

**T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT LEVHALARDA
ELASTİK VE ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ**

GURBET ÖRÇEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

**ELAZIĞ
2005**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

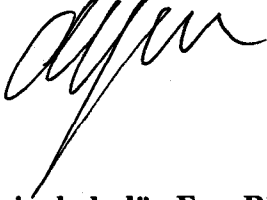
**ÇELİK TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT LEVHALARDA
ELASTİK VE ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ**

GURBET ÖRÇEN

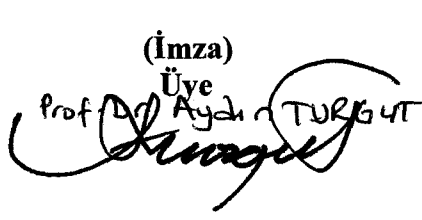
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 26.08.2005 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Başarılı/Başarısız olarak değerlendirilmiştir.

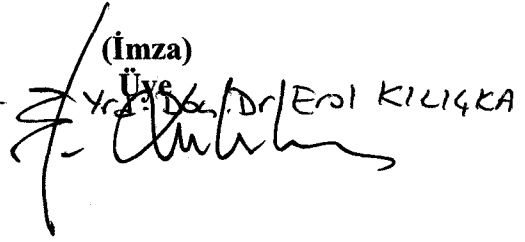
(İmza)
Danışman
Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR



(İmza)
Üye
Prof. Dr. Aydın TURGUT



(İmza)
Üye
Yrd. Doç. Dr. Ersel KILIÇKA



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31.08/05 Tarih ve
2005-28/11/4 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ABSTRACT

Master Thesis

ELASTIC AND ELASTO-PLASTIC STRESS ANALYSIS REINFORCED STAINLESS STEEL THERMOPLASTIC MATRIX LAMINATED PLATES

Gurbet ÖRÇEN

University of Firat

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Mechanical Engineering

2005, Page :147

In this study, elastic and elastic-plastic stress analysis carried out by the finite element method (FEM) the thermoplastic composite laminate plates with elliptic hole. Composite layers in the laminated plates consist of the stainless steel woven fibers and the low density polyethylene. The thermoplastic matrix composite layers reinforced by long stainless steel fiber is manufactured by using molds under heating and press loading. The laminated plates $[\theta^0/-\theta^0]$ consist of four composite layers and bonded symmetrically. The composite plates under uniform transverse loading. Each layer with constant thickness is meshed into 13 elements and 69 nodes. The loading is gradually increased from yield point of the plate. The load steps increased as 0.0001 MPa at each iteration 25, 50, 75 and 100. Because of symmetry and to save time $\frac{1}{4}$ of the thermoplastic composite laminate plate is been taken. To make the elastic, plastic, elastic-plastic and residual stresses of according to load steps and different orientation angles composite plates. According to results, stress components, which show difference symmetrically, have been observed in the 1. and 8. plates. Also, it has been seen that stresses had been intensified around the elliptic hole.

Key Words: Elasto-plastic stresses analysis, thermoplastic matrix composites, finite element method, plates with elliptic hole, elastic stresses, residual stresses

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT LEVHALARDA ELASTİK VE ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ

Gurbet ÖRÇEN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2005, Sayfa:147

Bu çalışmada, ortasında eliptik delik bulunan termoplastik tabakalı kompozit plakalarda elastik ve elasto-plastik gerilme analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kompozit plakalarda fiber olarak paslanmaz çelik, matriks malzemesi olarakta düşük yoğunluklu polietilen kullanılmıştır. Paslanmaz çelik fiberlerle takviye edilmiş termoplastik matriksli kompozit tabakalar, ısı ve basınç altında kalıp kullanılarak imal edilirler. Kompozit plakalar $[\theta^0 / - \theta^0]$ simetrik olarak birleştirilmiş dört ortotropik tabakadan meydana gelmiştir. Seçilen kompozit plakalara düşey doğrultuda üniform yüklemeler yapılmıştır. Sabit kalınlıklı her tabaka 13 eleman ve 69 düğüm noktasına sahiptir. Yükleme, seçilen her takviye açısı için plakanın akma noktasından başlayarak 0.0001 MPa 'lık artışlarla 25, 50, 75 ve 100 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. Simetri nedeniyle ve çözümde zamandan kazanmak amacıyla plakanın $\frac{1}{4}$ 'ü alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda yükleme adımlarına ve farklı takviye açılarına göre, kompozit plakta meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilmeler elde edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre 1. ve 8. tabakalarda simetrik olarak değişim gösteren gerilme değerleri elde edilmiştir. Bununla beraber gerilmelerin eliptik delik çevresinde yoğunlaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Elasto-plastik gerilme analizi, termoplastik matriksli kompozitler, sonlu elemanlar metodu, eliptik delikli plakalar, elastik gerilme, artık gerilme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve ilgilerini esirgemeyen Danışman Hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR 'e, Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. Cengiz YILDIZ 'a, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü Değerli Hocam Sayın Prof.Dr. Aydın TURGUT 'a, yardımlarından dolayı; Sayın Arş.Gör. Tamer ÖZBEN 'e, Sayın Arş.Gör. Şükrü YILDIRIM' a, Sayın Arş.Gör. M. Yavuz SOLMAZ 'a, ilgilerinden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Sayın Prof.Dr. Onur SAYMAN 'a ve Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünün Değerli Öğretim Elemanlarına, Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Yrd.Doç.Dr.Orhan ÇAKIR'a, Sayın Yrd.Doç.Dr.Sedat KOLUKISA'ya, Sayın Yrd.Doç.Dr.Erol KILIÇKAP'a, Sayın Arş.Gör. Hakan SUBAŞI'ya ve Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünün Değerli Öğretim Elemanlarına ayrıca yardımlarından dolayı TMMOB Makine Mühendisleri Odası Diyarbakır Şubesi Yönetim Kurulu Üyelerine ve Çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü desteği ve özveriye esirgemeyerek sürekli yanımda olan anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım. Saygılarımla

Gurbet ÖRÇEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XIV

1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3.KOMPOZİT MALZEMELER ve ÖZELLİKLERİ.....	7
3.1.Kompozit Malzemelerde Yapı Bileşenleri.....	8
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
3.2.1 Takviye Malzemelerinin Şekillerine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	9
3.2.2. Matriks Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması	9
3.2.3. Takviyelerin Yapılışı Bakımından Sınıflandırılması.....	9
3.2.1.a. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	10
3.2.1.b. Parçacıklı Kompozit Malzemeler.....	12
3.2.1.c. Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	14
3.2.2.Matriks Malzemesine Göre Kompozitler.....	18
3.2.2.a. Plastik Matriksli Kompozitler.....	18
3.2.2.b. Seramik Matrisli Kompozitler.....	21
3.2.2.c. Metal Matriksli Kompozitler.....	21
4. PLASTİKLER.....	26
4.1. Plastiklerin Özellikleri.....	28
4.1.1. Sert Plastik -Yumuşak Plastik.....	28
4.1.2. Plastiklerin Görünüşü.....	28
4.1.3. Plastiklerin Yüzey Sertliği.....	29
4.1.4. Plastiklerin Yoğunluğu.....	29
4.1.5. Plastiklerin Isı Özellikleri.....	29
4.1.6. Plastiklerin Kimyasal Yapısı.....	29
4.1.7. Plastiklerin Fiziksel Halleri.....	32
4.1.8. Plastiklerin Molekül Ağırlığı.....	35
4.1.9. Katkılı Plastikler.....	35
4.1.10. Takviyeli Plastikler	35
4.2.Plastik Çeşitleri.....	36
4.2.1.Elastomerler.....	37

4.2.2.Termoplastikler.....	37
4.2.3.Termosetler.....	40
5.ANİZOTROPİK MALZEMELERDE GERİLME-ŞEKİL	
DEĞİŞTİRME BAĞINTILARI.....	43
5.1.Orthotropik Malzemelerde Gerilme-Şekil Değişirme Bağintıları.....	46
5.2.Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme.....	50
5.3. Keyfi Takviyeli Kompozit İçin Gerilme-Şekil Değişirme Bağintıları.....	53
5.4.Ortotropik Takviyenin Mukavemeti.....	57
5.4.1 Asal Malzeme Doğrultularında Malzemenin Mukavemeti.....	57
5.4.2. Mühendislik Sabitlerinin Bulunması	60
6.TABAKALANDIRILMIŞ KOMPOZİT MALZEMELER.....	67
6.1. Bir Tabakadaki Gerilme-Şekil Değişirme Değişimi.....	67
6.2.Tabakalandırılmış Plakalar	67
6.2.1. Tek Katmanlı Konfigürasyonlar.....	67
6.2.2.Simetrik Tabakalar.....	69
6.2.3. Antisimetrik Tabakalar.....	71
6.2.3.1. Antisimetrik Çapraz Kat Tabakaları.....	72
6.2.3.2. Antisimetrik Açılı Kat Tabakalar.....	72
6.2.3.3. Simetrik Olmayan Tabakalar.....	72
7. ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ.....	74
7.1. Sonlu Elemanlar Metodu.....	77
7.1.1. Sonlu Elemanlar Metodunda Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar.....	78
7.2.Sonlu Elemanlar Yönteminin Plaka Analizinde Kullanılması.....	78
8.PLAK TEORİLERİ.....	83
8.1. Kirchhoff Teorisi	83
8.2. Tabakaya Uygulanan Kuvvetler ve Momentler.....	84
8.3.Tsai Hill Teorisi	87
8.4. Tsai- Wu Tensör Teorisi.....	88
9.SAYISAL ÇÖZÜMLER.....	89
9.1. Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	90
9.2. Kompozit Plakanın Sonlu Eleman Modeli.....	91
9.3. Termoplastik Tabakalı Kompozit Plakalar	92
10. SAYISAL SONUÇLAR.....	95
10.1. Plastik Bölge Dağılımının İncelenmesi	95
10.2. Yükleme Basamaklarında elde edilen Elastik, Plastik, Elasto-Plastik ve	
Artık Gerilme değerleri.....	102

10.3. İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Elastik Gerilme Bileşenlerinin	
Değişim Grafikleri.....	128
10.4. Elastik Gerilme Bileşenlerinin Tabakalardaki Değişim Grafikleri.....	130
10.5. İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Plastik Gerilme Bileşenlerinin Değişim	
Grafikleri.....	132
10.6. İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Artık Gerilme Bileşenlerinin Değişim	
Grafikleri.....	134
10.7. İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Elasto-Plastik Gerilme	
Bileşenlerinin Değişim Grafikleri.....	136
10.8. A-E Çizgisinde Meydana Gelen Elastik Gerilmelere ait Grafikler.....	139
11. SONUÇLAR.....	142
KAYNAKLAR.....	144



TABLULARIN LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Elyaf malzemelerin özellikleri.....	19
Tablo 3.2 MMK Malzemelerin özellikleri ve uygulama alanları	23
Tablo 4.1 Termoplastik ve termoset matrisli kompozitlerin karşılaştırılması.....	41
Tablo 5.1 Bazı kompozitlerin tipik mekanik özellikleri	62
Tablo 9.1 Fiber takviyeli termoplastik kompozit tabakanın akma noktaları ve Ö lçülmüş mekanik özellikleri	94
Tablo 10.1 Basit mesnetli simetrik tabakalarda akmayı başlatan yük değerleri.....	95
Tablo 10.2 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	106
Tablo 10.3 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	107
Tablo 10.4 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	109
Tablo 10.5 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	110
Tablo 10.6 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	111
Tablo 10.7 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	113
Tablo 10.8 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	114
Tablo 10.9 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	115
Tablo 10.10 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	117

Tablo 10.11	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	118
Tablo 10.12	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	119
Tablo 10.13	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	121
Tablo 10.14	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	122
Tablo 10.15	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	123
Tablo 10.16	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	125
Tablo 10.17	Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler.....	126

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 Kompozit malzeme tipleri	9
Şekil 3.2 İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemelerde gerilmeye bağlı davranışlar.....	16
Şekil 3.3 Farklı gerilme-şekil değiştirme davranışları.....	17
Şekil 3.4 Tabakalandırma konstrüksiyonu.....	18
Şekil 4.1 Sıcaklığa bağlı olarak polimerlerin özgül hacim-sıcaklık değişimi.....	33
Şekil 5.1 Çekme Gerilmesi Uygulanan Elastik Bir Cisimde Meydana Gelen Şekil Değişiklikleri	46
Şekil 5.2 Elastik bir cisme kayma gerilmesinin uygulanması.....	48
Şekil 5.3 Poisson oranının tespiti.....	50
Şekil 5.4 Keyfi takviyeli kompozit için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları	53
Şekil 5.5 Takviyeli Kompozitin Mukavemet çeşitleri.....	58
Şekil 5.6 (a) Fiber eksenine paralel doğrultuda yükleme.....	58
Şekil 5.6 (b)Fiber eksenine dik doğrultuda yükleme.....	59
Şekil 5.7 Sürekli fiber ile kuvvetlendirilmiş kompozitlerde hacim ve yük dağılımı.....	60
Şekil 5.8 Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_1 ' in değişimi.....	62
Şekil 5.9 Fiber eksenine dik doğrultuda yükleme.....	63
Şekil 5.10 1 doğrultusunda yüklenen hacim elemanının gösterilmesi.....	64
Şekil 5.11 Fiberlerin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak poisson oranının değişimi.....	65
Şekil 5.12 Kayma gerilmesi ile yüklenen bir hacim elemanı.....	65
Şekil 5.13 Bir hacim elemanının kayma deformasyonu.....	65
Şekil 6.1 Dört katmanlı bağlanmış görünüm.....	69
Şekil 6.2 Düzenli antisimetrik dört katmanın ayrıık görünüşü.....	71
Şekil 7.1 K ve n değerlerinin tespiti.....	75
Şekil 7.2 Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı.....	76
Şekil 7.3 Tabakalanmış plakanın genel yükleme şekli.....	79
Şekil 7.4 Düzlemsel laminat plakada yüklerin ve momentlerin tanımı.....	80
Şekil 8.1 xz düzlemindeki şekil değiştirme geometrisi.....	83
Şekil 8.2 Gerilme ve moment bileşenleri.....	85
Şekil 8.3 N katmanlı tabakaların geometrisi.....	85
Şekil 8.4 Asal eksen takımlarının tanımlanması.....	88
Şekil 8.5 Tsai-Wu/Tsai-Hill Deneysel sonuçlar grafiği.....	89
Şekil 9.1 Kare şeklinde ortasında eliptik delik bulunan plakanın boyutları.....	90
Şekil 9.2 Ortasında eliptik delik bulunan plakanın $\frac{1}{4}$ 'lük kısmı.....	90
Şekil 9.3 Kompozit plakanın kalınlığı ve yükün uygulanışı	91

Şekil 9.4 Kompozit plakalarda simetrik dizilim	91
Şekil 9.5 Kompozit plakanın simetrik 8 adet dizilimi	91
Şekil 9.6 Kompozit plakanın $\frac{1}{4}$ 'ünün boyutları ve sınır şartları.....	92
Şekil 9.7 Tam plakanın basit mesnetli hali.....	92
Şekil 9.8 Çalışmada kullanılan plakanın sonlu eleman ağı	93
Şekil 9.9 Fiber takviyeli termoplastik kompozit tabakanın üretimi.....	93
Şekil 10.1 Basit mesnetli 45/-45 dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik Bölge dağılımı (üst tabaka).....	97
Şekil 10.2 Basit mesnetli 30/-30 dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı (üst tabaka).....	98
Şekil 10.3 Basit mesnetli 60/-60 dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı (üst tabaka).....	99
Şekil 10.4 Basit mesnetli 0/0 dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı (üst tabaka).....	99
Şekil 10.5 25 iterasyon toplu grafikleri	100
Şekil 10.6 50 iterasyon toplu grafikleri	100
Şekil 10.7 75 iterasyon toplu grafikleri	101
Şekil 10.8 100 iterasyon toplu grafikleri	101
Şekil 10.9 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği (üst tabaka) (45/-45)	128
Şekil 10.10 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği (üst tabaka) (30/-30).....	128
Şekil 10.11 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği (üst tabaka) (60/-60)	129
Şekil 10.12 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği (üst tabaka) (0/0)	129
Şekil 10.13 $[45^0/-45^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi.....	130
Şekil 10.14 $[30^0/-30^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi.....	131
Şekil 10.15 $[60^0/-60^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi.....	131
Şekil 10.16 $[0^0/0^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi.....	131
Şekil 10.17 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka) (45/-45).....	132
Şekil 10.18 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka) (30/-30).....	132
Şekil 10.19 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka) (60/-60).....	133

Şekil 10.20 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (0/0).....	133
Şekil 10.21 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (45/-45).....	134
Şekil 10.22 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (45/-45).....	135
Şekil 10.23 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (30/-30).....	135
Şekil 10.24 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (60/-60).....	135
Şekil 10.25 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (45/-45).....	137
Şekil 10.26 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (30/-30).....	137
Şekil 10.27 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (60/-60).....	137
Şekil 10.28 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği	
(üst tabaka) (0/0).....	138
Şekil 10.29 [45 ⁰ /-45 ⁰] diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler.....	139
Şekil 10.30 [30 ⁰ /-30 ⁰] diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler.....	140
Şekil 10.31 [60 ⁰ /-60 ⁰] diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler.....	140
Şekil 10.32 [0 ⁰ /0 ⁰] diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler.....	140

SEMBOLLER LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>
A	Kesit alanı,(mm ²)
d	Fiber çapı,(mm)
E	Elastikiyet modülü, MPa
f	Fiber Hacim Oranı
f_{min}	Kritik hacim oranı, (%)
G	Kayma modülü, MPa
I	Atalet momenti
L	Fiber uzunluğu,(m)
L_c	Kritik fiber uzunluğu ,(m)
η	Verim
V_f	Fiber hacim içeriği, (%)
ν	Poisson oranı
τ	Kayma gerilmesi, MPa
θ	Takviye açısı
σ_φ	Çekme Gerilmesi, MPa
σ_k	Kompozitin 11 eksenindeki çekme gerilmesi,MPa
σ_f	Fiberin kırılma gerilmesi, MPa
σ_m	Matriksin kırılma gerilmesi, MPa
σ_{11}	11 Doğrultusunda oluşan gerilme, MPa
σ_{12}	12 doğrultusunda oluşan gerilme, MPa
σ_{22}	Eğik düzlem üzerinde oluşan gerilme, MPa
ϵ_{xx}	xx ekseninde uzama miktarı, (%)
ϵ_k	Kompozitin uzama miktarı
ϵ_f	Fiberin uzama miktarı
ϵ_m	Matriksin uzama miktarı
t	Transformasyon matrisi
S	Kayma mukavemeti
X	Eksenel mukavemet
Y	Transvörs mukavemeti

1.GİRİŞ

Günümüzde gemi yapımından bina yapımına, ev aletleri üretiminden uzay teknolojisine kadar hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemenin ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır.

Bu anlamda “kompozit malzeme” kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940’lı yılların başında gerçekleşmiştir.

İlk çağlardan beri insanlar kırılğan malzemenin içine bitkisel veya hayvansal kaynaklı lifler koyarak bu kırılğan özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konuda en iyi örneklerden biri kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde, killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi bitkisel sap ve lifler, malzemenin gerek üretim, gerek kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır.

Öte yandan, günümüzde kompozit malzemenin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamaların da çok yeni olmadığı yapılan araştırmalardan anlaşılmaktadır. Örneğin, cam liflerinin üretimi, Eski Mısır’a kadar tarihlendirilmektedir. Cam liflerin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt 1877 tarihli dir.

Çok eski çağlardan beri, geleneksel bir malzeme olan kerpişte, kil hamuruyla birlikte bitkisel liflerin, samanın; alçı sıva ve kartonpiyer uygulamalarında keten veya kenevir liflerinin, kırık ve at kuyruğu, keçi kılı gibi hayvansal liflerin kullanıldığı bilinmektedir. İlk kez ince levha ve boru yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllar boyu önemini koruyarak, bugün hala kullanılan bir malzeme olma niteliğini sürdürmektedir. Ancak asbest liflerinin, özellikle bazı türlerinin insan sağlığı açısından zararlı olduğunun saptanması, bu uygulamanın sağlıkla ilgili nedenlerle kısmen sınırlandırılması ve alternatif donatı malzemesinin kullanımının yaygınlaşması sonucunu doğurmuştur.

Öte yandan, liflerle donatılı sentetik reçineler 1950’li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Özellikleri açısından, liflerle donatılı harç ve betonlara göre farklılık gösteren bu malzemenin en tanınmış grubunu “ cam lifi donatılı polyester reçinesi kompoziti ” oluşturmaktadır. Ülkemizde “fiberglas” diye tanınan bu malzeme, 1960’lı yılların başından itibaren Türkiye’ de sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımında kullanılmıştır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan “Anadol ” un da kaportası bu malzemeden yapılmıştır.

Cam lifleriyle donatılı sentetik reçine matrisli malzemeler için dilimizde “Cam takviyeli Plastik (CTP)” adı yerleşmiştir. Cam takviyeli plastiklerin üretiminde en çok kullanılan

malzeme olan polyesterin yanısıra, günümüzde diğer termoset ve termoplastik reçineler de kullanılmaktadır.

Kompozit malzemenin diğer önemli bir türünü oluşturan “Taneli Kompozit Malzeme”nin ilk üretimi de yine çok eskilere dayanmaktadır. Bilindiği gibi, günümüzde en yaygın kullanılan bu tür malzemelerden olan beton, ince ve kalın agrega ile bir bağlayıcıdan oluşmaktadır[1].



2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler nispeten yeni bir alan olup, araştırmalar II. Dünya savaşı esnasında mevcut klasik malzemeler, tek başına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamış ve bu malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmiştir. Bu gelişmelerin sebebi malzemelerde yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastisite modülü/yoğunluk oranı elde edilmesidir. Bu nedenle, spesifik uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır. Bu malzemeler belirli uygulama alanları için, üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek amacıyla belli spesifik konfigürasyonda, değişik fazdaki malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan malzemeler olduklarından çok fazlı malzeme olarak da adlandırılırlar[2].

Geçmişten günümüze kadar kompozit malzemeler üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. Bilim adamları, kompozit malzemelerin temelleri çok eskiye dayanmasına rağmen özellikle son otuz yıldaki gelişmelere dikkat çekmektedirler. Daniel ve Ishai' ye göre; fiber takviyeli kompozit malzemeler ilk olarak 1945'te elektrik malzemelerinde, 1970'lerin sonundan başlayarak da havacılık, otomotiv, spor aletleri ve biomedikal sanayiinde kullanılmaya başlanmıştır. 1980'lerde ise seramik ve metal matriksler üzerinde durulmuştur. Bunlar yüksek mukavemet ve düşük ağırlıktan dolayı tercih edilmiştir. 1990'lı yıllardan itibaren uzay sanayiinde de yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır [3].

