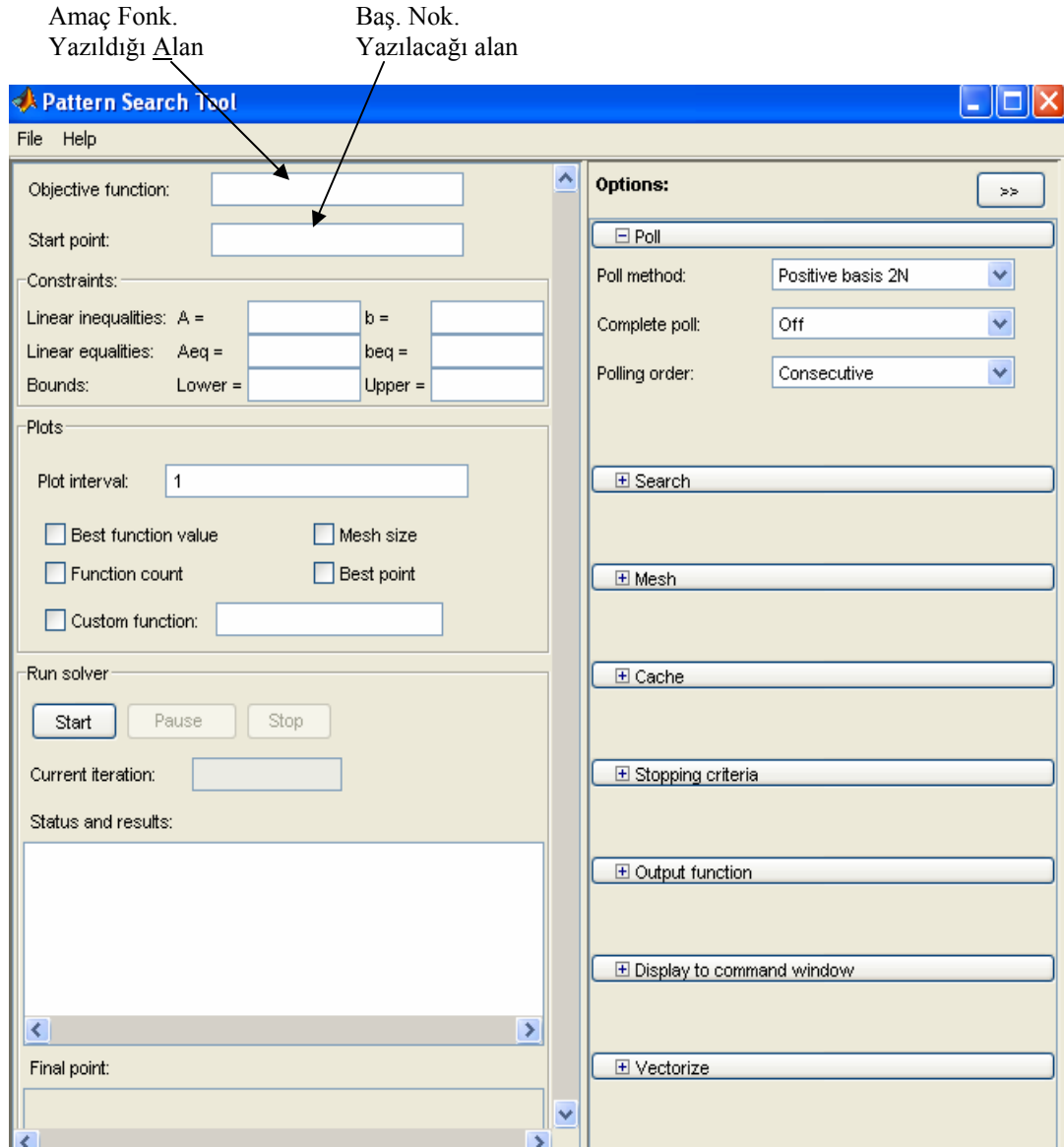
yazılmıştır. M file dosyası **Ek. 3'te** verilmektedir. Programın sağ kısmındaki seçenekler kısmında(option) programla ilgili birçok operatörün ayarlaması yapılabilmektedir. Sol alt kısmında ise optimizasyon sonrası elde edilen sonuçların yazıldığı kısımdır.