Fiber Takviyeli kompozit yapılarla ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Kompozitlerin anizotropik yapısı Azzi ve Tsai[4] tarafından incelenmiş ayrıca, Chou, P.C.ve arkadaşları [6], Chou,T.W.ve arkadaşları[7] tarafından da incelenmiştir.

Yapıcı ve arkadaşları, fiber takviyeli tabakalı termoplastik kompozit levhalarda delik-kenar arasında oluşan elasto-plastik gerilmeleri incelemiştir. Bu çalışmada fiber takviyeli termoplastik delikli kompozit bir levhanın tek yönde çekmeye maruz kalması durumunda delik çapına bağlı olarak levhalarda delikten kenara kadar meydana gelen artık gerilmeler incelenmiştir[5].

Hogget termoplastik matriksli fiber takviyeli yapıları [8] ve termoplastik kompozit reçineleri [9] incelemiştir.

Kays ve arkadaşları termoplastik matriks kompozitlerin çözücülere karşı direncini araştırmıştır[10].

Muzzy ve Kay termoplastik ve termoset yapısal kompozitler üzerine çalışmışlardır[11].

Lin ve Kuo delikli kompozit plakların burkulmasını incelemiştir[12].

Karakuzu ve arkadaşları fiber takviyeli Alüminyum matriks tabakalı kompozit plaklara sonlu elemanlar tekniğini uygulamışlardır[13,14].

Yapıcı ve arkadaşları termoplastik kompozitlerin düzlemsel kuvvetler altında elasto-plastik gerilme analizini yapmıştır[15].

Xiong tarafından düzlemsel yüklenmiş sonlu geometride bağlantı deliği bulunan kompozit levhanın gerilme analizi yapılmıştır. Bu analiz kompleks değişkenleri içeren formül üzerine kurulmuştur[16].

Özer ve arkadaşları düzlemsel yüklenmiş ortasında dairesel delik bulunan kompozit plakta oluşan elastik gerilmeleri analizini yapmıştır. Bu çalışmada elastik gerilme analizlerini incelemiş ve çalışmayı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar programı tarafından yapmıştır[17].

Özbay tarafından basit mesnetli, simetrik ve antisimetrik plak şeklinde paslanmaz çelik ile takviye edilmiş alüminyum matriksli kompozitler düzlemsel olarak yüklenmiştir. Elasto-plastik gerilmelerdeki sayısal çözüm, çok sayıda iterasyon kullanarak sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür[18].

Fish ve Guttal tarafından düzlemsel levha ve kabuklar için yeni bir sonlu elemanlar metodu geliştirmişlerdir. Bu yeni metoda sonlu elemanlar yönteminin S-versiyonu adını vermişlerdir[19]. Böylece onlar tarafından sonlu elemanlar yönteminin s-versiyonu, kabuklar ve düzlemsel plak için geliştirilmiştir.

Sundareson ve arkadaşları, kısmi kenar basıncına maruz orta kalınlıktaki düzlemsel levhanın kritik yükleri üzerine etkilerini araştırmışlar ve sekiz düğümlü izoparametrik levha üzerindeki uygulamayı geliştirmişler[20].

R.Karakuzu ve arkadaşları elasto-plastik analiz için iki boyutlu sonlu elemanlar programı geliştirilmiştir[21].

Kaltakçı tarafından iki eksenli üniform yüklemde veya kesme etkisindeki dairesel delikli ortotrop kompozit levhalarda, dairesel delik kenarındaki gerilme dağılımı incelenmiştir. Ortotrop plakta kompozit malzeme olarak cam –epoksi ve grafit-epoksi dikkate alınmış, ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için izotrop plaktaki sonuçlarda elde edilmiştir. İki eksenli yüklemde, yüklemenin her ikisi de çekme veya basma olması hali ile birisinin çekme diğerinin basma olması hali için sonuçlar bulunmuştur[22].

Arslan ve arkadaşları termoplastik matriksli, simetrik ve antisimetrik olarak farklı doğrultudaki açılarda takviyelendirilmiş plakta elasto-plastik gerilme analizini gerçekleştirmişler [23].

Ayrıca Arslan ve arkadaşları tarafından sonlu elemanlar metodu kullanılarak çelik fiberler ile kuvvetlendirilmiş termoplastik matriksli plakta elastik ve elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır[24].

U şeklindeki izotrop çelik plakta elasto-plastik gerilme analizi Sonlu elemanlar metodu kullanılarak Arslan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir[25].

Sayman ve arkadaşları tarafından Yarı dairesel çentik bulunan çelik/alüminyum kompozitinden yapılmış levhaların üniform yayılı yükler altında elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Meydana gelen iç gerilmelerle, çentik civarındaki gerilme yığılmaları azaltılarak levha mukavetinin artırılması yoluna gidilmiştir. İncelemeler değişik yük ve yarıçaplar için yapılmış olup, meydana gelen plastik bölgelerin yayılışı ve iç gerilmelerin değişimi incelenmiştir[26].

Gür ve arkadaşları, Kompozit malzemeden imal edilmiş, ortasında dikdörtgen bulunan, üniform yayılı çekme yüklerine maruz düzlem levhada elasto-plastik gerilme analizini yapmışlardır. Malzeme olarak alüminyum matriks ve çelik fiberden oluşmuş çelik-alüminyum kompoziti seçilmiştir. Çalışmalarında sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal çözüm yapılmıştır. Çözümde dokuz düğümlü izoparametrik sonlu elemanlar kullanılmıştır. Farklı fiber açıları için, ilk akmayı başlatan değerden itibaren kademeli olarak artırılan üniform yayılı çekme yüklerinde analizler tekrarlanmıştır. Dikdörtgen delik etrafındaki iç gerilmelerin dağılımı ve plastik bölgelerin yayılışı farklı fiber takviye açılarında incelenmiştir[27].

Sayman ve arkadaşları ortasında delik bulunan alüminyum metal-matriks kompozit plakada sonlu elemanlar yöntemi ile elastik-plastik gerilme analizini incelemişlerdir[28].

Kocaer ve arkadaşları kenarlarında dairesel çentikler bulunan levhaların gerilme yığılmasını sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Bu çalışmada ayrıca strain-gage metoduyla deneysel bir çalışma yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daire yarıçapının daireler arasındaki uzaklığa bağlı olarak gerilme yığılması faktörleri için bir abak tespit edilmiştir[29].

Karakuzu ve arkadaşları kenarlarında dairesel çentik bulunan metal matriks plakalarda sonlu eleman yöntemi ile elastik-plastik analizi incelemişlerdir. Elastik-Plastik gerilme analizi için iki boyutlu sonlu eleman programını geliştirmişlerdir[30].

Sayman, düşey yüklü paslanmaz çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriks tabakalı plakalarda elasto-plastik gerilme analizini incelemiştir. Bu çalışma, basit mesnetli düşey yüklü paslanmaz fiber çelik takviyeli metal matriks plakalarda denenmiştir. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak elasto-plastik gerilme analizi incelenmiştir. Bu çalışmada tabakaların simetrik ve/veya antisimetrik çarpaz katlı ve açılı durumlarda, plastik bölgeler ve artık gerilmeler tespit edilmiştir [31].

Sayman ve arkadaşları, düzlemsel yüklenmiş tabakalı alüminyum metal matriks kompozit plakalarda elasto-plastik gerilme analizini incelemiştir. Bu gerilme analizini çarpaz katlı, tabakalandırılmış metal matriks, simetrik ve antisimetrik plakalarda incelemiştir[32].

Arslan ve arkadaşları ortasında kare delik bulunan termoplastik kompozit plakada elastik-plastik gerilme analizlerini incelemiştir[33].

Karakuzu ve arkadaşları üzerinde yarı dairesel çentik bulunan çelik/alüminyum kompozitinden yapılmış levhaların üniform yayılı yükler altında elasto-plastik gerilme analizi yapmıştır. Meydana gelen iç gerilmelerle, çentik civarındaki gerilme yığılmaları azaltılarak levha mukavemetinin attırılması yoluna gidilmiştir. İncelemelerini değişik yük ve yarıçaplar için yaparak, meydana gelen plastik bölgelerin yayılışı ve iç gerilmelerin değişimini göstermiştir[34].

Baheei-El-Din ve Dvorak düzlem yüklenmiş metal-matriks kompozit levhaların simetrik dizilimindeki elastik-plastik davranışlarını incelemiştir[35].

Karakuzu ve Özcan çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriks kompozit kirişte elasto-plastik gerilme analizini incelemiştir[36].



3.KOMPOZİT MALZEMELER ve ÖZELLİKLERİ

Kompozit malzemeler; şekil ve/veya kimyasal bileşimleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözülmeyen iki veya daha fazla sayıda makrobileşenin kombinasyonundan oluşan malzemeler şeklinde de tanımlanabilir. Belirli bir uygulama için malzemeden beklenen değişik fiziksel, mekaniksel veya kimyasal özellikler, bu özelliklere sahip bileşenler tarafından sağlanır. Buna göre kompozit malzemeler makro ölçüde heterojen karakterli bir yapıya sahiptirler. İç yapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene)yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına karşılık mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir[37].

Karışmaz olmaları nedeniyle malzeme içerisinde fazlar arası büyük miktarda iç yüzey (ara yüzey) oluşur. Kompozitlerde sürekli faza matris adı verilir. Kesintili (parçalı) veya elyaf (fiber) şeklindeki fazlar ise matrislerden ayrı bölgeler olarak malzeme içerisinde yer alır[38].

Orijinal malzemelerle elde edilmeyen bir özellik elde etmek için iki malzemenin kombinasyonu ile kompozitler üretilir. Kompozit malzemeler alışılmışın dışındaki bükülmezlik, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve iletkenlikten oluşan kombinasyonları elde etmek için seçilebilmektedir[38].

Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içerisinde çözünmezler. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme ve bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen arayüzey reaksiyonları görülebilir [37].

Kompozit malzemeye, "çok bileşenli malzeme", "çok fazlı malzeme", "donatılı malzeme" ve "pekiştirilmiş malzeme" gibi adlarda verilmektedir.

Yukarıdaki tanıma göre, kompozit malzemedeki genelde dört koşul aranmaktadır.

- İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,
- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerinin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olması [1].

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerden başlıcaları;

- Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- Yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık, ısı iletkenliği ve ısı direnci,
- Elektrik iletkenliği ve elektriksel direnci,
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Rijitlik,
- Ağırlık
- Görünüm

ve benzeri özellikler şeklinde sıralanabilir.

Bu amaca yönelik olarak, kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, tüm yöntemlerde değişmeyen temel ilke, bileşenlerinin zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Bir kompozitin yapısı, genelde matris olarak adlandırılan sürekli bir faz ile, onun içinde dağılıp değişik özelliklere sahip donatı fazından meydana gelmektedir[1].

3.1.Kompozit Malzemelerde Yapı Bileşenleri

Kompozit malzemeler metalik, organik veya inorganik esaslı yapı bileşenlerinin kombinasyonundan oluşur. Mümkün kombinasyonlarda herhangi bir sınırlama olmamakla beraber yapı bileşenlerinin sahip olabilecekleri geometrik şekiller sınırlıdır. Matris, fiberler, partiküller, pullar, tabakalar başlıca yapı bileşenleridir. Hacim bileşeni olan matrisin esas fonksiyonları fiber, partikül, pul gibi diğer yapı bileşenlerinin kendi bünyelerinde dağılmasını sağlamak, bu bileşenler arasında bağlayıcı bir faz etkisi göstermek, süresiz fiber kompozitlerde olduğu gibi malzemeye gelen gerilimleri pekiştirici faza iletmek ve kompozit malzemenin uygun tekniklerle şekillendirilmesini sağlamaktır. Fiberler, partiküller, pullar, tabakalar kompozitin iç yapısını oluşturan bileşenlerdir. Bu bileşenler çoğu zaman bir matris malzemesi içerisinde yer almakla beraber bazı kompozitlerde hacim bileşeni olan matris mevcut değildir. İki veya daha fazla sayıda farklı malzeme tabakalarının arasında bir bağ oluşturarak meydana getirdiği bileşik tabakalar ve sandviç yapılar bu tür kompozitlere örnek olarak verilebilir.

Kompozit malzemeler en az iki yapı bileşeninden meydana geldiğinden bileşenler arasında sınır oluşturan bir arayüzey mevcuttur. Bu arayüzey monolitik malzemelerdeki tane sınırlarına özdeştir. Bazı kompozitlerde yapı bileşenleri arasında arafaz olarak adlandırılan ayrı bir bölge görülebilir. Plastiklerin güçlendirilmesinde kullanılan cam fiberler üzerine uygulanan kaplama malzemeleri bir arafaz olarak kabul edilebilir.

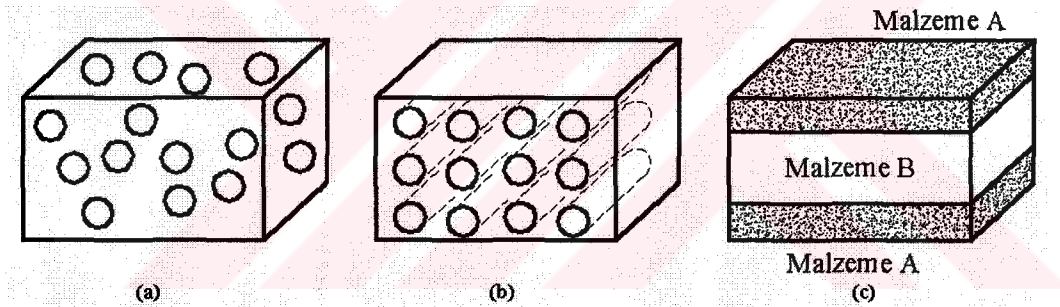
Kompozit malzemelerin özellikleri, çalışma koşulları altındaki davranışları ve performansları yapı bileşenlerinin özelliklerine, hacim oranlarına, şekil ve yapısal düzenlenişlerine, aralarındaki etkileşime, arayüzey ve arafaz özelliklerine bağlıdır[37].

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması değişik şekillerde yapılabilir. Kompozit malzemede; kuvvetleri takviye elemanına iletmek, lifleri ortamın etkisinden ve darbelerden korumak, kompozit malzemelerin tokluğunu arttırmak gibi görevleri üstlenen matrikse ve matriks malzemesine göre kompozit malzeme belli bir sınıflandırmaya tabi tutulur.

3.2.1 Takviye Malzemelerinin Şekillerine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

- a) Fiber takviyeli (elyaflı) kompozit malzemeler
- b) Parçacıklı kompozit malzemeler
 - Dağınımla (dispersiyonla) mukavemetlendirilmiş
 - Partikül takviyeli kompozit malzemeler
- c) Tabakalı kompozit malzemeler



Şekil 3.1 Kompozit malzeme tipleri; a) Parçacık takviyeli kompozit, b) Fiber takviyeli kompozit, c) Tabakalı kompozit malzeme [38,39].

3.2.2. Matriks Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

- a) Plastik matriksli malzemeler
- b) Seramik matriksli malzemeler
- c) Metal matriksli malzemeler
- d) Karbon/grafit matriksli malzemeler

3.2.3. Takviyelerin Yapılışı Bakımından Sınıflandırılması

a) Elyaf takviyeli kompozit malzemeler (ETKM): Burada matriks kuvvetleri elyafa iletilir. Kuvvet tümüyle elyaf tarafından taşınır, anizotropik özelliktedirler.

b) Küçük parçalarla dayanımı artırılmış malzemeler: Kuvvetler matriks tarafından taşınır. Küçük parçacıklar (0.01-0.1µm) metal malzemede dislokasyonların hareketini engelleyerek

dayanımı artırırılar. İzotropik özelliktedirler. Örneğin çökme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımlar.

c) İri parçacık takviyeli kompozit malzemeler: Yükü matriks ve takviye birlikte taşırlar. Özellikleri izotropiktir. Örnek olarak beton verilebilir[38,39].

Birinci grup sınıflandırma olan, takviye malzemelerinin şekilleri açısından yapılan sınıflandırma ile ilgili açıklamalar aşağıda belirtilmektedir.

3.2.1.a. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler arasında en fazla önem taşıyan fiber takviyeli kompozitlerdir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pekçoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeyken gösterdikleri değerlerin çok üstünde değerler alabilir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği ise 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özellikleri “Whisker” olarak adlandırılan ve çapları 5-25 μ kadar olabilen küçük çaplı fiberlerden çok daha belirgin olarak görülebilir. Mukavemet ve rijitlikteki artışlar esas olarak yapı hatalarındaki azalma ile ilgilidir. Çapları 0.15 mm den 0.003 mm’ye kadar değişebilen fiberlerle, çok daha küçük çaplı whiskerlerin sahip oldukları bu özellikler malzeme bilimci ve mühendislerin ilgisini çekmiş ve bu tür malzemelerden mukavemet artırıcı işlemlerde yararlanma düşüncesi doğmuştur.

Metallerin plastik özelliklerinde yapı hatalarının daha iyi anlaşılmış olması ve özellikle whisker olarak adlandırılan yüksek mukavemetli tek kristallerin geliştirilmesi, çok yüksek mukavemetli kompozit malzeme üretimine önemli katkılarda bulunmuştur. Bazı metallerin sertlik ve mukavemetlerinin çok yüksek olmasına karşın, çentik hassasiyetleri çok yüksektir. Gerilim altında oluşan bir çatlağın sünek matris içerisinde ilerlemesi son derece zordur. Yüksek mukavemetli malzemelerde çentik hassasiyetinin azaltılmasında uygulanan bazı yöntemler vardır. Bunlardan biri, dış etkenlerin neden olabileceği mekanik hasarlara karşı koyabilmek için sert malzeme sünek matris ile kaplanır veya fiber demeti halinde iken sünek matris malzemesi içinde uygun olarak dağıtılır. Böylece hem mukavemetli hem de tok bir malzeme elde edilir [37].

Fiber takviyeli kompozitler, fiberin ve whiskerlerin kullanılması ile geliştirilen malzemelerdir. Matris malzemesi metalik, seramik veya polimerik esaslı olabilir. Matris, fiberleri birbirine bağlar ve onları mekaniksel ve kimyasal hasarlara karşı korur. Ayrıca fiberleri birbirinden ayırarak gevrek bir çatlağın, malzemenin tüm kesiti boyunca yayılmasını önler. Fiber ile matris arasındaki bağ, dış yükler altında fiberlerin matristen kopup ayrılmasını veya ara yüzeyin bozulmasını önleyecek kadar kuvvetli olmalıdır. Ayrıca fiber ile matris arasında malzemeyi zayıflatacak bir kimyasal reaksiyon olmamalıdır [37].

Sünek matris içerisine güçlü, bükülmez, kırılğan fiberlerin ilavesiyle fiber takviyeli kompozitlerin mukavemeti, yorulma direnci ve ağırlığa göre mukavemet oranı iyileşmektedir. Fiberler, uygulanan yükün büyük bir kısmını taşıırken matris malzeme yükün fiberlere transferini sağlamakta, süneklik ve tokluk temin etmektedir. Dağılım; mukavemetlendirilmiş kompozitlerin aksine kompozitlerin mukavemeti hem oda sıcaklığında, hem de yüksek sıcaklıklarda artar[39].

Malzemelerin fiberlerle donatılması, öncelikle mekanik dayanımları daha iyi olan kompozit malzemeyi üretmeye yöneliktir. Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla lifler, teller, çubuklar veya değişik yapıda örgü malzemeleriyle donatılmaktadır[1].

Metallerde çalışma koşulları altında genellikle iki tür bozulma görülür. Bunlar sürünme ve yorulma sonucu meydana gelen hasarlardır. Sürünme daha çok yüksek sıcaklıklarda görülür ve matriksteki gerilimle ilgilidir. Matriksin kuvvetli fiberlerle pekiştirilmesi ile sürünme direnci yükselir. Metallerde yorulma sonucu meydana gelen hasarlara da çok rastlanır. Bu tür bozulma yapı çatlakların oluşması ve yayılması sonucu görülür. Yapıda kuvvetli fiberlerin bulunuşu, bu çatlakların oluşumunu ve yayılmasını önler [37].

Fiber takviyeli malzemelerin mikro yapısal özelliklerini tek boyuta sahip fiber takviye belirler. Çoğu metal ve alaşımlara benzemeyen fiber takviyeli metal kompozitler anizotropiktir. Anizotropinin derecesi ilk olarak fiber oryantasyonunun derecesine bağlıdır. Fiberlerin ilk rolü metal matris fiberlere yük dağılımını ve transferlerine çalışırken yükü taşımaktır. Matrsten fibere transfer edilen yükün etkisi (verimi) matris ile fiber arasındaki ara yüzeyin yapışmasına bağlıdır. Yüksek ara yüzey etkisi düşünülünce kompozitin mekaniksel özelliklerinden daha çok fiber özelliklerine bağlıdır [38].

Fiber kompozitler, bileşenlerin organik veya inorganik esaslı olmalarına göre aşağıdaki şekilde gruplandırılabilirler;

- a) Organik fiber-organik matriks : Rayon ve naylon iplikleriyle pekiştirilmiş lastikler , odun takviyeli polietilen ve termoset reçineler, grafit takviyeli epoxy, poliimid, polietersülfon ve fenolik reçineler gösterilebilir.
- b) İnorganik fiber- organik matriks : Düşük ağırlıklı yüksek mukavemetli kompozitlerin muhtemelen en önemli bölümünü oluştururlar. Cam fiberleriyle pekiştirilmiş poliesterler, epoxy reçineleri, polistiren, polikarbonat, polivinilklorür kompozitleri endüstrinin çeşitli dallarında kullanılmaktadır. Plastiklerin pekiştirilmesinde cam fiberlerin yanısıra metalik fiberlerde kullanılabilir. Örneğin, kısa boylu metalik fiberlerin rastgele dağılımı ile

pekiştirilmiş epoxy kompozitlerinin darbe mukavemetleri, ısı distorsiyon sıcaklıkları ve ısı iletkenlikleri cam-epoxy kompozitlerinden daha iyidir.

- c) İnorganik fiber- inorganik matriks : Bunların geliştirilmesinin esas nedenlerinden biri, organik malzemelerle kazanılamayan yüksek sıcaklı performansına ulaşmaktadır. Refrakter karakterli yüksek mukavemet ve modüllü seramik whiskerlerle pekiştirilmiş metaller bu yönde oldukça ümit vericidir.
- d) Organik fiber- inorganik matriks : Bunlara karbon fiberleriyle pekiştirilmiş cam-cam seramikler, grafit fiber takviyeli seramik ve metaller örnek olarak gösterilebilir[37].

3.2.1.b. Parçacıklı Kompozit Malzemeler

- Dağınımla Mukavemetlendirilmiş Metal Matriksli Kompozit Malzemeler

Bu kompozit, üniform bir şekilde dağıtılmış ince parçacıklara sahip ana matrisin içerdiği bir mikro yapı tarafından karakterize edilir. Partikül çapı 0.01 μm den 0.1 μm civarında değişir ve partikülün hacimce oranı %3-5 arasındadır. Dispersiyonla kuvvetlendirilmiş alaşımların yapı ve özelliklerini kontrol eden faktörler, disperse olan fazın kendi özellikleri, yapı içerisindeki dağılımın üniform olması, matris-partikül ara yüzey özellikleridir [38].

Dispersiyonla pekiştirmenin gerçekleşebilmesi için yapı içerisinde mikro ve makro düzeyde toplanmalar (segregasyonlar) olmadan, üniform bir dağılımın sağlanması gerekir [34].

Dağınımla mukavetlendirilmiş kompozitlerin parçacık boyutu çok küçüktür (parçacık çapı 100-2500 Å). Çünkü küçük parçacıklar, dislokasyon hareketlerini engelleyerek belirtilen mukavetlenme etkisini oluşturmaktadır. Çok az miktarda dağınım malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır [39].

Partikül boyutu hem kendi mukavemetini hem de kompozit malzeme mukavemetini kontrol etmesi yönünden kritik bir öneme sahiptir. Küçük boyutlu partiküllerin dislokasyon şebekeleri üzerindeki etkileri daha büyük olacaktır. Boyut büyüklüğünde, partiküllerin kendi yapılarında dislokasyon veya çatlak gibi yapı hatalarının bulunma ihtimali artacağından, kompozit malzemenin mukavemetinde düşme meydana gelir. Belirli bir hacim için partikül boyutu doğrudan doğruya partiküller arası mesafeyi kontrol eder. Aynı hacim oranı için partikül boyutu küçüldüğünde partikül arası mesafede küçüleceğinden dislokasyon hareketleri daha etkili bir şekilde önlenecek ve kompozit malzemenin mukavemeti artacaktır [37].

Matris ve partiküller arasındaki ara yüzey özellikleri bir çok yönden önem taşır. Kuvvetli ara yüzey bağı elde etme büyük öneme sahiptir [2]. Bu nedenle, ideal olarak matrisin partikülleri ıslatması, temas açısının düşük olması istenir. Ancak, oksitlerle metallerin kristal yapıları arasındaki farklılıklar nedeniyle ara yüzeyde iyi bir atomik uygunluğun gerçekleşmesi genellikle güçtür. Karbür ve nitrürlerle metaller arasında oksitlere göre daha iyi uygunluk

sağlanabilmekle beraber, karbür ve nitrürlerin kararlılıkları oksitlerden daha düşüktür. Bazı oksitler küçük boyutlarda olduklarından iyi bir atomik uygunluk ve kuvvetli bir ara yüzey elde edilebilir. Örneğin, bakır içerisinde iç oksitlenmeyle elde edilen THO_2 ve MgO partikülleri yaklaşık $300 \text{ \AA}$ boyutunda olduklarında bakırın kristal yapısı ile uyumludurlar. Bu tür bir uyum iç oksitlenme tekniğinde olduğu gibi, partiküller doğrudan doğruya metal partikülleri üzerinde oldukları zaman elde edilir[37].

Normal sıcaklıklarda dağılım mukavemetlendirilmiş kompozitler iki fazlı metal alaşımlarından daha zayıf olabilmektedir. Buna karşın dağılım mukavemetlendirilmiş kompozitler, aşırı yaşlanma, temperlenme, dağılan fazın tana büyümesi ve kabalaşması sonucu şiddetli şekilde yumuşamaması nedeniyle, kompozitin dayanımı artan sıcaklık ile sadece kademeli olarak azalmaktadır. Ayrıca kompozitin sürünme direnci metal ve alaşımlara göre daha üstündür[39].

Dispersiyonla kuvvetlendirilmiş alaşımlar esas olarak yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirildiklerinden, disperse olan fazın yüksek sıcaklıktaki kararlılığı önem kazanır. Oksit partiküllerinin servis sıcaklıklarında ayrışmaması, matris içerisinde çözünmemesi ve boyutların büyümemesi gerekir. Bileşenler arasında iyi bir bağ mevcut olduğunda ara yüzey enerjisi düşeceğinden partiküllerin büyümesi önemli ölçüde azalacaktır. Bunun yanı sıra, partiküllerin matris içerisindeki difüzyon hızı da tane büyümesini kontrol eden bir etkidir. Matris bileşimi ve empürüte miktarının kontrolü ile difüzyon hızı ve buna bağlı olarak partikül büyümesinin en az düzeylerde tutulması mümkündür[37].

- Partikül Takviyeli Metal Matris Kompozit Malzemeler

Partikül takviyeli kompozit malzemelerde, belirgin uniform olarak dağılmış sert, gevrek malzeme yumuşak daha sünek bir matrisle kuşatılmıştır. Aslında yapı, iki fazlı dağılım mukavemetlendirilmiş metal alaşımlarına benzemektedir. Buna karşın, kompozitlerde dağılan parçacıkları oluşturmak için faz dönüşümü kullanılmaz[38,39].

Bu Kompozit, hacim oranı %5'den daha fazla ve çapı da $1 \mu\text{m}$ 'den daha büyük disperse partiküller tarafından karakterize edilir[38].

Partikül takviyeli metaller, mikron seviyesindeki küçük partiküllerin metalik bir matris içerisinde dağılmasıyla elde edilen ve yüksek derecede izotropik özellikler gösteren kompozit malzemelerdir. Metallerin sertliklerini geliştirmek için değişik türde oksit, karbür veya nitrür partiküllerden yararlanılabilir. Sermet olarak bilinen kompozit malzemede oksit, karbür veya nitrür gibi seramik esaslı bir faz, metalik bir faz içerisinde dağılmıştır. Tungsten karbür, titanyum karbür, krom karbür, bor karbür gibi karbürlerin tipik özellikleri, yüksek sertlik ve aşınma dayanımlarıdır. Alüminyum oksit, magnezyum oksit, toryum oksit gibi oksitler, yüksek

ısı kararlılık özellikleri ile bilinirler. Partiküllerin boyutları, hacim oranları, partiküller arası mesafe, matris içerisinde dağılım üniformluluğu, matris içerisindeki çözünürlükleri ve ısı kararlılıkları bu tür malzemelerin özelliklerini kontrol eden esas faktörlerdir. Partiküllerin boyut ve hacim oranlarına göre iki farklı türde alaşımlarla ikinci faz bir kaç yüz angstrom boyutunda olup hacim oranı %3-5'i aşmaz. Disperse olan faz genellikle oksitlerdir. Diğer taraftan sermetlerde, oksit veya karbür partiküllerinin boyutlarının çok daha büyük olmasının yanı sıra hacim oranları %70'in üstündedir[37,38].

Partikül kompozitlerin sermetleri ve dispersiyonla kuvvetlendirilmiş metaller şeklinde gruplara ayrılması kimyasal bileşim yönünden gerçekçi değildir. Zira, pekiştirici faz her iki malzemede de aynı olabilir. Örneğin Cr-Al₂O₃ veya Cr-MgO sermetlerinde yer alan Al₂O₃ ve MgO partikülleri, daha düşük hacim oranlarında ve daha düşük boyutlarda olmak üzere Al-Al₂O₃, Ag-MgO, Cu-Al₂O₃ gibi dispersiyonla kuvvetlendirilmiş alaşımların yapı bileşenini de oluşturabilir. Bu nedenle ayrımın partikül boyutuna ve hacim oranına göre yapıldığına dikkat edilmelidir. Bu ayrımı daha açık bir şekilde yapabilmek için çoğu zaman partikül kompozitler ve dispersiyonla kuvvetlendirilmiş metaller şeklinde bir sınıflandırma yoluna gidilebilir[37].

Partikül boyutları ve hacim oranları arasındaki fark, mekanik özellikleri de farklı şekilde etkiler. Dispersiyonla kuvvetlendirilmiş alaşımlarda ikinci fazın etkisi dislokasyon hareketlerini engellemesi şeklindedir. Hacimsel olarak %3-5 oranındaki ve angstrom boyutlarındaki partiküllerden oluşan kompozitlerde partiküller, yük taşıyan veya yüksek sertlikleri nedeniyle aşınmaya karşı direnci doğrudan doğruya arttıran fazı oluştururlar. Boyutlarının büyük olması nedeniyle dislokasyon hareketleri üzerindeki etkileri zayıftır[37].

3.2.1.c. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, değişik özelliklere sahip birden çok malzemenin bir yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu tür kompozitler "Lamine Kompozit Malzeme" diye de adlandırılmaktadır. Çeşitli tabakaların birbirine yapıştırılmaları şeklindeki üretimin bir sonucu olarak, tabakalı kompozit malzemeler, yapısal nitelikleri bakımından diğer kompozit malzeme türlerinden farklılık göstermektedirler. Diğer kompozit malzeme türlerinde, taneli kompozitlerde veya liflerle donatılı kompozitlerde yapılan sürekli faz ve dağılı faz veya matris ve faz gibi niteleme ve ayrımlar, tabakalı malzeme için aynı anlamda kullanılmamaktadır [1].

Tabakalı kompozit malzemeler, çeşitli yönlerden farklılıklar gösteren tabakaların bir araya getirilmesi ile üretilmektedir. Bu farklılık, mukavemet, ısı iletimi, gözeneklilik, ağırlık, yüzey sertliği, suya veya diğer dış etkilere karşı direnç gösterme gibi çok çeşitli yönlerden olabilmektedir. Tabakalı kompozitlerde genelde kompoziti oluşturan farklı özelliklere sahip tabakalardan her biri, kompoziti iki yönde katetmektedir. Bu tabakalar, herhangi bir teknikle veya yapıştırıcıyla bir araya getirilmektedir[1].

Tabakalanmış yapılar, fiberlerle pekiştirilmiş kompozit tabakaları veya pekiştirilmemiş metal tabakaları arasında bir bağ oluşturarak elde edilen malzemelerdir. Farklı özelliklere sahip metal tabakalarının birleştirilmesi ile değişik uygulamalar için önem kazanan özelliklerin kazanılması mümkündür. Bu özellikler [37];

- Yüksek yüzey sertliği, aşınma direnci,
- Tokluk, esneklik, darbe direnci,
- Korozyon direnci,
- Geliştirilmiş ısı ve elektrik özellikler,
- Görünüm,
- Maliyet.

- Tabakalı Kompozitlerin Yük altındaki Davranışları

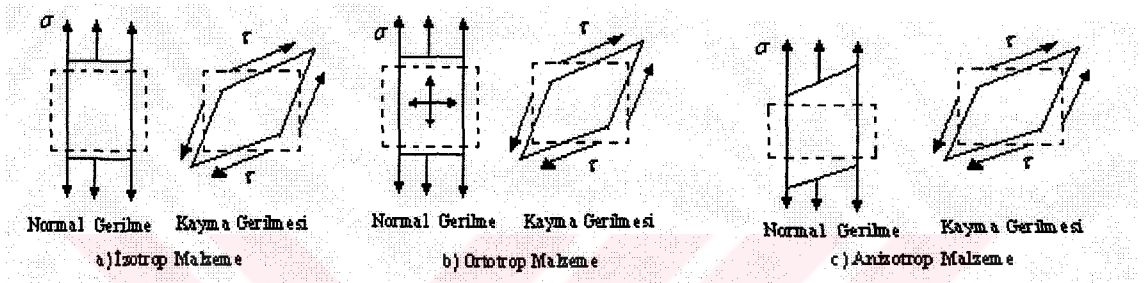
Kompozit malzemelerin mekanik davranışları diğer bir çok malzemeye uymamaktadır. Uygulamada kullanılan malzemelerin çoğu homojen ve izotrop özellikler göstermektedir. Buna karşılık kompozit malzemeler genelde heterojen ve anizotrop yapıya sahiptirler. Heterojen malzemede, malzemenin özellikleri bir noktadan başka bir noktaya geçildiğinde değişir. Buna benzer anizotrop bir malzemede de özellikler, bir noktada değişen doğrultuya göre farklılık gösterir. Bu değişim, birbirine dik üç düzlemde yer alan veya üç doğrultudaki özellikler olarak ele alınabilir. İki cam tabakasının aradaki polivinilbutiral(PVB) tabakasıyla birleştirilerek üç tabakalı tek bir levha elde edilmesi yoluyla üretilen tabakalı camlarda (lamine camlar) , kompoziti oluşturan cam ve polimer tabakalarından her biri homojen ve izotrop özelliğe sahipken, bunların birleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzeme tamamen heterojen yapıdadır. Bu nedenle kompozit malzemelerin mekanik davranışları genelde;

- Kompoziti oluşturan malzemelerin ve bunların birbirleriyle ilişkilerinin mikroskobik düzeyde ele alındığı mikro mekanik davranışlar,
- Kompozit malzemedan kaynaklanan ortalama özelliklerin bir bütün olarak ele alınarak değerlendirildiği makro mekanik davranışlar olarak iki ayrı başlık altında ele alınarak irdelenir[1].

Malzemelerin izotrop veya anizotrop oluşuna göre mekanik davranışları farklı özellikler gösterir. Uygulamada, anizotrop malzemelerin bir çoğu genel olarak ortotrop özellikler göstermektedir. İzotrop malzemeler, yapılarında herhangi bir yöne göre değişiklik olmayan malzemelerdir. Normal gerilme altında, Hooke Yasası sınırları içinde, ilgili şekildeki gibi şekil değişikliği gösterirler. Bu malzemelerin bünyelerinde kayma gerilmeleri meydana gelmesi halinde, malzemede açı değişikliği görülmektedir.

Ortotrop malzemelerde, birbirine dik doğrultulardaki malzeme özellikleri farklılıklar gösterir. Yüklemin asal malzeme doğrultusunda olması halinde, malzeme üzerinde etkili olan kuvvetin yönüne bağlı olarak uzama ve kısalma şeklinde kendini gösteren, izotrop hale benzer bir şekil değişikliği meydana gelir. Kayma halinde ise, malzemenin yönler göre zaten farklı olan Poisson oranlarından (ν_1, ν_2) ve elastisite modüllerinden (E_1, E_2) bağımsız bir açı değişikliği görülebilir.

Anizotrop malzemelerde, normal gerilme doğrultusu, asal malzeme doğrultularıyla çakışmamaktadır. Bu durumda, normal gerilme altında hem boyutsal deformasyon, hem de açısal değişiklik meydana gelir. Aynı durum, basit kayma etkisi altında da görülmektedir.



Şekil 3.2 İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemelerde gerilmeye bağlı davranışlar [1].

Tabakalı kompozit malzemelerin imali sırasında tabakaların bir araya getirilmesi işlemi istendiği gibi düzenlenebilir. Örneğin, tek sayıda, beş adet tabaka içeren bir kompozitte tabakalar, genellikle yapıldığı gibi, özelliklerine göre birbirleriyle 90° açı yapacak şekilde, orta tabakaya göre simetrik olarak düzenlenebileceği gibi, gereksinime göre asimetrik olarak da düzenlenebilir. Diğer bir konu ise, tabakalar arasında meydana gelebilen kayma gerilmeleridir. Tabakalı kompozitlerde, ortaya çıkan enine doğrultudaki normal gerilmeler de, belirli bir düzeyden sonra tabakalar arası ayrışmaya neden olabilmektedir [1].

- Tabakalandırılmış Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Temel Terimleri

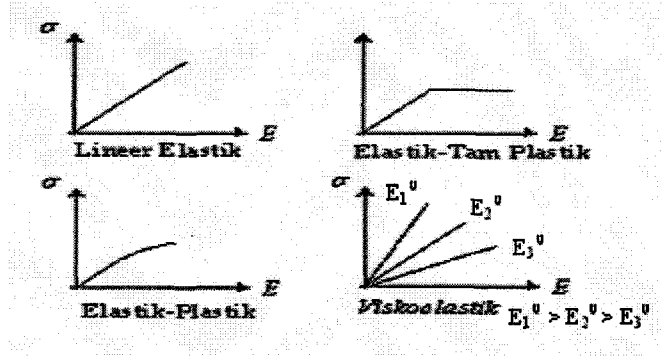
Tabakalandırılmış fiber takviyeli kompozit malzemelerin temel terimleri aşağıda verilmiştir. Bir tabaka için seçilen malzemelerin görevleri ve konfigrasyonları, matriksteki fiberle açıklanmıştır. Sonuç olarak fiber takviyeli kompozit tabakaların özellikleri bir tabakanın özellikleri ile aynı olmaktadır[3].

i. Tabaka

Tabaka; bir matriksteki fiberler yada tek yönlü fiber düzlemidir. Tek yönlü fiber haline aynı zamanda tek yönlü lamina da denir. Fiberler veya lifler ana takviyelendirme veya yük taşıma yönlerindedirler. Yapısal olarak sağlam ve rijittirler. Matriks; polimer, organik, sermik

veya metalik olabilir. Matrisin birinci görevi, yükü fiberler arasında yaymak ve fiberleri destekleyip korumaktır.

Tabaka elemanlarının özellikleri, fiber ve matrislerin özelliklerini taşımaktadır. Fiberler genellikle lineer elastik özelliği sergiler. Betondaki takviyelendirilmiş çelik çubuklar, daha çok elastik-plastiktirler. Diğer taraftan reçineli matris malzemeler ise viskoplastiktirler [3].

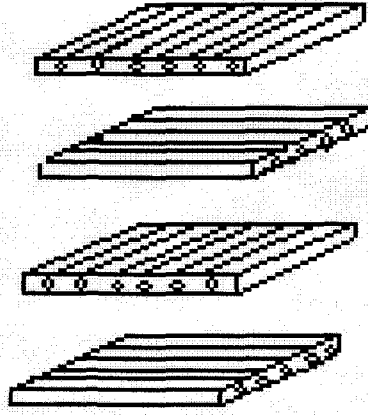


Şekil 3.3 Farklı gerilme-şekil değiştirme davranışları

ii. Tabakalandırma

Bir tabakalandırma aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi tabakalardaki ana malzeme yönlerinin kendi içerisinde yönlendirilmesi sonucu oluşturulur. Genellikle tabakalarda kullanılan matris malzemesi aynıdır. Bunun yanı sıra tabakalandırma; farklı malzemelerin tabakalarının kompoziti veya fiber takviyeli katmanların katmanları olabilir. Tabakalandırmanın ana amacı, elemanın yükleme aralığını genişletmek, malzemenin mukavemetini ve rijitliğini artırmaktır. Tabakalandırma ihtiyaca göre her tabakanın ana malzeme yönlerinden itibaren eşit olarak yerleştirilmemiş olabilir. Tabakalandırma sonuçları %50 daha fazla olan yüksek rijitlik ve mukavemete sahiptir.

Tabakalandırmadaki en büyük problem katmanlar arasındaki kayma gerilmeleridir. Kayma gerilmeleri her katmanda ayrı ayrı ve bağımsız olarak ortaya çıkmaktadır. Çünkü her katman farklı özelliklere sahip olabilir[3].



Şekil 3.4 Tabakalandırma konstrüksiyonu

3.2.2.Matriks Malzemesine Göre Kompozitler

Kompozit malzemelerin imalinde matriks (tali faz) olarak çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar metaller, hafif metaller, seramikler, plastiklerdir.

Metal ve hafif metal matriks malzemeler teorik olarak kompozit malzemeyi teşkil etmekle beraber kompozit malzeme yapımında amaçlanan hafiflik ve imalat kolaylığını sağlayamaz, mukavemet özellikleri için arzu edilen değerler yalın olarak metallerin kullanılması ile elde edilecek değerlerden çok farklı olmayacaktır. Fakat yinede çok azda olsa metal matriksler kullanıldıkları zaman genellikle metal fiberlerle kullanılırlar. Matriks malzemeler içinde en fazla kullanım alanı bulan malzemeler plastiklerdir[40].

3.2.2.a. Plastik Matriksli Kompozitler

Polimerler, metal ve seramik malzemelere göre oldukça kompleks kimyasal bileşime sahip malzemelerdir. Matris olarak kullanıldıklarında polimerler, ucuz ve kolay çalışılabilir malzemelerdir, ama düşük elastik modülüne ve düşük kullanım sıcaklığına sahip olduklarından kullanım yerleri sınırlıdır[37].

Kompozit malzemeler, bir malzemenin yetersizliklerini diğer bir malzeme katarak giderme yoluyla oluşturulduklarından, bu malzemeleri oluşturan elyaf ve diğer katkıların ve matris malzemesini oluşturan polimerlerin, metal ve seramiklerin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 3.1 'de bazı elyaf malzemelerin özellikleri verilmektedir. Polimerler düşük yoğunluklu malzemeler olup kopma mukavemetleri düşüktür ve nisbeten büyük kopmada uzama değerlerine sahiptirler. Polimer matrisli kompozitler nisbeten daha kolay imal edilebilirler ve metal veya seramik matrisli kompozitlere nazaran daha yüksek hacimsel oranlarda elyafı takviye malzemesi olarak bünyelerinde barındırabilirler. Bu sebeple polimerler

daha yaygın olarak matris malzemesi olarak kullanılırlar[41].

Tablo 3.1 Elyaf malzemelerin özellikleri[38]

Malzeme	Yoğunluk(g/cm ³)	Lif yönünde Elastisite modülü(GPa)	Kopma Gerilimi(MPa)
Poliester	1.36	13.8	1100
E-tipi cam elyafı	2.52	72.3	3450
S-Tipi cam elyafı	2.49	85.4	4130
Kevlar 49	1.44	124	2760
T-300 Karbon elyafı	1.72	218	2240
VSF-32	1.99	379	1210
FB	3.96	379	1380
Boron	2.35	455	2070
Silikon karbür	3.19	483	1520
GY-70 Karbon elyafı	1.97	531	1720

Termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılan polimer matrisler genelde sürekli fiberlerle kullanılırlar. En çok kullanılan matris malzemesi epoksi reçineler, polyamidler (nylonlar), ve polyesterlerdir. Takviye malzemesi olarak cam, karbon ve organik fiberler tercih edilir, ayrıca polimer matrisli kompozitler havacılık alanında geniş bir kullanıma sahiptirler. F-14 ve F-15 uçaklarında dengeleyici olarak bor-epoksi, F-16 ve F/A-18 uçaklarında kanat yüzeyleri, hız frenleri ve kontrol yüzeylerinde karbon epoksi kompozitler kullanılmaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerde çalışırken göz önüne alınması gereken en önemli iki faktör sıcaklık ve nemdir. Özellikle bu iki faktörün beraber etkin olduğu şartlarda polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinde, hidrotermal etkilerden dolayı düşüşler meydana gelmektedir.

Bir çok uygulamada tercih edilmelerinin başlıca nedenleri şunlardır:

- Oldukça düşük yoğunluğa sahiptirler.
- Kitle üretim teknikleri kolay, hızlı ve ekonomik olarak üretilebilirler.

- Atmosferik koşullara ve bir çok kimyasal etkilere dirençlidirler.
- Moleküler yapıları değiştirilerek ve katkı maddeleri kullanılarak özelliklerinin değiştirilmesi mümkündür.
- Çeşitli renklerde retilerler, dekoratiftirler.