Şekil 2 Programın çalıştırılması sonucu elde edilen grafikler

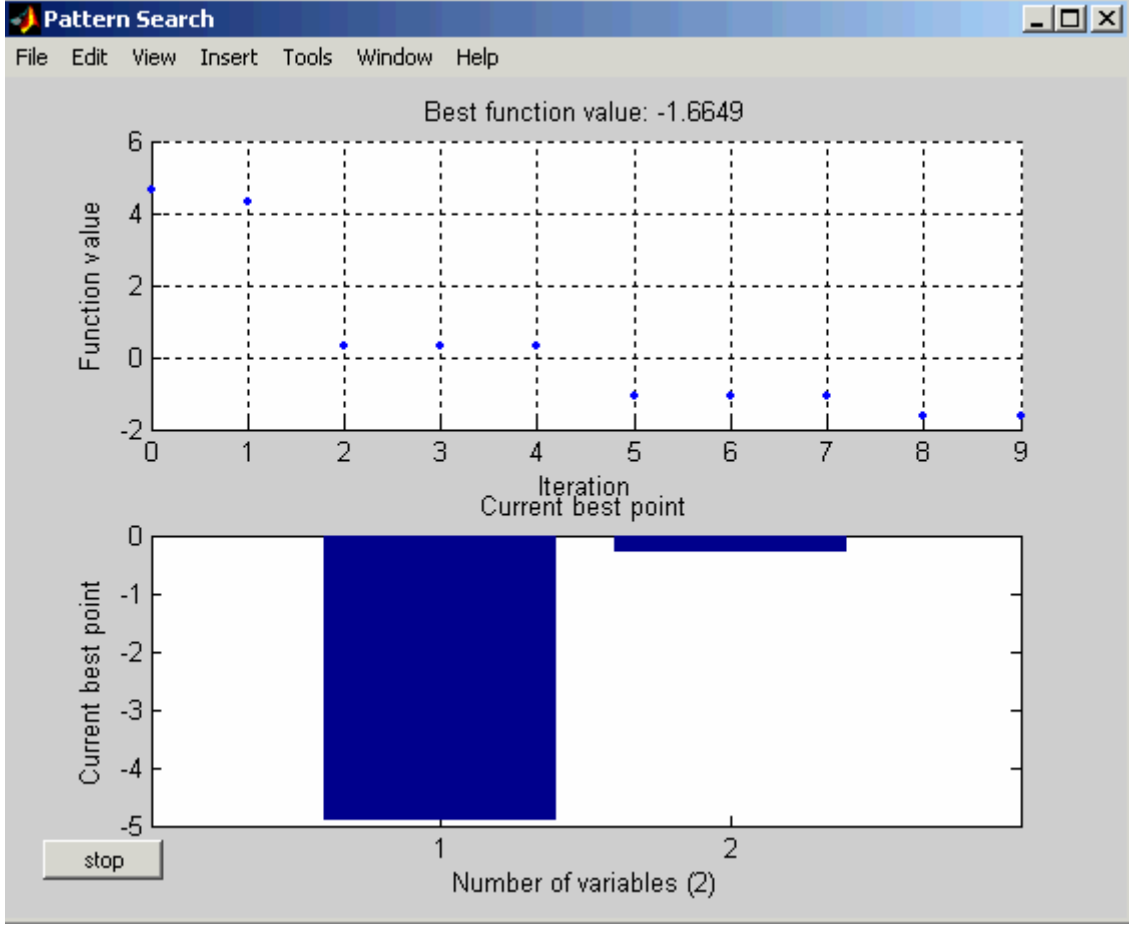
Yukarıdaki grafikler programın plot kısmının işaretlenmesi ile elde edilir. Buna benzer olarak 9 farklı grafik elde edilebilir. Yukarıdaki grafikte nesil sayısı ile uygunluk değeri arasındadır. Bu grafikler optimizasyon işleminin görselliğini sağlamaktadır.

2. Model arama arayüzü



Şekil 3 Model arama programı araç menüsü

Şekil 3’de model arama yönteminin kullanıldığı program ara yüzü görülmektedir. Burada amaç fonksiyonu kısmına önceden matlab da oluşturulmuş bir M-FİLE uzantılı dosyanın ismi yazılır bu dosya problemin tanımlandığı dosyadır. Optimizasyonu yapılacak olan amaç fonksiyonu, programın okuyabileceği şekilde yazılmıştır. M file dosyası **Ek. 2’te** verilmektedir. Programın sağ kısmındaki seçenekler kısmında(option) programla ilgili birçok operatörün ayarlanması yapılabilmektedir. Sol alt kısmında ise optimizasyon sonrası elde edilen sonuçların yazıldığı kısımdır.



Şekil 2 Programın çalıştırılması sonucu elde edilen grafikler

Yukarıdaki grafikler programın **Plot** kısmının işaretlenmesi ile elde edilir. Buna benzer olarak 5 farklı grafik elde edilebilir. Yukarıdaki grafikte iterasyon sayısı ile fonksiyon değeri arasındadır. Bu grafikler optimizasyon işleminin görselliğini sağlamaktadır.