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan pekiştiricilerden en yaygın olanları cam, karbon, grafit, kevlar, asbest, mika, SiC ve Al₂O₃ fiberleri ile diğer bazı katkı malzemeleridir. Cam esaslı pekiştiriciler polimer esaslı kompozitlerde en çok kullanılan malzemelerdir. Bu tür kompozitlerin yaklaşık % 90'ında cam fiberler kullanılmaktadır. Elektrik camı olarak da bilinen E- camının elektrik ve ısı direnci oldukça yüksektir. Sürekli flamalar halinde standart tekstil camı olarak kullanılır. C-camı yüksek korozyon direnci istenen uygulamalarda kullanılan ve asitlere karşı dayanıklı bir cam türüdür. S-camının çekme mukavemeti, elastiklik modülü yüksektir ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da koruyabilir.

Aramid veya ticari adıyla kevlar fiberleri karbon, hidrojen, oksijen ve azottan oluşan aromatik bir organik bileşiktir. Uzun zincirli poliamid (naylon) plastiklerinden çekme işlemleriyle üretilirler. Diğer organik esaslı fiberlere göre çekme mukavemeti ve modülleri oldukça yüksektir. Yoğunlukları ve üretim maliyetleri düşük, spesifik mukavemet ve modülleri yüksek pekiştiricilerdir. Kompozit malzeme teknolojisinde Kevlar 29 ve Kevlar 49 türü aramid fiberleri olarak adlandırılıp kullanılmaktadırlar.

Asbest fiberler bir grup silikat minerallerinin adıdır. Krizotil (3MgO, 2SiO₂, 2H₂O), amosit (5.5FeO, 1.5MgO, 8SiO₂, H₂O), tremolit (2CaO, 5MgO, 8SiO₂, H₂O), antofillit (7MgO, 8SiO₂, H₂O), aktinolit (2CaO, 4MgO, FeO, 8SiO₂, H₂O), Krosidolit (Na₂O, Fe₂O₃, 3FeO, 8SiO₂, H₂O) bu grubun önemli üyelerindendir. Parantez içerisinde verilen temel bileşenlerin yanı sıra diğer bazı oksitleri de değişik oranda içerirler.

Asbest fiberler kristalin yapıları, çap ve boyları yönünden cam fiberlerden farklılık gösterirler. Cam esaslı pekiştiricilerin amorf yapıda olmasına karşılık asbest fiberleri kristalin yapıdırlar. Bu nedenle rijitlikleri daha yüksektir. Asbest minerallerinden elde edilen pekiştiricilerin uzunlukları sınırlıdır ve süreksiz fiber karakterindedirler.

Karışık fiberler (hibritler), termoset ve termoplastik reçinelerinin pekiştirilmesinde kullanılan grafit, bor, kevlar veya cam fiberlerinin kombinasyonlarından oluşan pekiştiricilerin birlikte kullanılması ile elde edilirler. Pekiştirici bileşenlerin faydalı özelliklerinin birlikte kazanılması kompozit malzeme özelliklerinin çok daha dengeli olmasını sağlar.

Plastiklerin pekiştirilmesinde cam, karbon, bor, kevlar fiberleri ve bunlardan elde edilen çeşitli tekstil ürünlerinin yanı sıra, daha az oranlarda olmak üzere talk, bazı oksitler, karbonatlar,

silikatlar ve metal gibi inorganik malzemelerle polipropilen, akrilonitril, poliester, keten gibi organik esash pekiştiriciler veya dolgu malzemeleri kullanılır[38].

Polimerler hakkında ileriki bölümlerde daha geniş bilgi verilmektedir.

3.2.2.b. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler çok sert, kırılğan ve düşük yoğunluğa sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda bile yüksek elastik özellikler gösterirler ama kimyasal olarak inerttirler. Ayrıca termal şok direnci ve tokluğu düşük olan malzemelerdir. Dolayısı ile kullanım sırasında ani zorlanmalara karşı kolay hasar sergilediklerinden, kullanım yerleri sınırlıdır. Seramik malzemelerin, seramik fiberlerle takviye edilmesi durumunda, mukavemet yükselmekte ve tokluklarında monolitik seramiklere göre 20 kat kadar arttırılabilmektedir. Alumina ve Zirkon esash seramik kompozitler üzerinde son yıllarda yapılan çalışmalar, bu malzemenin sadece roket başlığı, uzay araçları gibi uygulamaların yanı sıra insan vücudunda da kullanılmaya başlanmıştır. Seramik matrisli kompozitlerde proses parametreleri ile oynanarak mikro çatlaklar oluşturulur. Oluşturulan bu mikro çatlaklarla gerilme konsantrasyonlarının yoğunlaşması engellenir ve böylece gerilmeler absorbe edilir.

Kompozit malzemelerde seramik kullanılmasının amacı, seramiklerin yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımından yararlanmak ve bu arada malzemenin tokluğunu arttırmaktır. Seramik matrisli karma malzemelerde kullanılan elyaf çatlak ilerlemesini durdurarak veya geciktirerek tokluğu artırır.

Bu kompozit malzemelerde en çok kullanılan bileşimler (elyaf/matris olarak) SiC/cam, SiC/Si₃N₄, karbon/SiC'dir. Malzemelerin başlıca kullanım yerleri; roket ekzos çıkışları C/SiC ve SiC/SiC kompozit malzeme, turbojet motorlarında ekzos çıkışları C/SiC kompozit malzeme, uzaya fırlatılan uydularda karbon/cam boru ve tüplerdir[38].

Yüksek sıcaklığa dayanıklılık, kimyasal kararlılığın yüksek olması, çok sert olmaları, metallere hafif olmaları (%40 mertebesine varan), hammadde olarak bol miktarda bulunması ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması, pahalı ve stratejik malzemelere ihtiyaç göstermemesi, erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olması, oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması, sürtünme katsayısının düşük olması, basma dayanımının yüksek olması, düşük yoğunluk ve yüksek elastisite modülüne sahip olmaları seramik matrisli kompozit malzemelerin geniş kullanım alanına neden olmaktadır[38,42].

3.2.2.c. Metal Matriksli Kompozitler

Partikül takviyeli MMK malzemeler yüksek elastik modül ve mukavemet, yüksek aşınma direnci, üretiminin diğer takviye türlerine göre kolay, çok çeşitli ve düşük maliyetli olarak yapılması sonucu bu konu üzerinde yapılan çalışmalar önemli hale gelmiştir. Özellikle 1960

yıllarından itibaren nikel kaplı grafitler argon gazı ile matris içerisine başarılı bir şekilde enjekte edilmesi ile konu geliştirilmeye değer kazanmıştır. 1968’de Hindistan Teknoloji Enstitüsü vorteks metodunu ilk defa kullanmış ve Al-Al₂O₃ kompozitini dökmüştür. Bu çalışmalardan sonra Rooke Üniversitesi’nde yapılan çalışmalarda, sıvı-katı aralığında yarı katı malzemeye partikül ilavesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Matris metali olarak kesin bir ayırım yapmak, mümkün olmamakla birlikte, kullanılacak takviye elamanına uygunluğu ve üretim yönteminden gelen kısıtlamalar, matris malzemesi olarak bazı malzemeleri öne çıkartmıştır. Alüminyum, Bakır, Magnezyum, Titanyum gibi değişik özelliklerdeki malzemeler saf olarak kullanıldığı gibi yaygın olarak alaşımları ile birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca takviye malzemesi ile matris malzemesinin uygunluğu, matris malzemesinin ıslatması, oluşan reaksiyonlar sonucu meydana gelen ara yüzeyin mekanik özellikleri, seçim yapılırken ne kadar hassas olunması gerektiği konusunda temel fikri vermektedir.

Matris-takviye ara yüzeyinde, ıslatabilirlik kavramı önem kazanmaktadır. Islatmanın meydana gelebilmesi için ara yüzey bağ mukavemetinin sıvının yüzey gerilimine galip gelmesi gerekmektedir.

Ara yüzey bağ mukavemetini dolayısı ile sıvı katı ara yüzeyinde ıslanmayı etkileyen temel faktör partikül dağılımıdır. Ara yüzeyde partikül dağılımının homojen olması için partikül boyutunun, sıvının viskozitesinin ve katılma hızının yüksek olması gerekir.

Düşük yoğunluk ve iyi süneklik davranışının yanı sıra takviye elemanları ile güçlendirilmesi sonucunda rijitlik, dayanım, yorulma ve aşınma direncindeki artışlar alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kullanımını cazip hale getirmiştir.

En az iki bileşenin mevcut olduğu metal matriksli kompozitlerde genelde matriks metaldir, fakat saf metal nadiren matris olarak kullanılır. Genellikle bir alaşımdır ve ikinci bileşen bir takviyedir. Kompozitin üretiminde, matris ve takviye aralıksız karıştırılırlar. Kompozit, iki veya daha fazla fazlı alaşımlardan farklıdır. Kompozit malzemeler üretilirken, ikinci fazlar ötektik veya ötektoid reaksiyonlarla makro parçacık olarak şekillendirilir. Diğer bir deyişle, bir kompozitte başlangıçta metal matris ve takviye gibi iki ayrı bileşen mevcuttur[38].

Metalsel malzemelerin yüksek ergime sıcaklıkları, polimer sistemlerine göre çok daha yüksek sıcaklıklarda üretim ve şekil verme yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu hale getireceğinden, metal matris kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin düşünmesine neden olan fiber matriks reaksiyonları görülebilir. Metal matriks kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan grafit, bor, silisyum karbür, alumina gibi refrakter karakterli, yüksek mekanik özellik kazandırabilen takviye elemanlarının üretimi ileri teknoloji gerektiren pahalı yöntemlerdir.

Ayrıca sıvı halde üretim yönteminde, erimiş metalin takviye elemanlarını ısıtmaması, matris metalin oksidasyonu, homojen bir yapının elde edilememesi dökümde akıcılığın sağlanamaması gibi zorluklar bu malzemelerin üretiminde görülebilecek engeller olarak bilinmeli ve bu yönde gerekli önlemler alınmalıdır [37,38].

Metal matriks kompozit malzemelerin yüksek dayanımı, elastik modülü, tokluk ve darbe dayanımı, sertlik ve aşınma direnci, ısı dayanımı gibi, mekanik ve fiziksel özelliklerinin istenilen düzeyde olması metal matrikslerin özellikleri ile ilgili olduğu kadar takviye malzemelerinin yapısına, dağılımına, boyutlarına ve karışım oranlarına da bağlıdır. Uygun üretim yöntemleri, matriks ve takviye malzemeleri ile ilgili parametrelerin kontrollü kombinasyonu, yapıya bağlı olarak seçilen ısıtma işlem koşullarının değerlendirilmesi, metal matris kompozit malzemelerin değişik özelliklerinde üretilmesine olanak sağlar. Ekonomik koşulların, yeterli bilgi iletişiminin sağlanması ve bitmiş malzemeler için uygulama alanlarının doğru seçilmesi bu malzemelerin yaygın olarak üretilmesini ve kullanılmasını artırabilir[37,38].

MMK malzemelerin üretimindeki zorluklara rağmen, bu malzemelerin klasik malzemelere olan üstünlükleri, endüstride geniş bir uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur. Bu özellikler ve buna bağlı uygulama alanları aşağıda tabloda özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.2 MMK Malzemelerin Potansiyel uygulama alanları getirilebilecektir [37].

MATRIKS	TAKVİYE ELEMANI	ARANAN ÖZELLİKLER	UYGULAMA ALANLARI
Al Alaşımları	Grafit	Rijitlik, dayanım, düşük yoğunluk	Uydu, güdümlü mermi, helikopter parçaları
	%60 C (f)	Eksensel rijitlik, düşük yoğunluk, çok düşük eksensel ısı genleşme	Uzay teleskopu dalga kılavuzu ve yapısal destek parçaları
	Bor	Rijitlik, yorulma dayanımı, Aşınma direnci	Kompresör kanatları, yapısal destekler

MATRIKS	TAKVİYE ELEMANI	ARANAN ÖZELLİKLER	UYGULAMA ALANLARI
	Alumina	Düşük ısı genleşme, rijitlik yüksek ısı iletkenliği	Fizyon güç reaktörlerinde süper iletken durdurucular
	%5 Al ₂ O ₃ (w)	Aşınma direnci, sıcak çalışma dayanımı, iyi ısı iletkenliği	Dizel motor pistonları
	%20 Al ₂ O ₃ (p)	Yüksek rijitlik, düşük yoğunluk, tokluk	Kardan mili, şaft
	%12 Al ₂ O ₃ + %9 C	Aşınma direnci, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı	Motor silindir blokları
	Silisyum Karbür	Sürünme dayanımı,	Yüksek sıcaklık motor parçaları
	%20 SiC (p)	Aşınma direnci, düşük yoğunluk, iyi ısı iletimi	Fren rotor diskleri
Mg-Al	%20 SiC (p)	Yüksek rijitlik, düşük yoğunluk, iyi yorulma dayanımı	Bisiklet kasaları
	Bor	Eksensel rijitlik, düşük yoğunluk,	Anten yapıları
	Grafit	Düşük yoğunluk, rijitlik, düşük ısı genleşme	Uydu parçaları
	Alumina	Rijitlik, yorulma dayanımı, düşük yoğunluk	Helikopter transmisyon parçaları

MATRİKS	TAKVİYE ELEMANI	ARANAN ÖZELLİKLER	UYGULAMA ALANLARI
Ti Alaşımları	Bor	Yüksek sıcaklık dayanımı, kırılma tokluğu	Jet motoru fan kanatları
	Silisyum kaplı bor	Rijitlik, sürünme dayanımı	Yüksek sıcaklık yapı elemanları
	%40 SiC (f)	Dayanım, yüksek sıcaklık performansı, rijitlik, düşük yoğunluk,	Uçak motor parçaları
SüperAl.aşım	Molibden,tungsten	Dayanım, yüksek sıcaklık performansı, rijitlik, düşük yoğunluk, sürünme dayanımı	Yüksek sıcaklık, motor parçaları

4. PLASTİKLER

Polimerik (plastik) malzemeler doğal yollardan elde edilemezler. Bunların elde edilebilmesi için gerekli ham maddeyi sağlayan petrokimya endüstrisinin gelişmesini beklemek zorunlu hale gelmiştir.

Plastik endüstrisinin tarihi, Birmingham, İngiltereli Alexander Parker'in nitroselüloz ile camphor'u karıştırarak ' Parkesene ' adını verdiği bir madde elde edebileceğini keşfettiği 1854 yılına kadar dayanır. Bu ilk insan yapımı plastik malzemeyi oymalı fildişi ve kemik malzemelerin (örneğin , peçete halkaları ve bıçak sapları) yerine kullanmak üzere geliştirmiştir. Bu yeni malzeme kolayca ve ucuz bir yolla şekillendirilirken, geleneksel malzemeler el oyması ile ve döndürülerek şekillendirmeyi gerektiriyordu. Bu yeni malzemeye geleneksel ticari çevrelerden pek çok tepki vardı ve unutulmaya terk edilebilirdi. Ama 1868 'de John Hyatt tarafından Kolorado, ABD'de kendi salonlarında daha pahalı olan geleneksel fildişi toplar yerine kullanılmak üzere ucuz bilardo topları yapılması için " selüloid " olarak yeniden adlandırılarak kullanılmıştır.

Oldukça yanıcı, dengesiz ve bir çok kazanın da sebebi olan selüloid fırça arkalarının, tarakların, oyuncakların ve benzeri küçük ve ucuz maddelerin kalıplanmasında geniş kullanım alanı bulmuştur. Sinema filmi olarak da kullanılmıştır. Hala da fotoğraf filmi olarak kullanılmaktadır. Dengesiz ve yanıcı bir malzeme olması nedeniyle bir çok değerli arşiv filmi kaybolmuştur. Son zamanlarda daha güvenli ve dayanıklı selüloz asetat güvenlik filmleri ile yer değiştirmiştir.

Elde edilen ikinci önemli plastik 1907 ' de bulunan fenol-formaldehit reçinedir. Alman kimyacı Baekeand bu maddenin üretiminin patentini aldıktan sonra bakalit olarak adlandırmıştır. Geliştirilmesi şans eseri dökme yalıtıcı ve enstrüman kaplamalarının üretiminde elektrik mühendisliği endüstrisinin gelişmesi ile paralel gitmiş ve zamanla bugün bildiğimiz plastik endüstrisine ulaşılmıştır.

Seri üretim genişlemeye devam ettikçe, uzun-zincir molekülleri (polimerler) içeren ve tek molekülden (monomer) üretilen farklı polimerik (plastik) malzemelerin gerçek üretim potansiyelleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Kimyasal sentez ile yeni malzemeler üretimi kavramının düzenli gelişimi ile geniş ölçekli bir endüstri doğmuştur. Pek çok sentetik malzeme ilk olarak sadece küçük miktarlarda üretilmiş olmasına rağmen, İkinci Dünya Savaşı sonucunda doğan ihtiyaçlar bugün kullandığımız malzemelerin geniş ölçekte gelişmesine yol açmıştır. Polystyrene, polyvinylchlorid (PVC) ve polymethylmethacrylate (Perspex) gibi. Bunlar ve düzenli olarak genişleyen malzeme yelpazesi 1945 yılı itibariyle bir iç pazara ulaşmıştır.

Günümüzde plastik malzemeler yüksek mukavemet, hafiflik ve korozyona karşı dayanım özelliklerinden dolayı, otomotiv, denizcilik, balistik ve havacılık endüstrisi uygulamalarında tercih edilen malzemeler olmuştur[43].

Plastik Latince “plasticus” kökenli olup, el ile yoğrulabilen, biçim verilebilen anlamındadır. Teknoloji diliyle makromoleküllerin kullanılmasına dayanan, ısı ve basınç etkisiyle kalıba dökülerek, fişkırtılarak veya akıtılma yollarıyla biçimlendirilebilen yapay organik maddelerdir[44].

Plastik kelimesi isim olarak bir malzeme türünü belirtir, bir sıfat olarak kalıcı şekil değiştirebilen cisim anlamına gelir. Plastikler sınıfına giren malzemelerin bir kısmı doğal, bir kısmı ise sentetiktir. İnsanlar tarafından metallerden çok önce kullanılmaya başlanan ahşap, deri, yün ve benzeri lifler birer doğal polimerdir. Plastiklere ayrıca organik malzemeler denilmesinin nedeni bileşimdeki temel elemanın C oluşudur. Birbirleri ile zincir şeklinde kovalent bağlarla bağlı C atomları polimerlerin bel kemiğini oluşturur. Gerçekte çekme mukavemeti 3100 Mpa civarında olan ara lifleri en yüksek mukavemetli malzemelerden biri sayılır. C zincirlerine bağlı yan atomlardan en önemlisi H ‘dir. Bundan başka Cl, F, N,O ve S gibi yan atomların türüne ve diziliş biçimlerine bağlı olarak yüzlerce tür polimer geliştirilmiştir. Polimerlerde moleküller yapı, polimerizasyon derecesi, dallanma ve çapraz bağ oluşumu üretim koşullarına bağlı olarak çok değişebilir, dolayısıyla da özelliklerde çok farklı olabilir. Örneğin polietilenlerin mukavemeti 7 ile 17 Mpa , naylonlarınki 60 ile 100 Mpa arasında değişir. Polimerlerin kütle veya reçine halinde mukavemeti malzemelere göre oldukça düşük olmakla beraber lif haline getirilip kompozit malzemeye dönüştürüldükleri takdirde çok artabilir, özellikle özgül mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) yönünden metallerle rekabet edebilirler. Örneğin poliyamid liflerinden oluşan kevların özgül mukavemetli çeliğinkinin üç katı kadardır [45].

Plastik, moleküllerin belli bir düzen içerisinde sıralanması ile oluşan organik kimyasal bir maddedir. Moleküllerin sıralanması sırasında yapılacak olan değişim plastiğe farklı özellikler kazandırır. Daha farklı olarak değişik moleküllerin bir araya getirilmesi ile değişik özelliklerde plastik malzemeler elde edilir. Plastik malzemelerin bu özellikleri sebebi ile özel araçlar için değişik özelliklerde malzeme üretmek mümkündür. Plastikleri oluşturan molekül bağlarının fazla olması,farklı veya aynı moleküllerin bir ana malzeme içerisinde kullanılabilmesi plastiklerin teorik olarak sonsuz çeşit ve sayıda olabileceğini açıkça ortaya koyar[40].

Oldukça yeni olan plastikler, günümüzde gerek miktar gerekse çeşit bakımından büyük gelişme göstermektedirler. Hafif, kolay işlenebilir, korozyona karşı dayanıklı, iyi elektrik ve ısı yalıtkanlığına, iyi bir yüzey kalitesine ve görünüşe sahip polimerler, makine, uçak, elektrik,

elektronik, ev aletleri gibi sanayinin hemen hemen bütün dallarında gün geçtikçe daha çok kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, tekstil, mobilya ve inşaatlarda, kaplama ve sentetik yapıştırıcı olarak kırtasiye ve ambalaj malzemesi yapımında ve diğer bir çok alanlarda ucuzluk, dayanıklılık, kolay işlenebilme özelliklerinden dolayı çok kullanılmaktadır. Ayrıca insanların dokuları ve organları arasında plastikten yapılan yapay doku ve organlar gün geçtikçe daha çok kullanılmaktadır. Ancak plastikler metalik ve diğer mühendislik malzemelerine göre oldukça farklı özelliklere sahiptir[46].

4.1. Plastiklerin Özellikleri

4.1.1. Sert Plastik -Yumuşak Plastik

Plastik malzemelerin kimi sert kimi yumuşaktır. Bunun sebebi, plastikleşme sıcaklığının üzerine çıkıldığında esnek ve yumuşak oldukları, altında ise sert ve kırılğan oldukları bir sıcaklık değerinin olmasıdır. Bu sıcaklık değerine camsı duruma geçiş sıcaklığı (Tg) denir. Tg her plastik malzeme için farklıdır. Oda sıcaklığında bazı plastikler Tg'nin altındadır ve bu yüzden serttirler. Bazıları ise Tg' nin üstündedir ve yumuşaktırlar. Bazen plastiklere onların daha yumuşak ve daha esnek olmalarını sağlayacak katkı maddeleri eklenir. Bunlara plastik yapıcılar denir. Plastik olarak kullanılan polimerler şunlardır.

- Polietilen
- Polipropilen
- Polisitren
- Polyester
- Polikarbonat
- PVC
- Naylon
- Polimetil metakrilat

4.1.2. Plastiklerin Görünüşü

Plastiklerin çoğu renksizdir. Bu yüzden istenilen rengi elde edebilmek için renk verici maddeler kullanılır. Pigmentlerle opak görünüş elde edildiği gibi çözünür organik boyalarla şeffaf görünüm elde edilebilir. Polimetilmetakrilat gibi bazı polimerler çok berraktırlar. Bu özelliğinin yanı sıra Polimetilmetakrilat hafif olduğu için, hem optik camın yerine, hem de uçak gibi araçlarda kullanılır.

4.1.3. Plastiklerin Yüzey Sertliği

Plastik malzemelerin bir dezavantajı, yüzeylerinin yumuşaklığı ve çizilmeye karşı direncinin az olmasıdır. Plastikler cam, seramik ve metallere göre daha az serttirler. Opak, renklendirilmiş plastikler, yüzeyi boya ile kaplanmış plastiklerden daha serttir. Termoplastiklerin sertliği sıcaklık ve katılan plastifiyanin miktarının artması ile azalır. Termosetler dolgu maddeleri ilave edildikten sonra sert bir hal alırlar. Bunlarda sıcaklık artırılırsa sertliğin azalması yok denecek kadar azalır[46].

4.1.4. Plastiklerin Yoğunluğu

Plastiklerin yoğunluğu 0.9-2.5 g/cm³ arasındadır. Bundan dolayı ağırlığın önemli olduğu yerlerde plastikler kullanılmaktadır [46].

4.1.5. Plastiklerin Isı Özellikleri

Her ne kadar bazı plastikler 100-180° aralığında uzun süreli kullanım için tavsiye edilebilir başka plastikler, 250 °C 'ye kadar servis ömrüne sahip iseler de, çoğu plastikler geniş bir sıcaklık aralığında yumuşama gösterirler. Plastiklerin önemli bir özelliği ısı iletkenliğidir. Genellikle plastiklerin ısı iletkenliği kötüdür. Metallerin ısı iletkenlikleri 200-10000 cal/cm.san.⁰Cx10⁴ arasında iken plastiklerin ısı iletkenlikleri 2.0-8.0 cal/cm.san. ⁰Cx10⁴ arasındadır. Plastiklerin ısı iletkenliklerinin düşük olmasından dolayı, sürtünme veya tekrarlanan gerilmelerin sebep olduğu sıcaklık büyümesi, malzeme içerisinde ısı birikmesine sebep olur. Bu olay ısı yorulmaya yol açar. Isıl yorulmayı azaltmak için, plastik malzemelere katkı maddeleri ilave edilir. Bu amaçla en çok kullanılan katkı maddeleri metal tozları (alüminyum, bakır, vb.) veya çeşitli fiberler (karbon fiberler, cam fiberler, vb.) dir. Katkılı plastiklerin ısı iletkenlikleri en az 10 kat daha yüksektir.

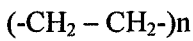
4.1.6. Plastiklerin Kimyasal Yapısı

Plastikler, monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen, yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir monomer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleriyle, tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makromolekül meydana getirmektedir. Böylece çeşitli monomerler veya monomer kombinezonu kullanılarak çeşitli tipte plastikler elde edilmektedir.

Kimyasal bakımdan plastikler, herhangi bir polimer gibi başka elementlerin atomları ile bağlanmış karbon atımlarından meydana gelmektedir. Plastikleri imal etmek için bilinen 100'den fazla elementten sadece 8'i kullanılmaktadır. Bunlar karbon (C), hidrojen (H), azot (N), silisyum (Si), fluor (F), oksijen (O), kükürt (S) ve klor (Cl)'dur.

Bu elementlerin çeşitli yöntemlere göre birleşmesi makromolekül adını taşıyan çok büyük ve kompleks moleküller meydana getirmektedir. Burada şu hususu da hatırlatmakta fayda vardır. Her atomun başka atomlarla bağlanarak bir molekül meydana getirmesi için belirli bir bağ kapasitesi (bağ enerjisi) vardır, ayrıca stabil bir molekül meydana getirmek için her atomun enerji bağlarının doymuş olması gerekir. Örneğin hidrojen ve fluor'un bir tek bağ enerjisi vardır ve dolayısıyla bu elementler sadece bir tek başka atomla bağ kurabilirler; karbon ve silisyum'da ise dört bağ bulunmakta ve bu elementlerin doymuş bir molekül meydana getirmek için dört başka atomla bağlanmaları gerekir. Buna göre H-H veya H-F molekülleri stabil, C-H veya SiCl stabil moleküllerdir.

Monomerlerden polimerizasyon yoluyla plastikler elde edilir. Bu amaçla bir reaktöre konulan milyonlarca monomer, sıcaklığın ve basıncın etkisi altında tutulur. Belirli katalizörlerin de mevcut olduğu bu ortamda, monomerleri oluşturan karbon atomlarının çift bağları yeniden düzenlenir ve karbon atomlarının her iki tarafında birer serbest bağ oluşmakla beraber, karbon atomlarının arasındaki çift bağ tek bağa dönüşür. Serbest bağlar başka monomerlerin serbest bağları ile bağlanır ve zincir şeklinde kararlı bir bileşik meydana gelir. Monomerlerin devamlı olarak bağlanması ile zincir gittikçe büyür ve reaksiyon zincirin serbest uçlarına bağlanan başı boş hidrojenlere rastlayıncaya kadar devam eder. Bu anda reaksiyon durur ve zincir tamamlanmış olur; bu zincir esasen tek bir moleküldür. Bu şekilde monomerlenen polimerizasyon yolu ile elde edilen malzemelere polimer denilir. Polimer zincirini oluşturan monomer sayısı büyük önem taşımaktadır. Polimerizasyon derecesi olarak bilinen bu sayı $DP = n$ ile ifade edilirse, polimerin kimyasal formülü, örneğin etilen monomeriden ($CH_2 = CH_2$) elde edilen polietilen için;



ve zincirin molekül ağırlığı M ise

$$M = nM_m = DP \times M_m \quad (4.1)$$

Şeklinde yazılır. Burada M_m monomerin molekül ağırlığıdır. Polimerin molekül ağırlığı aynı zamanda polimer zincirinin uzunluğunu da ifade etmektedir.

Polimerizasyon sırasında birbirinden bağımsız olan milyonlarca polimer zinciri mevcut monomerler bitinceye kadar aynı anda uzunluğu doğrultusunda büyür. Belirli miktarda hidrojen veya başka zincir durduran elementler ilave edilerek, az çok uzunlukları eşit olan zincirler elde edilebilir. Zincirin uzunluğu, plastik malzemenin özelliklerini ve teknolojisini önemli şekilde etkiler. Zincir uzunluğunun büyümesiyle plastiğin tokluğu, sürünme mukavemeti, erime sıcaklığı, erime viskozitesi büyür ancak teknolojisi daha zor olur. Plastiği oluşturan tüm

zincirler aynı uzunlukta imal edilemez, aralarında belirli farklar mevcuttur. Bu bakımdan bir polimeri oluşturan zincirlerin uzunluğu belirli bir istatistik dağılım göstermektedir. Dolayısıyla polimerin molekül ağırlığı esasen tüm zincirlerin ortalama molekül ağırlığıdır. Ancak aynı ortalama molekül ağırlığında zincirlerin uzunluk farklarına bağlı olarak daha dar veya daha geniş bir istatistik dağılım karşı gelebilir. Bu bakımdan dağılımın genişliği de önem taşımaktadır. Dar bir dağılım çok daha düzgün özellikler verir, ancak geniş bir dağılıma sahip olan polimerlerin teknolojisi daha kolaydır [46].

Monomerler başka monomerlerle her iki tarafında bulunan birer serbest bağ ile birleşirler, bu tip monomerlere “bifonksiyonel” denilir. Bunların yanı sıra her iki tarafında birden fazla bağ bulunan ve “polifonksiyonel” adını taşıyan monomerler de vardır. Monomerlerden oluşan molekülün (zincirin) şekli büyük ölçüde monomerlerin fonksiyon sayısına bağlıdır, şöyle ki “bifonksiyonel” monomerler lincer veya zincir şeklinde moleküller meydana getirmektedir. Bunun yanı sıra “polifonksiyonel” monomerler üç boyutlu çapraz bağlı yapı oluştururlar. Lincer ya da zincir şeklindeki moleküller düz lineer (zincir) veya dallanmış lineer (zincir) olabilirler.

Bilimsel olarak termoplastik ve termoset plastikler arasında ayrım esasen moleküllerin şekline göre yapılır. Bu bakımdan termoplastikler lineer moleküllere, termosetler ise üç boyutlu çapraz bağlı moleküllere sahip malzemelerdir.

Lineer moleküllerde, zinciri oluşturan ünitelerin arasında çok kuvvetli kovalent bağlar bulunmaktadır, bu bağlar esasen zincirin mukavemetini sağlamaktadırlar. Moleküller (zincirler) arasında ise fiziksel bir bağ bulunmamaktadır. Sadece zincirleri birbirlerine göre yakın tutan zayıf elektrostatik çekme (Van der Waal’s kuvvetleri) kuvvetleri vardır. Bu moleküller arası kuvvetler zayıflar, molekül zincirleri birbirine göre hareket bakımından sıvılara benzer şekilde serbest hale gelir ve malzemeye bir kalıpta kolayca istenilen şekil verilebilir. Malzeme soğutulduğunda, moleküller arası kuvvetler büyür ve molekül zincirlerini verilen yeni şekilde dondurur. Tekrar ısıtıldığında, moleküller arası kuvvetlerin zayıflaması sonucu, molekül zincirleri birbirine göre serbest hale gelir ve malzemeye başka bir şekil verilebilir. Ancak çok ısı verilirse, molekül zincirleri kopar ve malzeme özelliklerinde yıpranma meydana gelir. Aynı şekilde, oluşturulan parça sürekli basınç altında tutulduğunda, örneğin eğilme ve şekil değiştirme gibi durumlarda, zincirler birbiri üzerinde kaymaya başlar; bu da parçanın boyutlarını etkileyen sürünme ve soğuk-akma gibi olaylara neden olur.

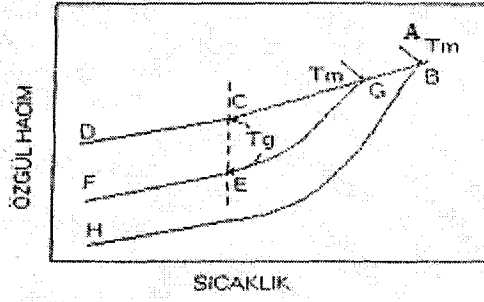
Molekül zincirleri arasındaki kuvvetler, zincirler arası mesafenin altıncı kuvveti ile ters orantılıdır. Zincirler arası mesafe küçüldükçe, zincirler arası çekme kuvveti büyür ve malzeme daha mukavim bir hal alır. Zincirlerin birbirine yaklaşmasında zincirlerin lineer veya dallanmış olması büyük önem taşır. Lineer zincirler birbirine daha çok yaklaşabilirler, aralarındaki çekme

kuvveti daha büyük olur ve dolayısıyla, sıkı olarak paketlenmiş bir yapı meydana getirirler. Dallanma ile plastik malzemenin yoğunluğu arasında sıkı bir ilişki vardır. Az dallı zincirler birbirine daha fazla yaklaştıkları için daha yoğun, dallanmış zincirler birbirinde daha uzak kaldıkları için yoğunluğu daha düşük bir malzeme oluştururlar. Termoplastik malzemelerin aksine termoset plastikler de molekül zincirleri arasında kuvvetli kovalent bağlar oluşur. Şöyle ki yapıyı oluşturan tüm moleküller, birbirine sıcaklığa karşı tersinir olmayan, kuvvetli bağlarla bağlanmış olur, yani tüm yapı fevkalade büyük tek bir molekül halini alır. Molekül zincirleri arasında oluşan çapraz bağlar ancak çok yüksek sıcaklıklarda kopabilirler, bu kopma, aynı zamanda malzemenin yıpranmasına neden olan zincirlerin kopması anlamına da gelmektedir. Bu nedenle termoset plastikleri bir kere kalıpta şekillendirildikten sonra, tekrar ısıtılıp yumuşatılamaz ve kalıpta şekillendirilemez veya çözülemez. Genellikle termoset plastikler yüksek sıcaklığa dayanıklı ve oldukça büyük bir boyut kararlılığına sahip malzemelerdir. Yukarıdaki açıklamalar ışığında, molekül ağırlığının yanı sıra, plastik malzemelerin özelliklerini önemli şekilde etkileyen ikinci bir faktörün molekül zincirinin şekli olduğu söylenebilir[46].

4.1.7. Plastiklerin Fiziksel Halleri

Plastiklerin fiziksel halleri sıcaklığa ve yapının amorf, kısmi kristalin ve kristalin olmasına bağlıdır. Sıcaklık molekül zincirlerini oluşturan ünitelerin dönme hareketini etkiler. Sıcaklığın artması ile bu hareket hızlanır. Molekül zincirleri arasındaki bağ kuvvetleri zayıflar ve zincirler birbirine göre daha bağımsız hale gelir. Sıcaklığın azalması ile ünitelerin dönmesi yavaşlar ve belli bir sıcaklıkta durur, sadece atomların kendi konumları etrafındaki titreşim hareketi kalır. Bu sıcaklığa, camsı duruma geçiş sıcaklığı (T_g) denir. T_g sıcaklığının altında, malzeme camsı hal denilen rijid, sert ve gevrek olur. Camsı hal malzemenin yapısına bağlı olmayıp esasen soğutma hızına bağlıdır.

Soğutma hızı, kristalleşme hızından daha yüksek olan herhangi bir malzeme camsı bir hal alabilir. Camsı duruma geçiş sıcaklığına, ikinci derece sıcaklığı da denilir. Camsı halden sıvı hale geçiş plastiklerin yapısına bağlıdır. Bilindiği gibi erime, özgül hacim, özgül ısı ve ısı genleşmesi gibi özelliklerinin aniden değişmesine neden olur. Bu bakımdan, plastiklerin özgül hacminin sıcaklıkta değişmesi dikkate alınırsa tam amorf plastiklerin camsı katı halden sıvı hale geçişi D-A eğrisine göre yapılmaktadır.



Şekil 4.1 Sıcaklığa bağlı olarak polimerlerin özgül hacim-sıcaklık değişimi.

ACD Tamamen amorf; AGEF Yarı kristalin; ABH Tam kristalin, Eğrinin D-C kısmında plastik camsı haldedir. Bu durumda malzeme ısıtılırsa, ünitelerin enerjisi büyür ve bu enerji potansiyel enerji engeli denilen bir enerjiden daha büyük olduğu durumda, molekül zincirlerini oluşturan ünitelerin hareketi başlar, zincir daha büyük esneklik kazanır, moleküller arası bağlar zayıflar ve malzeme yumuşak lastik gibi bir hal alır. Ünitelerin iç enerjisi, potansiyel enerji engeli ile eşit olduğu hale karşılık gelen sıcaklık esasen camsı duruma geçiş sıcaklığını temsil etmektedir. Sıcaklığın artması ile ünitelerin hareketi hızlanır, zincirler tedricen tamamen bağımsız hale gelir ve sıvı gibi davranmaya başlar. Bu kısa açıklamadan anlaşıldığı gibi tam amorf polimerlerin esasen bir erime sıcaklığı yoktur, bunların sadece camsı halinden yumuşamış yani lastik gibi hale geçişinde camlaşma geçiş sıcaklığı vardır, lastik gibi halden sıvı hale geçiş tedricen yapılır.

Tam kristalin malzemenin katı halden sıvı hale geçişi H-B-A eğrisine göre yapılır. Bu malzemenin camsı duruma geçiş sıcaklığı yoktur. Katı halinden ısıtılırsa T_m erime sıcaklığında, latent (gizli) ısıya karşılık gelen bir ısıda kristalin yapı bozulur ve malzeme aniden sıvı halini alır. Bu durumda H sistemin entalpisi, S entropisi ve T mutlak sıcaklık olmak üzere Gibbs'in serbest enerji denklemi $G = H - TS$ dikkate alınır, bu denklem erime sıcaklığında,

$$\Delta G_v = \Delta H_r - T_m \Delta S \quad (4.2)$$

şeklinde yazılır, burada ΔH_r ; erime sırasında entalpi (latent ısı) ve ΔS ; erime sırasındaki entropi değişikliğidir. Erime sırasında sistem dengededir, dolayısıyla $G_v = 0$ yapılırsa yukarıdaki denklemden

$$T_m = \Delta H_r / \Delta S \quad (4.3)$$

Olarak bulunur. ΔH_r 'in değeri esasen molekül zincirleri arasındaki bağların kuvvetine, ΔS 'in değeri ise zinciri oluşturan üniteler arasındaki bağlara bağlıdır. ΔS 'in sabit kaldığı düşünülürse, zincirler arası bağlar ne kadar kuvvetli olursa, erime sıcaklığı daha yüksek olur. Diğer taraftan

zincirler arası bağların esasen kristal yapıyı meydana getiren bağlar olduğu dikkate alınır, yüksek erime sıcaklığı, kristalin yapının daha mükemmel olduğunun bir belirtisidir.

Plastik malzemelerin çoğu tam kristalin değil kısmi kristalindir. Dolayısıyla bu malzemeler hem T_g camsı duruma geçiş hem T_m erime sıcaklığına sahiptirler. Camsı halinde bulunan kısmi kristalin bir malzemenin katı-sıvı geçişi F-E-G-A göre yapılır. Kristalinite derecesine bağlı olarak bu eğri tam amorf veya tam kristalin eğrilerine daha yakın olabilir. Burada da T_g sıcaklığı zincir ünitelerinin harekete girmesi ve malzemenin camsı halden lastik hale geçmesi, T_m sıcaklığı da, kristalin yapının bozulması ve sıvı hale geçmesi anlamını taşır.

Plastiklerin camsı hali, rijit ve kristalin olmayan gevrek bir haldir. Ancak plastiğin gevrek özelliği malzeme cinsine ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Bazı plastikler ana camlaşma geçiş sıcaklığının yanı sıra iki veya üç tali camsı duruma geçiş sıcaklığı gösterebilir. Örneğin erime sıcaklığı $T_m = 327^\circ\text{C}$ olan kristalin polietrafluoretilen (PTFE)'in $+127^\circ\text{C}$ 'de olan ana camlaşma sıcaklığının yanı sıra $+30^\circ\text{C}$, -19°C ve -97°C olmak üzere üç tali camsı duruma geçiş sıcakları daha vardır. Aynı şekilde naylon 66'nın 50°C 'de ana camsı duruma geçiş sıcaklığı ve -120°C 'de ikinci bir camsı duruma geçiş sıcaklığı vardır. Bu da göstermektedir ki bu malzemelerde ana camlaşma sıcaklığında zinciri oluşturan tüm ünitelerin tüm hareketlenmeleri durmamıştır ve üniteye bağlı bazı grupların hareketi devam etmektedir, örneğin naylonda yer alan metil gurubunun hareketi -120°C 'de durmaktadır.

Camsı duruma geçiş sıcaklığının değeri, moleküller arası kuvvetlerin, molekül ağırlığının, zincir içinde ünitelerin rijitliğinin ve çapraz bağların büyümesi ile büyür. Plastiklere ilave edilen yumuşatıcılar T_g değerini azaltır. Diğer taraftan camsı duruma geçiş sıcaklığının büyümesi ile kristalinite derecesi azalır. Genellikle, erime sıcaklığına bağlı olarak camsı duruma geçiş sıcaklığı için;

Kristalin plastiklerde : $0,5 T_m < T_g < 0,67 T_m$

Simetrik plastiklerde : $T_g = 0,5 T_m$

Simetrik olmayan plastiklerde : $T_g = 0,67 T_m$

değerleri verilebilir.

Yüksek molekül ağırlığına sahip plastikler camsı halinde lastik sonra sıvı hale geçerler. Düşük molekül ağırlığına sahip olanlar T_g 'nin altında camsı ve T_g 'nin üstünde sıvı halinde bulunurlar. Camsı duruma geçiş sıcaklığını geçtikten sonra plastiğin genleşme faktörü, özgül ısı ve elastiklik modülü bariz bir şekilde değişmektedir. Buna bağlı olarak plastiklerin mekanik davranışını tayin eden elastiklik modülünün değişmesi önem taşımaktadır.

Daha önce belirtildiği gibi yüksek sıcaklıklarda molekül zincirlerini oluşturan üniteler arasında kopmalar meydana gelir ve plastik malzeme yıpranır, buna T_d yıpranma sıcaklığı denir. T_g , T_m ve T_d sıcaklıkları esasen plastiklerin kullanma alanlarını ve teknolojisini tayin etmektedir. Amorf polimerler T_g sıcaklığının altında kullanılırlar, teknolojileri T_g ile T_d sıcaklıkları arasında yapılır, bu sıcaklıklarda kalıplara kolay dökülebilir, lastik gibi yumuşak ve sıvı halinde bulunurlar. Kısmikristalin plastikler, kristalinite derecesine bağlı olarak T_m erime sıcaklığına kadar kullanılabilirler. Ancak T_m ve T_d arasında sıcak olarak ve T_g ve T_m arasında soğuk olarak şekillendirilebilirler[46] .

4.1.8. Plastiklerin Molekül Ağırlığı

Daha önceki açıklamalardan anlaşılacağı üzere zincir uzunluğu ile orantılı olan plastiklerin molekül ağırlığı, malzemenin mekanik özelliklerini ve moleküller arası bağ kuvvetlerini önemli ölçüde etkilemektedir.

Polimerizasyon sırasında polimer zincirleri çeşitli uzunluklarda büyüyerek, farklı molekül ağırlıklarına sahip makro moleküllerin karışımından oluşan bir malzeme meydana getirmektedirler. Belirli bir plastik malzemeyi oluşturan zincirlerin molekül ağırlıklarını dağılımı, polimerizasyon kinetiğine istatistiki analiz yöntemleri uygulanarak tahmin edilebilir. Bu dağılımlardan da malzemenin ortalama molekül ağırlığı elde edilmektedir[46].

4.1.9. Katkılı Plastikler

Pratikte plastikler, saf organik reçine veya bazı özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla başka reçine veya katkı maddeleri ile karıştırılarak kullanılmaktadırlar. Tertipleme yaptıktan sonra oluşan bileşime, çeşitli teknolojilerle istenilen şekil verilmektedir. Plastiklerin özelliklerini değiştirmek için katkı maddesi olarak değişik polimer reçineler, cam veya karbon fiberler(elyaflar), dolgu malzemeleri, yumuşatıcılar, stabilizatörler, yağlayıcı, renk verici, aleve karşı direnç artıran maddeler (flame retardants) ve bağ oluşturan maddeler kullanılmaktadır [43,46].

4.1.10. Takviyeli Plastikler

Plastiklerin çekme, darbe ve ısı mukavemeti, boyut kararlılığı gibi özelliklerini iyileştirmek için, başka malzemelerle takviye edilir. Katkı malzemeleri fiber (elyaf) ve dolgu şeklinde olabilir. Bu iki takviye sistemlerinin arasında kesin bir sınır olmamasına rağmen şu ayırım yapılabilir. Fiber takviye sistemi genellikle plastiklerin yukarıda sıralanan özelliklerini iyileştirmek amacı ile uygulanan pahalı bir sistemdir. Bu nedenle elde edilen iyileştirme, malzemenin fiyat artışını telefi edici seviyede olmalıdır. Dolgu takviye sistemi ise genellikle

plastiklerin maliyetini düşürmek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak mika, kil veya CaCO_3 gibi mineral dolgu maddeleri, oluşan malzemenin ısı iletkenliğini artırır, soğutma sırasında şekil değiştirmeleri azaltır ve kalıplama zamanını düşürür. Bununla beraber genellikle dolgu malzemeleri, oluşan malzemenin mekanik özelliklerini bilhassa çekme mukavemetini azaltır. Bu azalma dolgu miktarının artması ile hızlanır. Bu nedenle plastiklerin mukavemet özelliklerini arttırmak için kuvvetlendirici de denilen fiber (elyaf) takviye sistemi kullanılmalıdır.