Her iki yöntemde de kullanılan Matlab M-file sayfası

```
function f=gen(x)
% x = round(x);
% 1 psi=6894.757 Pa
% 1 in=0.0254 m
e1=18.5*10^6;
e2=1.89*10^6;
g12=0.93*10^6;
v12=0.3;
a=20;
r=2;
mxy=1;
b=a/r;
n=64;
n4=n/4;
n2=n/2;
tp=0.005*n;
v21=v12*(e2/e1);
q11=e1/(1-v12*v21);
q12=v21*e1/(1-v12*v21);
q22=e2/(1-v12*v21);
q66=g12;
A=zeros(3,3);
% B=zeros(3,3);
D=zeros(3,3);
% x=zeros(n2)
m=n+1;
for j=1:m
    z(j)=-tp/2+(j-1)*tp/n;
end
j=1;
% for i=1:n4
%   if x(i)>0;
%       x1(j)=90;
%       x1(j+1)=90;
%       j=j+2;
%   else
%       x1(j)=0;
%       x1(j+1)=0;
%       j=j+2;
%   end
% end
for i=1:n4
    if x(i)>=30;
        x1(j)=90;
        x1(j+1)=90;
```



```

        j=j+2;
    elseif x(i)>=-30
        x1(j)=45;
        x1(j+1)=-45;
        j=j+2;
    else
        x1(j)=0;
        x1(j+1)=0;
        j=j+2;
    end
end
for i=1:n4
    x1(j)=x(i);
    x1(j+1)=-x(i);
    j=j+2;
end
for i=1:n2
    x(i)=x1(i);
end
% for i=1:n2
%   if x(i)>0;
%       x(i)=90;
%   else
%       x(i)=0;
%   end
% end
for i=1:n2
x(n2+i)=x(n2-i+1);
end
for k=1:n
c=cos(x(k)*pi/180);
s=sin(x(k)*pi/180);
W11=q11*c^4+2*(q12+2*q66)*s^2*c^2+q22*s^4;
W12=(q11+q22-4*q66)*s^2*c^2+q12*(s^4+c^4);
W22=q11*s^4+2*(q12+2*q66)*s^2*c^2+q22*c^4;
W16=(q11-q12-2*q66)*s*c^3+(q12-q22+2*q66)*s^3*c;
W26=(q11-q12-2*q66)*s^3*c+(q12-q22+2*q66)*s*c^3;
W66=(q11+q22-2*q12-2*q66)*s^2*c^2+q66*(s^4+c^4);
W=[W11 W12 W16;W12 W22 W26;W16 W26 W66];
% A(1,1)=A(1,1)+W11*(z(k+1)-z(k));
% A(1,2)=A(1,2)+W12*(z(k+1)-z(k));
% A(1,3)=A(1,3)+W16*(z(k+1)-z(k));
% A(2,2)=A(2,2)+W22*(z(k+1)-z(k));
% A(3,3)=A(3,3)+W66*(z(k+1)-z(k));
% A(2,3)=A(2,3)+W26*(z(k+1)-z(k));
% B(1,1)=B(1,1)+W11*(z(k+1)^2-z(k)^2)/2
% B(1,2)=B(1,2)+W12*(z(k+1)^2-z(k)^2)/2;
% B(1,3)=B(1,3)+W16*(z(k+1)^2-z(k)^2)/2;

```

```

% B(2,2)=B(2,2)+W22*(z(k+1)^2-z(k)^2)/2;
% B(3,3)=B(3,3)+W66*(z(k+1)^2-z(k)^2)/2;
% B(2,3)=B(2,3)+W26*(z(k+1)^2-z(k)^2)/2;
D(1,1)=D(1,1)+W11*(z(k+1)^3-z(k)^3)/3;
D(1,2)=D(1,2)+W12*(z(k+1)^3-z(k)^3)/3;
D(1,3)=D(1,3)+W16*(z(k+1)^3-z(k)^3)/3;
D(2,2)=D(2,2)+W22*(z(k+1)^3-z(k)^3)/3;
D(3,3)=D(3,3)+W66*(z(k+1)^3-z(k)^3)/3;
D(2,3)=D(2,3)+W26*(z(k+1)^3-z(k)^3)/3;
end
% A(2,1)=A(1,2);
% A(3,2)=A(2,3);
% A(3,1)=A(1,3);
% B(2,1)=B(1,2);
% B(3,2)=B(2,3);
% B(3,1)=B(1,3);
D(2,1)=D(1,2);
D(3,2)=D(2,3);
D(3,1)=D(1,3);
m1=1;
n1=1;

LAMDA1=pi^2*(m1^4*D(1,1)+2*(D(1,2)+2*D(3,3))*m1^2*n1^2*r^2+n1^4
*r^4*D(2,2))/(m1^2*a^2+r^2*a^2*n1^2/rnxy);
m1=1;
n1=2;
LAMDA2=pi^2*(m1^4*D(1,1)+2*(D(1,2)+2*D(3,3))*m1^2*n1^2*r^2+n1^4
*r^4*D(2,2))/(m1^2*a^2+r^2*a^2*n1^2/rnxy);
m1=2;
n1=1;
LAMDA3=pi^2*(m1^4*D(1,1)+2*(D(1,2)+2*D(3,3))*m1^2*n1^2*r^2+n1^4
*r^4*D(2,2))/(m1^2*a^2+r^2*a^2*n1^2/rnxy);
m1=2;
n1=2;
LAMDA4=pi^2*(m1^4*D(1,1)+2*(D(1,2)+2*D(3,3))*m1^2*n1^2*r^2+n1^4
*r^4*D(2,2))/(m1^2*a^2+r^2*a^2*n1^2/rnxy);
LAMDA=[LAMDA1 LAMDA2 LAMDA3 LAMDA4];
f=-min(LAMDA);

```