Kuvvetlendirici (fiber) ile dolgu sistemleri arasındaki ikinci fark, takviye malzemesinin cinsine ve yapısına bağlıdır. Kuvvetlendirici olarak genellikle fiber şeklinde cam karbon ve aramid gibi bileşikler kullanılmaktadır. Dolgu malzemeleri ise lifli olan asbest, kağıt ve lifli olmayan mika, tal, kil, silikatlar, CaCO_3 gibi bileşiklerdir. Dolgu malzemesinin iyi sonuç vermesi için mutlaka reçine içinde homojen olarak dağılması gerekir. Bu da bu malzemelerin tane büyüklüğünün çok küçük olmasına bağlıdır.

Fiberlerin kuvvetlendirici olarak kullanılmasında aşağıdaki üç faktörün dikkate alınması gerekir:

- 1-Fiberin matris tarafından iyi ıslanma kabiliyeti.
- 2-Matris ile fiberin temas yüzeyinde kimyasal reaksiyonun olmaması.
- 3-Elyafın iyi yüzey karakteristiklerine sahip olması.

Eğer fiber ana reçine (matriks) tarafından ıslatılmazsa, temas yüzeylerinde boşluklar oluşur; bu da temas yüzeyindeki bağları zayıflatır. Islatma yeteneğini iyileştirmek için fiberler uygun bir malzemeden yapılan ince bir film ile kaplanır. Kaplamaların kimyasal bakımdan kararlı olması ve matris ile reaksiyona girmemesi gerekir. Cam fiber belirli bir reçine ile kaplanır. Karbon fiber kaplanmaz, burada matris ile fiber arasındaki bağ karbon fiberin yüzey özelliğine bağlı olarak mekanik niteliğini taşır. Bu mekanik bağ fiber ile matrisin ısıl genleşme katsayıları arasındaki farklara da bağlıdır. Genellikle takviye edilmiş plastiklere takviye edilmemiş plastiklerin teknolojisi uygulanır[46].

4.2. Plastik Çeşitleri

Plastiklerin kullanımları sırasında gösterdiği özelliklerine göre incelenecek olursa bunları üç ana grupta toplamak mümkündür.

- 1- Elastomerler
- 2- Termoplastikler
- 3- Termosetler

4.2.1.Elastomerler

Üç boyutlu şebeke yapısı oluşturarak yüksek esneklik gösteren polimerlerden meydana gelirler[40].

4.2.2.Termoplastikler

Plastikler esnektir, yani kolayca şekillendirilebilir ve kalıplanabilir. Ayrıca ısıtıldıkça kolay şekillendirilebilir. Yeterli ısıya ulaştıklarında ise erirler. Bunlara termoplastikler denir. Bu isim termoplastikleri, termosetlerden (çarpraz bağlanma ile oluşmuş, erimeyen malzemelerden) ayırmaya yardımcı olacaktır.

Plastiği plastik yapan elastikiyettir. Kauçuk sündürülebilir, tekrar eski haline dönebilir. Plastik malzeme de güçlü bir şekilde sündürülebilir. Bu durumda plastik malzeme ya kalıcı olarak deforme olur yada düz kalır. Ancak bu kötü bir özellik değildir. Plastikler sündürüldüklerinde lastik gibi davranmasalar da onları sündürmek ilk etapta oldukça fazla enerji gerektirir. Bu durumda, plastiklerin deformasyona karşı kauçuklardan daha dayanıklı olduğu söylenebilir. Eğer malzemenin sünmesini istemiyorsak, kuşkusuz bu iyi bir özelliktir.

Plastiği sündürmek için çok fazla enerjiye ihtiyaç vardır. Bu da onu deformasyona karşı dayanıklı yapar. Eğer plastik yeterince güçlü çekilirse sadece sündürmez, sündürmenin bırakıldığı andaki şeklinde kalmasına da sebep olunur. Kauçuklar bırakıldığında eski hallerine geri dönerler. Plastikler diğer bazı malzemelerden çok daha esnektir, fiberler gibi. Fiberler çekme uygulandığında çok az sünerler. Bu özellik onların halat gibi malzemelerin yapımı için uygun olmasına olanak sağlar [43].

Termoplastik malzemelerin sekiz önemli çeşidi vardır. Bunlar ABS, Acetals, Acrylics, Sellulosics, Fluorocarbons, Polyamids, Polycarbonates, Polyethylenes, Polystyrenes ve Vinyls'dir. Bu termoplastiklerin bazı önemli özellikleri ve tipik uygulamaları aşağıda verilmiştir.

ABS

Maliyet/Fiyat : Orta

Özgül ağırlık : 1,04

Avantajlar : İyi dayanıklılık, mukavemet ve tokluk. İyi hava direnci, orta elektriksel yalıtım özelliği , termik değişmelere iyi direnç gösterme.

Sınırlamalar : Çabuk yanarlar ve kolay tutuşurlar,bir çok organik çözücüde çözülebilirler.

Uygulama : Buzdolabı kapı kaplama maddesi veya astar.

Acetal(Asetal)

Maliyet/Fiyat :Orta

Özgöl yoğunluk : 1,4
Avantajlar : Yüksek mukavemet ve dayanıklılık, yüksek yorgunluk ömrü, boyutsal kararlılık ve düşük sürtünme katsayısı.
Sınırlamalar : Kötü hava ve radyasyon direnci, düşük yanma direnci.
Uygulama : Yatak/mil yatağı, dişli çark, boru ve bina tesisatında kullanılan parçalar , karbüratörler.

Acrylics(Akrilik)

Maliyet/Fiyat :Orta
Özgöl yoğunluk : 1,1 – 1,2
Avantajlar :Mükemmel ışık iletme, aşınma direnci, düşük su emme ve soğurma ve orta mukavemet.
Sınırlamalar : Genelde düşük mukavemet özellikleri, düşük aşınma direnci, düşük ısı yumuşama sıcaklık derecesi.
Uygulama :Lensler/mercekler/gözlük camı, açık hava işaret levhaları, metalik dekoratif parçalar ve uçak pencereleri.

Cellulosics (Selüloz)

Maliyet/Fiyat :Orta
Özgöl ağırlık : 1,1 – 1,3
Avantajlar : Çok iyi mukavemet, iyi optik özellikleri ve hava direnci, ateş/alev direnci, iyi şekil verilebilirlik.
Sınırlamalar : Oldukça düşük dayanıklılık
Uygulama : Paketleme ve fotoğrafçılık için film, oyuncak, TV tüp koruyucusu açık hava işaret levhaları

Flourocarbons(Fluorokarbonlar)

Maliyet/Fiyat :çok yüksek (pahalı)
Özgöl ağırlık : 2,1-2,2
Avantajlar : Son derece hareketsiz kimyasallık, yüksek sıcaklık derecesinde olağanüstü derecede kararlılık, dayanıklılık, düşük sürtünme katsayısı ve iyi dielektrik özellikler.
Sınırlamalar : Maliyet/Fiyat, düşük mekanik özellikler, sinterlemeyle üretilme teknikleri ve ön şekillendirme.
Uygulama : Yatak/mil yatağı, korozyon dirençli boru ve inşaat malzemeleri ve yüksek sıcaklık dereceli elektronik parçalar.

Plyamids (Poliamidler)

Maliyet/Fiyat :Yüksek

Özgöl ağırlık : 1,0- 1,5

Avantajlar :Yüksek mukavemet ve sertlik ve iyi tokluk ve yüksek aşındırma direnci.

Sınırlamalar : Su dahil polar sıvıları içine çeker/emer, bazı güçlü organik asit ve çok güçlü inorganik asitlere çok duyarlıdır.

Uygulama : Dişli çark, çekiç başı, boru ve yakıt (motorin) tankı.

Polycarbonates(Polikarbonat)

Maliyet/Fiyat : Orta

Özgöl ağırlık : 1,2

Avantajlar : Yüksek mukavemet(dayanıklılık), iyi boyutsal kararlılık, yumuşaklık(çekilip uzayabilme) ve gevreklik, mükemmel elektriksel yalıtım izolasyonu, saydamlık, düşük su soğurma.

Sınırlamalar : Organik çözücüler ile tesir eder, kimyasal mukavemet direnç kabiliyeti iyi değildir.

Polyethylenes(Polietilenler)

Maliyet/Fiyat : Düşük

Özgöl ağırlık : 0,92-0,96

Avantajlar : Mükemmel kimyasal direnç kabiliyeti ve elektriksel yalıtım izolasyonu özelliği, dayanıklılık ve oldukça düşük sürtünme katsayısı.

Sınırlamalar : Düşük mukavemet, düşük rijitlik (sertlik, ultraviyole ışınlarına ve hava tesiriyle meydana gelen değişikliklere karşı düşük direnç ve kolay tutuşup çabuk yanma.

Uygulama : Eğilebilir(esnek) şişeler, tank (birikimlik), tekne, boru, paketlenme ve ambalajlama, inşaat yapı ve endüstrisi için levha.

Polypropylenes (Polipropilenler)

Maliyet/Fiyat : Düşük

Özgöl ağırlık : 0,91

Avantajlar : İyi dengelenmiş özellikler, önemsiz derecede su absorpsiyonu, mükemmel aşırı yorulma mukavemeti ve elektriksel yalıtım izolasyonu.

Sınırlamalar : Düşük sıcaklık derecesinde kolay kırılabilirlik, kolay tutuşma ve çabuk yanma, ultraviyole ışınlarına ve hava tesirleri nedeniyle meydana gelen değişikliklere karşı düşük direnç.

Uygulama : Radyo ve TV kabinleri, boru, paketlenme ve ambalajlama.

Polystyrenes (Pilistirenler)

Maliyet/Fiyat : Düşük

Özgöl ağırlık : 1,1

Avantajlar : Mükemmel elektriksel özellikler, iyi boyutsal ve termik kararlılık (istikrar) ev içinde yapılan aydınlatma sistemleri için iyi optiksel özellikler, düşük maliyet.

Sınırlamalar : Ultraviyole ışınlarına maruz kalmaları vasıtasıyla kaliteleri düşer ve birçok organik çözücüye karşı dirençleri düşüktür.

Uygulama : Radyo kabinleri, aygıt (cihaz) parçaları, oyuncaklar, iç mekanlarda kullanılan aydınlatma panoları.

Vinyls(Viniller)

Maliyet/Fiyat : Düşük

Özgül ağırlık : 1,35-2,00

Avantajlar : Mükemmel kimyasal ve hava direnci, iyi elektriksel özellikler, aşınma direnci, sönüm kapasitesi ve ses soğurma

Sınırlamalar : Isı düşüşüne karşı hassaslık, tekrar elde etme çentikten daha iyi değildir.

Uygulama : Elektrik kablosu izolasyon maddesi, yer karosu, boru ve yapıştırıcı/yapışkan[43].

Molekül yapısı olarak yan zincirler ve gruplar ihtiva ederler. Moleküller elastomerlerde ve termosetlerde olduğu gibi üç boyutlu bir yapı teşkil etmezler. Moleküller arasında zayıf van der Waals bağları vardır. Bu sebeple rijit bir yapıya sahip değildirler. Isı altında yumuşarlar, bu özelliklerinde yararlanılarak ısıtılmak sureti ile şekillendirilirler. Bu şekil değişikliği sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Tekrar tekrar ısıtılarak yeni şekiller alabilirler. Piyasada toz ve granül şeklinde bulunurlar. Kompozit malzeme imalatında azda olsa kullanılırlar[40].

a) Asetol Reçineler	Şaft yatağı
b) Akriklikler (Polimetil metakrilat)	Işıklı reklamlarda
c) Selülozik (selüloz asetat)	Selofon kağıdı
d) Florokarbon (Polutetro Floretoilen)	Teflon tava
e) İzosiyanatlar (Poliüretan)	Isı İzolasyonu
f) Poliamitler (Naylon)	İp imalinde ,çorap,çamaşır
g) Poliolefinler (polietilen-Polipropilen)	Naylon torba –Meşrubat kasası
h) Stiren (Polistren)	Okul gereçleri,yoğurt kabı
i) Vinil (Poli vinil klorür.PV.C)	Boru
j) Polikarbonat	Trafik ışıkları

4.2.3.Termosetler

Molekül yapıları ; polimerizasyon sırasında molekülün reaktif olan kısmı moleküller arasındaki zincir yapıyı teşkil eder. Moleküller üç boyutlu şebeke yapısı teşkil edecek tarzda

birbirine bağı bir rijit yapı ihtiva ederler. Bu bağlama esnasında meydana gelen olay tek yönlü kimyasal bir reaksiyondur. Plastik malzeme şekil aldıktan sonra sertleşir ve malzeme artık yumuşayıp şekil değiştiremez.

- | | |
|--|-----------------------------------|
| a) Amino reçineler (Melamin Formaldehit) | :Tabak boya |
| b) Alkitler | :Boya |
| c) Epoksi | :Reçineler Uçakların iç donatımı |
| d) Furan | :Reçineler Koruyucu metal kaplama |
| e) Fenolik Reçineler | :Elektrik aksamı |
| f) Slikonlar | :Oto cilası |
| g) Poliyesterler | |

1- Cila tipi

2- Döküm tipi

3- Cam takviyeli plastik tipi

Takviyeli plastik (kompozit) malzemelerde kullanılan matriks malzeme (tali faz) herhangi bir plastik malzeme olabilir. Şu veya bu malzemenin kullanılıp kullanılmaması malzemeyi dizayn eden kişinin hayal ve bilgisinin neticesi olarak ortaya çıkar. Plastik malzemeler genel olarak reçineler diye anılırlar. Kompozit malzeme imalinde en çok kullanılan reçineler termosetlerdir. Ekonomik, verimli ve gelişmiş mekanik özellikleri olan parçalar, termoset plastikler kullanılarak kolaylıkla yapılabilirler. Günümüzde deniz araçlarının yapımında, otomotiv sanayinde, inşaat sektöründe, depo, tank boru ve mobilya yapımında ekonomik olduğundan ve aranan özellikleri sağladığından büyük ölçüde kullanılan, arzu edilen güncel malzeme haline gelmişlerdir[40].

Aşağıdaki tablodan termoplastik ve termoset matriksli kompozitlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4.1 Termoplastik ve termoset matriksli kompozitlerin karşılaştırılması [47] .

Özellik	Kompozit ^a	
	Termoset	Termoplastik
Fiat	+	
Sıcaklık toleransı	+	
Termal genleşme	+	
Hacimsel büzülme	+	
Rijitlik	+	
Dayanım	+	
Tokluk		+
Yorulma ömrü	+	
Sürünme	+	
Kimyasal direnç		+
Malzeme veri elde edilebilirliği	+	
Hammadde depolama zamanı		+

<u>Özellik</u>	<u>Kompozit^a</u>	
	<u>Termoset</u>	<u>Termoplastik</u>
Kimyasal saflık		+
Vizkozite	+	
Sıcaklık prosesi	+	
Basınç prosesi	+	
Zaman prosesi		+
Çevre prosesi		+
Kalıp ihtiyacı	+	
Yeniden şekillendirilebilirlik		+
Dönüştürülebilirlik		+

a: Kompozitin avantajlı olduğu durumu göstermektedir.



5. ANİZOTROPİK MALZEMELERDE GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME BAĞINTILARI

Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlayan Hooke Kanunu kısaltılmış notasyonlarla,

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (5.1)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte;

σ_i = Gerilme bileşeni

ε_j = Deformasyon bileşeni

C_{ij} = Rijitlik matrisi

Bu eşitlik matris formunda gösterilebilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{34} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j$ matrisinde 36 elastik sabit vardır. Ancak matrisin ,

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (5.3)$$

Simetrik özelliği nedeniyle bağımsız elastik sabitlerin sayısı 21 dir. (5.2) eşitliği malzeme özelliklerinin simetri gösterebileceği hiçbir simetri düzlemi içermeyen anizotropik malzemelerdeki gerilme-deformasyon ilişkisini tanımlar. Hiçbir simetri düzlemine sahip olmayan bu tür malzemeler “triklinik malzeme” olarak da bilinirler.

Gerilme-deformasyon bağıntısının tersi kompiyans matrisi S_{ij} ile ifade edilir ve deformasyon-gerilme ilişkisini verir.

$$\varepsilon_j = S_{ij} \sigma_i \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (5.4)$$

S_{ij} matrisi de C_{ij} gibi simetrik özellik gösterir ve 21 bağımsız sabit içerir.

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (5.5)$$

Buna göre , simetri düzlemine sahip olmayan triklinik malzemelerin deformasyon- gerilme ilişkileri matris formunda ,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.6)$$

şeklinde gösterilebilir. Malzemeye gelen gerilmeler bilindiğinde, oluşacak deformasyonlar (5.6) bağıntısından bulunabilir.

Malzemenin, özelliklerinin simetri gösterdiği bir simetri düzlemi mevcut ise, rijitlik ve kompliyons matrisleri 13 bağımsız elastik sabit içerirler. Bu tür malzemeler “ monoklinik malzeme” olarak adlandırılırlar. Monoklinik malzemelerin gerilme-deformasyon ve deformasyon –gerilme ilişkileri 5.7 ve 5.8 bağıntılarından belirlenebilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.8)$$

Bir malzemenin birbirine dik üç simetri düzlemi varsa, bu düzlemlerin arakesitlerine paralel koordinatlardaki gerilme-deformasyon ve deformasyon – gerilme ilişkileri,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.10)$$

Bu tür özellik gösteren malzemeler “ orthotropik malzeme” adını alırlar ve 9 bağımsız elastik sabit 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 $\tau_{12}, \tau_{31}, \tau_{23}$ kayma gerilmeleri ile $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ normal deformasyonları arasında bir etkileşim yoktur. Tek yönlü fiber kompozitler orthotropik karakterde olduğundan bundan sonraki bölümlerde bu tür malzemelerin mekaniksel davranışları incelenecektir.

Özelliklerinin simetri gösterdiği sonsuz sayıda düzlem içeren malzemeler “ izotropik malzeme” adını alırlar. İzotropik malzemelerin gerilme- deformasyon ve deformasyon- gerilme bağıntıları 5.11 ve 5.12 eşitlikleri ile matris formunda gösterilebilir [37].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0(C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0(C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0(C_{11} - C_{12})/2 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.11)$$

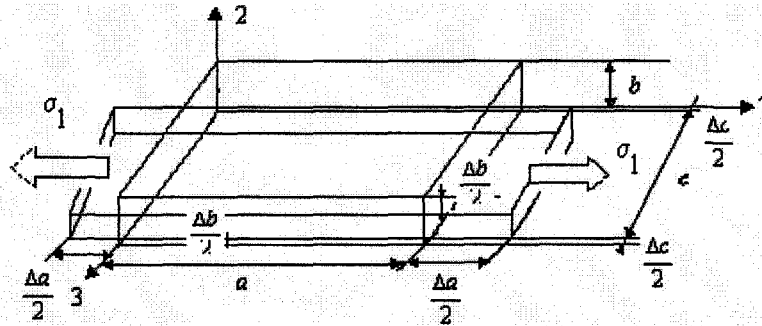
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \lambda_{23} \\ \lambda_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.12)$$

5.1.Orthotropik Malzemelerde Gerilme-Şekil Değişirme Bağlıları

- Mühendislik Sabitleri

Malzemenin kayma modülü olan 'G', elastisite (Young) modülü 'E' ve poisson oranı 'v' genel olarak malzemenin mühendislik sabitleri olarak adlandırılır. Bu sabitler ,tek eksenli gerilme veya tam kayma testleri gibi basit ve yalın deneylerle ölçülebilir. Böylece rijitlik matrisi ve elastik matrisi elemanları matematiksel olarak elde edildikleri değerlerden kurtulup daha açık ve fiziksel anlam ifade eden mühendislik sabitleri ile ifade edebilme imkanına sahip olurlar.

Ortotropik elastik malzemede mühendislik sabitlerinin bulunabilmesi için; bilinen bir yük veya gerilme yardımı ile gerçekleştirilen basit çekme ve kayma deneyleri yapılır. Yapılan deneylerin sonuçları değerlendirildiğinde malzemenin 'E' Elastik modülü ile 'G' kayma modülü tespit edilir. Ayrıca deney sonuçları 'S_{ij}' elastiklik matrisinin ve 'C_{ij}' rijitlik matrisinin elemanlarının E ve G'ler cinsinden tanımlanmasını sağlar. Herhangi bir elastik cisme x₁ eksenı doğrultusunda σ₁ çekme gerilmesi uygulandığında malzeme gerilmenin uygulandığı eksende kendi elastisite modülüne (E) bağlı olarak bir miktar uzar. Bu uzama esnasında malzemenin hacmi değişmeyeceğine göre x₂ ve x₃ eksenleri boyunca olan malzemenin boyutları bir miktar kısalır. (Şekil 5.1) [40].



Şekil 5.1 Çekme gerilmesi uygulanan elastik bir cisimde meydana gelen şekil değişiklikleri

$$a.b.c = V$$

$$(a + \Delta a)(b - \Delta b)(c - \Delta c) = V$$

$$\sigma = [\sigma_{ij}] = \begin{pmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_{12}\varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{13}\varepsilon_1 \end{pmatrix}$$

E_1 i yönündeki Elastisite (Young) Modülü olmak üzere

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \quad (5.14)$$

$$S_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_1}$$

Elastik cisim sadece x_2 eksenini doğrultusunda çekildiğinde

$$S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad (5.15)$$

$$S_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_2}$$

Daha sonra cisme sadece x_3 eksenini doğrultusunda çekme gerilmesi uygulandığında

$$S_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_3}$$

$$S_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (5.16)$$

$$S_{33} = \frac{1}{E_3}$$

elemanlar mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilmiş olunur. $S_{ij} = S_{ji}$ olduğundan

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad (i,j=1,2,3) \quad (5.17)$$

Ortotropik bir malzeme için rijitlik matrisi elemanları ise mühendislik sabitleri cinsinden yazılırsa ;

$$\begin{aligned}
C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \\
C_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \\
C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_3 \Delta} \\
C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \\
C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta} \\
C_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \\
C_{44} &= G_{23} \\
C_{55} &= G_{31} \\
C_{66} &= G_{12} \\
\Delta &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{33} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}
\end{aligned} \tag{5.20}$$

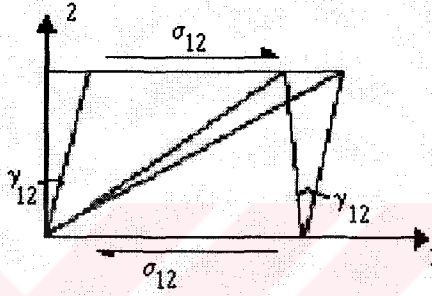
Yukarıda bahsedilen elastik malzemenin fiziksel sabitleri , bilindiği gibi $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ eksenleri doğrultusundaki young (elastisite) modülleri G_{12}, G_{13}, G_{23} ise ; 1-2, 1-3 ve 2-3 düzlemlerindeki kayma modüllerini belirtmekte idi. ‘ ν_{ij} ’ poisson oranı ise elastik malzemenin j doğrultusunda şekil değiştirmenin i doğrultusundaki şekil değiştirmeye oranıdır. Elastik malzeme herhangi bir σ_i çekme gerilmesi altında i eksenini boyunca ε_i kadar şekil değiştirdiğinden j eksenini doğrultusunda da ε_j kadar (daralmaya) şekil değiştirmeye maruz kalır. Bu şekil değiştirmelerin birbirlerine olan oranları poisson oranıdır[40].

$$\begin{aligned}
\nu_{ij} &= -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \\
\nu_{12} &= -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \\
\nu_{13} &= -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \\
\nu_{23} &= -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}
\end{aligned} \tag{5.21}$$

şeklinde gösterilebilir.

eşitliği yazılabilir. Benzer bir düşünce tarzı ile elastik cisme sadece kayma gerilmeleri tatbik edelim. G_{ij}, x_i, x_j düzlemindeki kayma modülü olmak üzere Şekil 5.2' de görüldüğü gibidir.

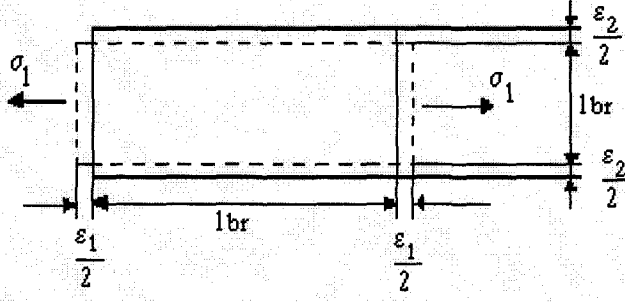
$$\begin{aligned}
 S_{12} &= S_{66} \sigma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}} \\
 S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{21}} \\
 S_{44} &= \frac{1}{G_{23}} \\
 S_{55} &= \frac{1}{G_{13}}
 \end{aligned} \tag{5.18}$$



Şekil 5.2 Elastik bir cisimde kayma gerilmesi etkisi.

(5.15)'ten (5.18)'E kadar olan denklemlerde açıkça görüleceği gibi anizotropik malzemelerde dokuz bağımsız matematiksel ifadeye sahip olan rijitlik ve elastiklik matrisleri $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ olmak üzere 9 fiziksel (teknik) sabitle ifade edilir.

$$|S_{ij}| = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \tag{5.19}$$



Şekil 5.3 Poisson oranının tespiti

İzotropik bir malzemede x_1, x_2 düzlemine göre simetrisinin mevcut olması halinde, fiziksel sabitler

$$E_1 = E_2 = E_3$$

$$G_{12} = G_{23} = G_{13}$$

$$\nu_{12} = \nu_{21}, \nu_{13} = \nu_{31}, \nu_{23} = \nu_{32}$$

$$G_{12} = \frac{E_1}{2(1 + \nu_{12})}$$

yazıldığında mühendislik sabitleri yalnızca elastisite modülleri ve poisson oranları cinsinden olmak üzere beş bağımsız sabitler ifade edilir. Rijitlik(katılık) matrisinin elemanları Q_{ij} aşağıdaki gibi bulunur.

$$Q_{ij} = C_{ij}$$

$$Q_{ii} = \frac{C_{ii}}{2} \quad (i,j=1,2,6), (i=4,5) \quad (5.22)$$

$$Q_{66} = \frac{C_{66}}{2} - \frac{C_{36}}{2C_{33}}$$

5.2.Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme

Herhangi bir elastik malzeme için düzlem gerilme halini ifade etmek için üç eksenli gerilme hali ile ilgili tanımlarda ve denklemlerde üçüncü düzlemle ilgili gerilmelerin sıfır alınması gerekli ve yeterlidir.

$$\sigma_3 = 0 \quad \tau_{23} = 0 \quad \tau_{31} = 0$$

Ortotropik malzemelerde şekil değiştirmeler aşağıdaki ifadeden yazılırsa

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3$$

denklemini düzlem gerilme hali için

$$\begin{aligned}
\gamma_{12} &= \varepsilon_6 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \\
\gamma_{23} &= \varepsilon_4 = S_{44}\sigma_4 + S_{44}\tau_{23} = 0 \\
\gamma_{13} &= \varepsilon_5 = S_{55}\sigma_5 + S_{55}\tau_{13} = 0
\end{aligned} \tag{5.23}$$

Böylece ortotropik kompozit malzemelerde düzlem gerilme hali için şekil değiştirme gerilme bağıntısı şöyledir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \tag{5.24}$$

(5.24) denkleminde elastik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilmek istendiğinde;

$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\
S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\
S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\
S_{66} &= \frac{1}{G_{12}}
\end{aligned} \tag{5.25}$$

(5.25) eşitliklerinde de açıkça görüldüğü gibi malzemeye bağlı dört tane bağımsız değişkenle şekil değiştirme - gerilme bağıntıları tanımlanabilmektedir. Şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade etmek yerine gerilmeleri şekil değiştirmeler cinsinden Q_{ij} matrisi ile ifade etmek birçok kolaylıklar sağlayacağı için iki eksenli gerilme haline ait gerilme şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \tag{5.26}$$

Burada rijitlik matrisinin elemanları elastiklik matrisinin elemanları cinsinden

$$\begin{aligned}
\sigma_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\
\sigma_{12} &= \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\
\sigma_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}
\end{aligned} \tag{5.27}$$

$$\sigma_{66} = \frac{1}{S_{66}}$$

veya aynı elemanlar mühendislik sabitleri cinsinden

$$\sigma_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$\sigma_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$\sigma_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$\sigma_{66} = G_{12}$$

(5.28)

şeklinde yazılırlar.

Rijitlik matrisi elemanları ortotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için dört bağımsız mühendislik sabiti ile ifade edilebilir.

İzotropik malzemelerde, düzlem gerilme hali için şekil değiştirme- gerilme bağıntıları,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.29)$$

şeklinde yazılabilir. Burada elemanlar (5.14)denklemlerinde belirtildiği gibi

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$$

dir. Gerilme şekil değiştirme bağıntıları ise

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.30)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki elemanlarda (5.14) ve (5.28) denklemlerinden yararlanılarak elde edilebilir.

$$E_1 = E_2 = E$$

$$G_{12} = G$$

$$Q_{11} = \frac{E}{1 - \nu^2}, Q_{12} = \frac{\nu E}{1 - \nu^2}$$

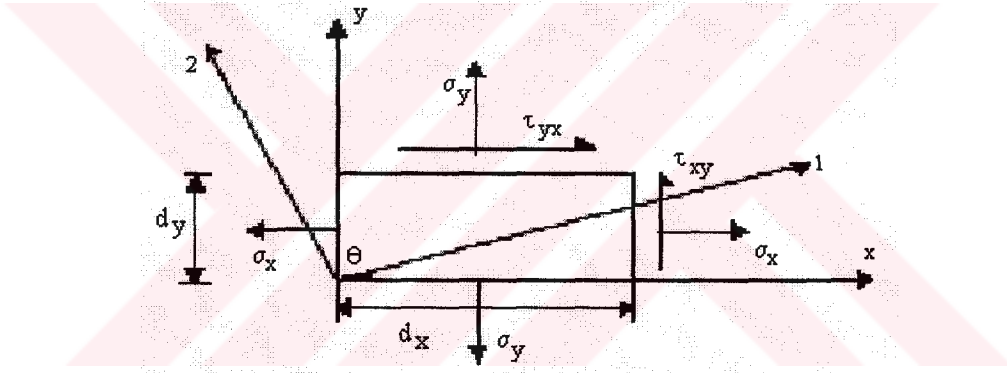
$$Q_{66} = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

(5.31)

5.3. Keyfi Takviyeli Kompozit İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıkları

Daha önceki bölümlerde ortotropik malzemenin asal malzeme ekseninde gerilme hali için gerilme-şekil değiştirmeleri tarif edildi. Bu hal özel bir durum olup, genelde malzeme asal eksen doğrultularından farklı eksenlerde, doğrultularda gerilmelere maruz kalır. Bu eksenler asal gerilme eksenlerinden (θ) açısı kadar dönmüş olan doğrultularda olabilirler.

Asal malzeme doğrultuları 1 ve 2 eksenleri ile tanımlanan ortotropik kompozit malzemenin üzerine uygulamakta olan gerilmeler (θ) kadar farklı olan x,y eksenleri doğrultusunda olduğunda, malzemenin elementer mekanığından yararlanarak, transformasyon denklemlerinin yazılması gerekir. Daha önce $[t]$ transformasyon matrisi tanımlanmış ve bu matris ile simetrik doğrultulardaki gerilmeler ve bunlara bağlı olarak da diğer matris elemanlarının değişimi incelenmiş idi şimdi ise oradakinden farklı olarak eksenleri 180° yerine rastgele bir (θ) açısı kadar incelenecektir.



Şekil 5.4 Keyfi takviyeli kompozit için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Şekilde de görüldüğü gibi x-y düzlemi içinde kenarları dx, dy ve kalınlığı çok küçük bir değer olan h' ye eşit bir plak ele alındığında, bu plakta gerilmelerin en büyük elastisite modülünün bulunduğu 1 eksenine transform edilmesi için gerilmeler cinsinden denge denklemleri yazılır.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} (2 \sin \theta \cos \theta) \\ \tau_{12} &= -\sigma_x (\sin \theta \cos \theta) + \sigma_y (\sin \theta \cos \theta) + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \\ \sigma_2 &= \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_x \sin^2 \theta - 2\tau_{xy} (\sin \theta \cos \theta)\end{aligned}\tag{5.32}$$

Bu denklemlerden faydalanarak $[T]$ transform matrisi

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (5.33)$$

(5.33) 'de görüldüğü gibi verilebilir. Gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin transformu bu $[T]$ matrisinin yardımı ile aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{pmatrix} \quad (5.34)$$

Burada T transformasyon matrisi ve yapılan transformasyon denklemi dikkatle incelendiğinde işlemin malzeme özellikleri ile hiçbir ilişkinin bulunmadığı sadece gerilmelerin dönmesi ile ilişkili olup, gerilme eksenleri arasındaki θ açısına bağlı olarak ifade edilebildiği açıkça görülebilir. 1 ve 2 eksenleri malzemenin asal doğrultu eksenlerini x,y eksenleri de gerçekte uygulanan gerilmelerin bulunduğu eksenleri işaret ettiğinde malzemeye ait asal gerilme değerleri cinsinden x,y eksenini doğrultusundaki gerilmeleri bulabilmek için transformasyon şöyle tanımlanır.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{pmatrix} \quad (5.35)$$

(-1) matrisin tersini ifade etmektedir ve bu ters matris aşağıdaki gibi yazılır:

$$[T]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (5.36)$$

$$[R] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (5.37)$$

Şeklinde bir matris işleme sokulursa, şekil değiştirme bileşenleri vektörü daha basit bir hale dönüştür. Bu taktirde γ_{xy} 'deki $\frac{1}{2}$ çarpanı ortadan kalkar.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = [R] \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = [R] \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{pmatrix} \quad (5.38)$$

1,2 ve x,y eksenlerinin birbirleri ile çakışır durumda bulunması halinde (5.35) denklemindeki $[T]^{-1}$ denklemi ile de şekil değiştirmeler cinsinden ifadesi yazılır.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

Bu denklemlerin çakışmaması durumunda genel ifade aşağıdaki işlem basamakları ile şöyle bulunur.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [Q] \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{pmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{pmatrix}$$

$$= [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Bu işlem zinciri içerisindeki $[R][T][R]^{-1}$ ifadesi $[T]$ matrisinin transpozesi olarak gösterilebilir.

$$[R][T][R]^{-1} = [T]^T$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

$[T]^{-1} [Q] [T]^T = [\bar{Q}]$ matrisi ile gösterilir ve böylece

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_{11} & \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{16} \\ \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{22} & \bar{\sigma}_{26} \\ \bar{\sigma}_{16} & \bar{\sigma}_{26} & \bar{\sigma}_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{11} &= \sigma_{11} \cos^4 \theta + 2(\sigma_{12} + 2\sigma_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \sigma_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{\sigma}_{12} &= (\sigma_{11} + \sigma_{22} - 4\sigma_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \sigma_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{\sigma}_{22} &= \sigma_{11} \sin^4 \theta + 2(\sigma_{12} + 2\sigma_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \sigma_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{\sigma}_{16} &= (\sigma_{11} - \sigma_{12} - 2\sigma_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (\sigma_{12} - \sigma_{22} + 2\sigma_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{\sigma}_{26} &= (\sigma_{11} - \sigma_{12} - 2\sigma_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (\sigma_{12} - \sigma_{22} + 2\sigma_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{\sigma}_{66} &= (\sigma_{11} + \sigma_{12} - 2\sigma_{12} - 2\sigma_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \sigma_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (5.40)$$

Burada çizgi (-) işaret , yani $\bar{Q}_{ij}$, indirgenmiş Q_{ij} rijitlik matrisi yerine ve transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir.

Şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade edebilmek için indirgenmiş Q_{ij} matrisine benzer tarzda indirgenmiş S_{ij} matrisi tanımlamak gerekir. (5.25) bağıntısı başlangıç olarak alınıp;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^T [S] [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.41)$$

ifadesi basamak basamak yapılacak işlemle bulunur.

$$[R][T]^{-1}[R]^{-1} = [T]^T$$

$$[T]^T [S] [T] = [\bar{S}]$$

olarak alınır ve S_{ij} matris elemanları ;

$$\begin{aligned} \bar{S}_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{S}_{12} &= S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \bar{S}_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{S}_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{S}_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{S}_{66} &= 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (5.42)$$

Burada bilindiği gibi (5.25)

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \text{ ' dir.}$$

5.4.Ortotropik Takviyenin Mukavemeti

5.4.1 Asal Malzeme Doğrultularında Malzemenin Mukavemeti

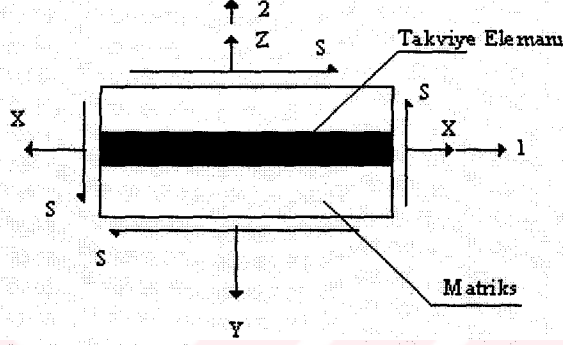
Ortotropik malzemelerin veya ortotropi hali teşekkül edecek tarzda takviye edilmiş olan malzemelerin mukavemetini hesaplamak için ilk adım asal malzeme doğrultularında müsaade edilebilir gerilmelerin veya mukavemet değerlerinin bulunmasıdır. Bu bilgiler ortotropik takviyenin mukavemetinin incelenmesinde temel teşkil eder.

Kendi bulunduğu düzlemde iki eksenli gerilmeye maruz bir ortotropik malzemede eğer malzemenin çekme ve basma mukavemetleri eşit değerlere sahip ise üç çeşit temel mukavemet değeri vardır.

$X \rightarrow (\sigma_1)_{\max}$ Eksenel Mukavemet

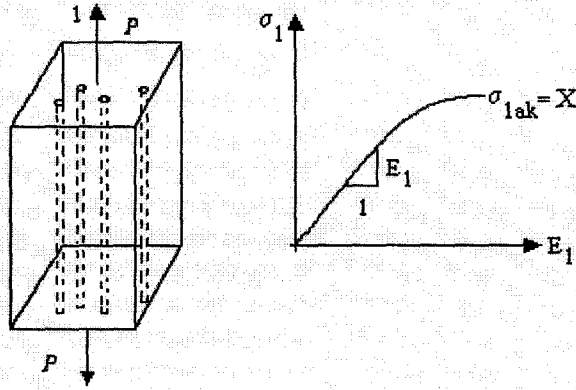
$Y \rightarrow (\sigma_2)_{\max}$ Transvörs Mukavemet (Eksene dik)

$S \rightarrow (\tau_{12})_{\max}$ Kayma Mukavemeti

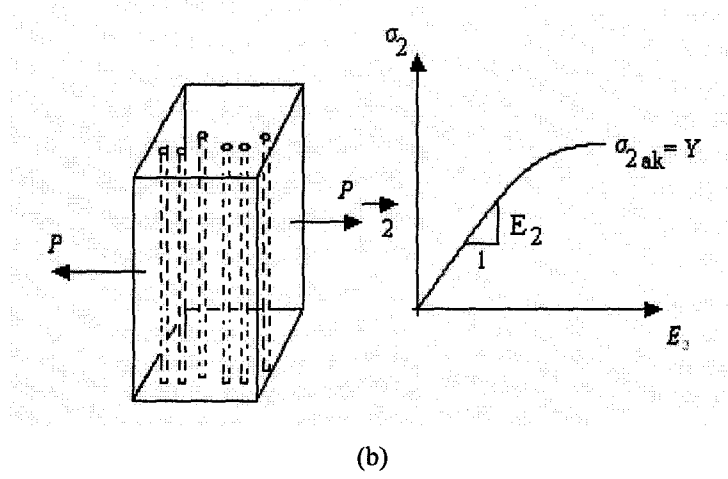


Şekil 5.5 Takviyeli Kompozitin Mukavemet çeşitleri

Bu gerilmelere karşı gelen malzemenin mukavemet değerleri $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ olsun. İzotropik malzemelerde sonsuz sayıda simetri eksenini bulunmasının neticesi olarak $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ oryantasyonundan bağımsızdır. Fakat ortotropik malzemelerde oryantasyonun sonucu olarak çekme doğrultusunun asal malzeme eksenleri ile yaptığı açığa bağlı olarak $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ gibi değişken değerler elde edilir. Bunu daha anlaşılır bir tarzda izah etmek üzere Şekil 5.6 'da görüldüğü gibi kesit alanı A kadar olan bir çekme çubuğu alalım ve buna P kadar bir kuvveti önce 1 eksenini daha sonrada 2 eksenini istikametinde tatbik edelim ve bu P kuvvetini deney parçası akma sınırına gelene kadar yavaş yavaş artıralım.



(a)



Şekil 5.6 (a) Fiber eksenine paralel doğrultuda yükleme
(b) Fiber eksenine dük doğrultuda yükleme

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{A}$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

$$(\sigma_1)_{ak} = X = \frac{(p_1)_{ak}}{A}$$

$$\sigma_2 = \frac{P_2}{A}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

$$(\sigma_2)_{ak} = Y = \frac{(P_2)_{ak}}{A}$$

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$$

dır.

X ve Y değerleri, her malzemeden alınacak deney parçaları ile Şekil 5.6'da görülen çekme işlemleri tekrarlanır ve $(p)_{ak}$ değerleri tespit edilerek hesaplanabilir.

Kesme(Kayma) gerilmelerinin tespit edilebilmesi için ise üç metot kullanılabilir. Bu metotlar birbirlerinden bazı küçük farklılıklar göstermekte ise de prensip olarak hepsi aynıdır ve birbirlerine çok yakın sonuçlar verirler[40] .

5.4.2. Mühendislik Sabitlerinin Bulunması

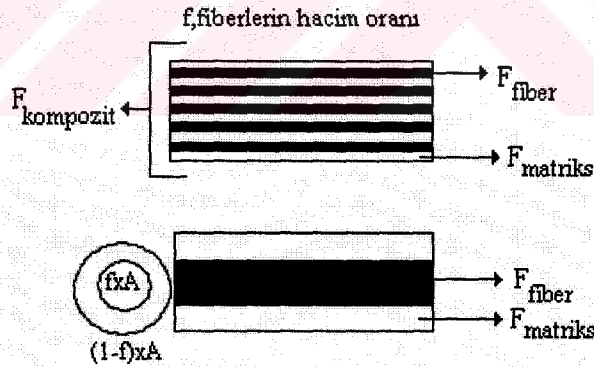
Bazen kompozit malzemenin mukavemet değerleri ve mühendislik sabitleri bulunamaz. Fakat malzemeyi oluşturan matriks ve takviye fazının mühendislik sabitleri ve konsantrasyonu biliniyor olabilir. Kompozit malzemenin takviye istikametinde veya buna dik istikametteki mühendislik sabitleri buna bağlı olarak rijitlik ve elastiklik matrisi elemanları kompozit malzeme ile deney yapmaksızın teorik olarak bulunabilir[40].

- E_1 ' in Bulunması

Sürekli fiber ile takviye edilmiş plastiklerin teorik analizinde şu varsayımlar yapılmaktadır.

- 1- Tüm fiberler çap ve uzunluk bakımından eşittir.
- 2- Fiber ve matriks (ana malzeme) arasındaki temas yüzeylerinde kayma yoktur.
- 3- Küçük gerilmelerde fiber ile matriks elastik bir şekil değiştirme göstermektedirler.
- 4- Belirli bir kuvvet altında başlangıçta elyaf ile matrikste eşit şekil değiştirmeler meydana gelmektedir.
- 5- Kompozitin yük taşıma kabiliyeti fiber ile matriksin yük taşıma kabiliyetlerinin toplamına eşittir.

Fiberlerin tek yönlü olduğu kompozit bir malzeme eğer dengede kalmak zorundaysa, kompozite uygulanan F kuvveti, fiber ve matriks içindeki F_f ve F_m kuvvetlerinin toplamına eşit ve ters yönde olmalıdır. Bu durumu aşağıdaki şekilde kolayca görebiliriz[3].



Şekil 5.7 Sürekli fiber ile kuvvetlendirilmiş kompozitlerde hacim ve yük dağılımı

Mukavemet problemleri ele alınırken, genellikle kuvvet yerine basınç (birim alana düşen kuvvet) σ terimi ile çalışılır. Yani fibere etkiyen kuvveti basitçe; fiber üzerindeki basınç (σ_f) ile basınca dik olan fiber kesit alanının çarpımı şeklinde tanımlanabilir. Fiberler tarafından oluşturulan kompozit kesit alanı, fiberlerin hacim oranı ifade eden f ile kompozitin kesit alanının çarpımıdır. Yani $f \cdot A$ dır. Benzer şekilde matriks üzerindeki kuvvet, matriksteki

basınç ile kompozitteki matriksin kesit alanının çarpımı olarak yazılabilir. Kompozitteki matriksin kesit alanı $(1-f).A$ şeklinde ifade edilebilir. Böylece kompozitteki basınç, fiberlerdeki ve matriksteki basınçlar ile göreceli kesit alanlarının çarpımının toplamıdır.

$$F = F_f + F_m \quad (5.43)$$

(5.43) denklemindeki kuvvet değerleri basınç ve kesit alanlarını kapsayacak şekilde yerlerine yazılarak ;

$$\sigma A = \sigma_f f A + \sigma_m (1 - f) A \quad (5.44)$$

denklemini elde edilir.

Kompozitin kesit alanı olan A formülün her iki tarafında yer aldığı için sadeleşebilir. Bu durumda ;

$$\sigma = \sigma_f f + \sigma_m (1 - f) \quad (5.45)$$

dir. Bu denklem kuşkusuz, elastik şekil değiştirmeler için geçerlidir. Fiberlerdeki basınç ile matriksteki basınç aynı değildir. Bir malzeme tarafından yüklenen basıncın (yada kuvvetin) şekil değiştirme ile orantılı olduğunu ifade eden Hooke Kanunu kullanılabilir. Bu kanun, basıncın düşük olması durumunda ve elimizdeki malzeme elastik olduğu sürece uygulanabilir. Metaller, seramikler, grafit ve pek çok polimer için bu ifade doğrudur, ancak elastomerler(kauçuk) için doğru değildir. Hooke kanunu (5.45) denklemi ile ifade edilir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.46)$$

Bu denklemdeki E , elastik modüldür ve bu sayı büyüdükçe malzeme daha rijit olur. Uyum için şekil değiştirme (ε), hem fiberde hemde matrikste aynı ($\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon$) olmalıdır. Aksi takdirde malzemeyi gerdikçe (veya kuvvet uyguladıkça) kompozitin uçlarında boşluklar oluşur. Buna izostrain kuralı denir.

$\sigma = E \cdot \varepsilon$ bağıntısına göre yeniden düzenlersek ;

$$E \varepsilon = (1 - f) E_m \varepsilon + f E_f \varepsilon \quad (5.47)$$

denklemini elde edilir. ($\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon$) olduğu kabul edilerek gerekli düzenlemeler yapılsa;

$$E = (1 - f) E_m + f E_f \quad (5.48)$$

denklemini bulunur.

Fiberlerin ve matriksin yük taşıma oranı ,

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f}{E_m} = \frac{f}{(1 - f)} \quad (5.49)$$

kompozit içinde fiberin payı ise;

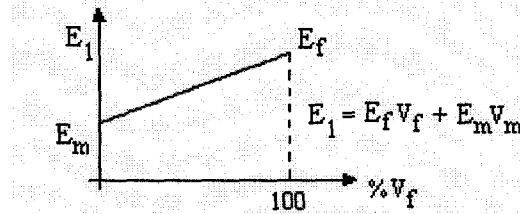
$$\frac{F_f}{F_k} = \frac{E_f}{E_k} f \quad (5.50)$$

olur. Fiber ve matriksin genellikle birbirinden farklı elastik modülleri olduğu için , her ikisine de etkiyen basınç da farklı olmalıdır. Elastik modülü yüksek olan malzemede basınç yüksek olur (genellikle fiber). Fiberglassda, glass (cam) 'ın elastik modülü 75 Gpa, polyester matriksinkinden (5 Gpa) çok çok büyüktür[3]. Bazı kompozitlerin tipik mekanik özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 5.1 Bazı kompozitlerin tipik mekanik özellikleri [40]

Özellik	Cam-Epoksi	Boron-Epoksi	Gratit-Epoksi
E_1	$5,48 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$21,09 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$21,09 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
E_2	$1,82 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$2,103 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$0,527 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
ν_{12}	0,25	0,3	0,25
G_{12}	$0,91 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$0,703 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$0,263 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
x_c	$10545 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$14060 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$10545 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
y_c	$281,2 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$843,6 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$421,8 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
S	$421,8 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$1265,4 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$703 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
x_b	$1054,5 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$2812 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$7030 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$
y_b	$140,6 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$281,2 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$1185,1 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$

Aynı şekilde fiberlere paralel yükleme durumunda fiberin hacim oranı arttırıldıkça, kompozitin elastik modülü de doğru orantılı olarak artar. Farklı tiplerde fiberler seçip, fiberin hacim oranı arttıkça farklı elastik özelliklerin nasıl değiştiği takip edilebilir.



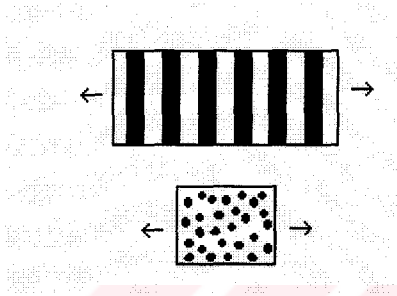
Şekil 5.8 Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_1 ' in değişimi[3].

- E_2 ' in Bulunması

Eğer, kompoziti üstünden aşağı doğru yada fiberleri eksenleri boyunca bükülür ve fiber eksenine dik yük uygulanırsa, kompozitin farklı bir şekilde davranması beklenir. Yükleminin

fiber yönlerine dik olması durumunda fiberlerin mukavemetinin ne durumda olduğunu görmeye çalışalım. Yükleme fiber yönlerine normal (90°) olduğu durumda, fiberlerin etkisi yok denecek kadar azdır ve kompozitin mukavemeti matriksinkinden daha az ve bazı hallerde yarısı kadar olur. Kuşkusuz bunun nedeni fiberlerin çentik etkisi yapmasından kaynaklanır. Bu olumsuzluğu önlemek için, fiber tabakaları, yönleri 90° ' den farklı olarak ardışık yerleştirilir. Daha iyi bir çözüm ardışık tabakaların 45° düzenle yerleştirilmesidir.

Kuvvetin fiber yönlerine normal olarak çalıştığı durumda fiberlerin etkisi çok az olduğu için matriks, serbest olarak şekil değiştirir, gerilme sabit ve her iki fazın şekil değiştirmesi farklıdır.



Şekil 5.9 Fiber eksenine dik doğrultuda yükleme

Fiber eksenine dik basınç uygulanan iplikli bir kompozitte basınç, fiber/ matriks arayüzeyi yoluyla fibere transfer edilir ve hem fiber hemde matriks aynı basınçla yüklenir. Eğer fiber ve matriks farklı elastik özelliklere sahipse her biri farklı bir çekmeye maruz kalır ve kompozitteki çekme her bir malzemedeki çekmenin hacim ortalaması olacaktır. Her iki fazda da basınç aynı olduğundan buna karışımların izostress kanunu denir. Eğer fiberlere dik bir kuvvet uygulanır ise fiber ve matriks aynı yönde sünecektir. Bu durumda kompozitin şekil değiştirmesi (δ), fiberlerdeki şekil değiştirme (δ_f) ile matriksteki şekil değiştirme (δ_m) nin toplamı olacaktır.

$$\delta = \delta_m + \delta_f \quad (5.51)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_m (1 - f) + \varepsilon_f f \quad (5.52)$$

Aynı şekilde elastik modülünü ortaya koymak için Hooke Kanununu kullanabilir ve $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

bağıntısı (5.52) denkleminde yerine yazılarak;

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma}{E_M} (1 - f) + \frac{\sigma}{E_F} f \quad (5.53)$$

denklemi elde edilir.

Fiber ve matriksteki basınç aynı olduğu için fiberlerin dik elastik modülü ,

$$E = \left(\frac{E_F E_M}{(1-f)E_F + fE_M} \right) \quad (5.54)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

Fiberlere dik ölçülen kompozit sağlamlığının , fiberlerin hacim oranı artırılırken, fiberlere paralel ölçülen kompozit sağlamlığından çok yavaş arttığına dikkat etmekte yarar vardır. Farklı yönlerde kompozitin özellikleri farklı olduğu için kompozit anizotropiktir[3].

- ν_{12} 'in Bulunması

Poisson oranı ortalama normal gerilme (σ_{11}) altında Şekil 5.48' de gösterilen E_1 için yapılan analize benzer bir yaklaşım kullanılarak elde edilebilir. Poisson oranı aşağıda belirtildiği gibi enine doğrultuda meydana gelen uzama miktarının boyuna doğrultuda meydana gelen uzama miktarına oranı olup;

$$\text{Poisson oranı , } \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (5.55)$$

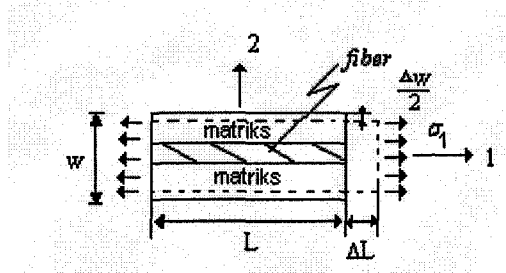
Yazılabilir. Burada gerilme durumu ise; $\sigma_1 = \sigma$ olup, bütün diğer gerilmeler sıfıra eşittir. Bu eşitlikte (ε_{22}) 2 doğrultusunda meydana gelen yanal uzamayı, ε_{11} 1 doğrultusunda meydana gelen yanal uzama miktarını göstermektedir. Deformasyonlar Şekil 5.48'de gösterilmiştir. Enine deformasyon miktarı Δw ise;

$$\Delta w = -w\varepsilon_2 = w\nu_{12}\varepsilon_{11} \quad (5.56)$$

Aynı zamanda;

$$\Delta w = \Delta_m \cdot w + \Delta_f \cdot w \quad (5.57)$$

şeklinde olur. Bu uzamalar nedeniyle iki doğrultudaki yanal uzamalar bileşeninin kesiti ve fiber geometrisine bağlıdır. Burada elemanın bütün kalınlığı kadar olduğu kabul edilmiştir[3].



Şekil 5.10 1 doğrultusunda yüklenen hacim elemanının gösterilmesi

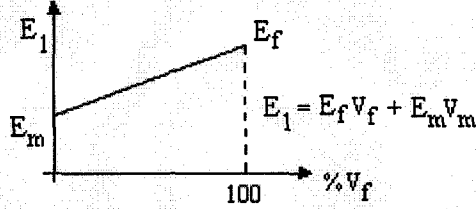
Δw matriks ile fiberlerin kısaltmalarının toplamı olduğuna göre

$$\begin{aligned} \Delta_m w &= wV_m \nu_m \varepsilon_1 \\ \Delta_f w &= wV_f \nu_f \varepsilon_{11} \end{aligned} \quad (5.58)$$

5.56, 5.57, ve 5.58 denklemleri birleştirilip gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (5.59)$$

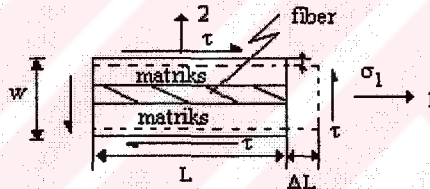
eşitliği elde edilir.



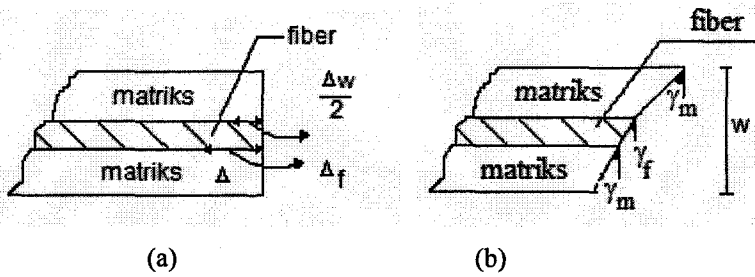
Şekil 5.11 Fiberlerin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak poisson oranının değişimi

- G_{12} Kayma Modülünün Bulunması

Düzlem içinde bir laminenin kayma modülü, G_{12} , fiber ve matriks üzerindeki kayma gerilmelerini aynı olduğu varsayılarak malzemelerin mekanikliği ile belirlenir. Kompozit malzemeden w kalınlığında ve L uzunluğunda alınan deney parçalarına kayma gerilmeleri uygulandığında parçalar Şekil 5.51 'deki gibi bir şekil değişikliğine uğrar ve θ kadar bir dönme meydana gelir.



Şekil 5.12 Kayma gerilmesi ile yüklenen bir hacim elemanı



Şekil 5.13 Bir hacim elemanın kayma deformasyonu

Şekilde abartılarak çizilmiş olan dönme gerçekte çok azdır. Bu sebepten dolayı dönmelerden sonra parça kalınlığı w 'nun sabit kaldığı kabul edilir. γ_m matriksin, γ_f fiberin, τ kayma gerilmesi altında dönme açılarıdır. Kompozit malzemeden alınan w kalınlığındaki parçalarda dönmeler çok az olduğundan dönme açılarının tanjantları raydan olarak açının kendisine eşittir.

Temel varsayımdan dolayı;

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m}$$
$$\gamma_f = \frac{\tau}{G_f}$$
(5.60)

eşitlikleri yazılabilir.

Toplam kayma deformasyonu şöyle tanımlanabilir.

$$\Delta = \gamma w$$
(5.61)

Bu yaklaşık olarak aşağıdaki gibi bileşenlerine de ayrılabilir.

$$\Delta_m = V_m w \gamma_m$$
$$\Delta_f = V_f w \gamma_f$$
(5.62)

Bu durumda ; $\Delta = \Delta_m + \Delta_f$ olduğundan bunlar w ile bölünürse;

$$\gamma = V_m \gamma_m + V_f \gamma_f$$
(5.63)

eşitliği elde edilir veya bu eşitlik 5.60 eşitliğinde yerine konulursa

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{12}}$$
(5.64)

bağıntısı elde edilir.5.64 bağıntısı yeniden düzenlenirse ;

$$\frac{\tau}{G_{12}} = V_m \frac{\tau}{G_m} + V_f \frac{\tau}{G_f}$$
(5.65)

şeklinde yazılır. Bu eşitlikten kayma modülü, G_{12} çekilip tekrar düzenlenirse bu durumda eşitlik

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m}$$
(5.66)

şeklini alır.

Bu eşitlikte enine elastiklik modülü, E_2 ' de elde edilen ifade ile aynı türdendir. E_2 ' deki gibi

G_{12} ifadesi de matriks ile ilgili olarak elastik modülü ile normalize edilebilir. Yani

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{1}{V_m + V_f \frac{G_m}{G_f}}$$
(5.67)

şeklinde yazılabilir[45].Böylece iki fazdan meydana gelmiş olan kompozit malzemenin tüm mühendislik sabitleri kompoziti oluşturan malzemelerin mühendislik sabitleri cinsinden bulunmuş olur. Kompozit ikiden fazla malzemeden oluşmuş ise, bu denklemlere diğer malzemelere ilgili terimleri ilave etmek gerekir[40].

6.TABAKALANDIRILMIŞ KOMPOZİT MALZEMELER

Klasik Tabaka Teorisi deformasyon hipotezinden ve gerilmelerin toplanmasından oluşur. Bu teoriyi kullanıp, ana yapı bloğundan yola çıkarak bulunan tabaka, sonuçta yapısal tabakalardır. Aslında gerilme ve deformasyon hipotezinden dolayı klasik ince tabaka teorisi veya klasik tabakalandırılmış plaka teorisi daha doğru olacaktır[3].

6.1. Bir Tabakadaki Gerilme-Şekil Değiştirme Değişimi

Tabaka kalınlığı gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinde ve eğilme-uzama rijitliklerinde önemlidir. Tabaka birleştirmelerinin ayrılamayacak derecede ince ve sağlam olduğu kabul edilir. Böylece kompozit ortam tek bir tabaka gibi davranır[40]. Tüm tabakalardaki gerilme-şekil değiştirme değişimleri için her bir tabakadaki gerilme şekil değiştirmeleri bulmak gereklidir. Orta yüzeye dik düzlem içerisindeki kayma gerilmeleri önemsenmez. Bu kayma gerilmeleri orta yüzeyin normali doğrultusu olan z yönünde ve $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ olarak alınır. Ayrıca $\varepsilon_z = 0$ alınır. Tabakayı oluşturan tek bir katmanın gösterdiği davranış kabuklar için Kirchhoff-Love hipotezleri ile ve plakalar için Kirchhoff hipotezleri ile belirtilir[3].

6.2.Tabakalandırılmış Plakalar

Bu bölümde çok katmanlı düzenlemelere taban oluşturulması için tek katmanlı düzenlemeler incelenecektir. Bunun yanında orta yüzeylerine göre simetrik olan tabakalar ele alınacak ve sınıflandırılacaktır. Daha sonra antisimetrik olan tabakalar orta yüzeye göre tanımlanacak ve son olarak orta yüzeye göre simetrik olmayan tabakalar ele alınacaktır[3].

6.2.1. Tek Katmanlı Konfigürasyonlar

Bu bölümdeki tek katmanlı düzenlemeler izotropik, özellikle ortotropik, genellikle ortotropik ve anizotropik davranışları olduğu kabul edilecektir. Ortotropik dört temel malzeme özelliklerine sahiptir.

Malzeme özellikleri E ve ν , kalınlığı t olan tek katmanlı izotropik tabakanın rijitliği $B_{ij} = 0$ 'a indirgenir.

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu^2} A \\
A_{66} &= \frac{1-\nu}{2} A \\
D_{11} &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} D \\
D_{66} &= \frac{1-\nu}{2} D \\
D &= \frac{At^2}{12} \\
A_{12} &= \nu A \\
A_{22} &= A \\
A_{16} &= A_{26} = 0 \\
D_{12} &= \nu D \\
D_{22} &= D \\
D_{16} &= D_{26} = 0
\end{aligned} \tag{6.1}$$

Meydana gelen kuvvetler sadece tabakanın orta yüzeyinde oluşan gerilmelere bağlı iken moment ise orta yüzeyin eğimine bağlıdır. Bunlar şöyle bulunur:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} A & \nu A & 0 \\ \nu A & A & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)A}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} D & \nu D & 0 \\ \nu D & D & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)D}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \end{Bmatrix} \tag{6.2}$$

Böylece, tek izotropik katmanın eğilmesi ve uzaması arasında bir bağlantı yoktur.

Kalınlığı t ve tabaka rijitliği Q_{ij} olan tek özellikli ortotropik katmanın tabakalandırma rijitliği;

$$\begin{aligned}
(A_{11} A_{12} A_{22} A_{66}) &= (Q_{11} Q_{12} Q_{22} Q_{66}) t \\
(D_{11} D_{12} D_{22} D_{66}) &= (Q_{11} Q_{12} Q_{22} Q_{66}) t^3 / 12
\end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \tag{6.3}$$

Jones' e göre meydana gelen kuvvetler sadece gerilmelere bağlı iken momentler ise eğime bağlıdır. Kalınlığı t ve tabaka rijitliği Q_{ij} olan genellikle tek ortotropik katmanın tabakalandırma rijitliği denklemi şöyle olur.

$$A_{ij} = \overline{Q_{ij}}t, D_{ij} = \overline{Q_{ij}} \frac{t^3}{12}, B_{ij} = 0$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{21} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.4)$$

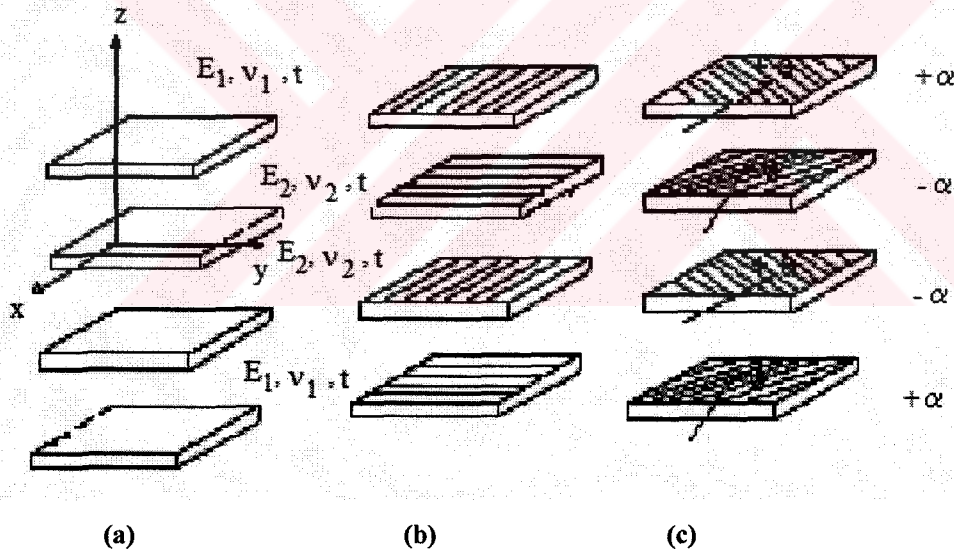
İzotropik katman ve ortotropik katman karşılaştırılırsa, uzama kuvvetleri kayma şekil değiştirmeleri kadar uzama şekil değiştirmelerine de bağlıdır. Genellikle tek ortotropik katman ile anizotropik katman arasındaki tek fark rijitlikleridir. Q_{ij} anizotropik katmanın, $\overline{Q_{ij}}$ ise ortotropik katmanın rijitliği olmak üzere,

$$A_{ij} = \overline{Q_{ij}}t$$

$$D_{ij} = \overline{Q_{ij}} \frac{t^3}{12}$$

$$B_{ij} = 0$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 6.1 Dört katmanlı bağlanmış görünüm a) İzotropik katmanlar ile simetrik tabakalar b)Düzenli simetrik olan çapraz katlı tabakalar c) Düzenli simetrik olan açılı tabakalar

6.2.2.Simetrik Tabakalar

Orta yüzeye göre malzeme özellikleri geometrik bakımdan simetrik olan tabakalar için genel rijitlik denklemleri oldukça basittir. t_k kalınlığı $(\sigma_{ij})_k$ 'nın simetrisi ve bütün bağlama rijitlikleri, B_{ij} sıfır olarak gösterilmiştir. Eğilme ve uzama arasında iki önemli pratik uygulama vardır. Birincisi, bu tabakaların tabakalara göre daha kolay incelenebilmesidir. İkincisi, simetrik

tabakaların soğutma işlemi sırasında meydana gelen termal kısalmalardan kaynaklanan burulma eğilimi olmasıdır. Sonuç olarak; özel durumlar haricinde anti simetrik tabakalara yerine gerekmedikçe simetrik tabakalar kullanılır. Isı kalkanı gibi kullanılan bir tabakada ısı yalnızca bir yüzeye gelir ve tabaka antisimetrik tabakaya benzer kullanılır.

Eğer değişik kalınlıklardaki izotropik katmanlar, orta yüzey etrafında geometrik ve asal malzeme eksenleri yönünden simetrik olarak düzenlenmişse elde edilen tabakada eğilme ve uzama arasında bağlantı yoktur. Üç izotropik katmandan oluşan simetrik tabakalandırma Şekil 6.1' de gösterilmiştir. Uzama ve eğilme rijitliği k.nci katman için aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır.

$$(\overline{Q}_{11})_k = (\overline{Q}_{22})_k = \frac{E_k}{(1-\nu_k^2)}, (\overline{Q}_{12})_k = \frac{\nu_k E_k}{(1-\nu_k^2)}, (\overline{Q}_{66})_k = \frac{E_k}{2(1+\nu_k^2)}$$

Kuvvet ve moment bileşenleri ise ;

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{21} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6.5)$$

şeklindedir.

Birden çok özel ortotropik katmanlardan oluşan simetrik tabakalar:

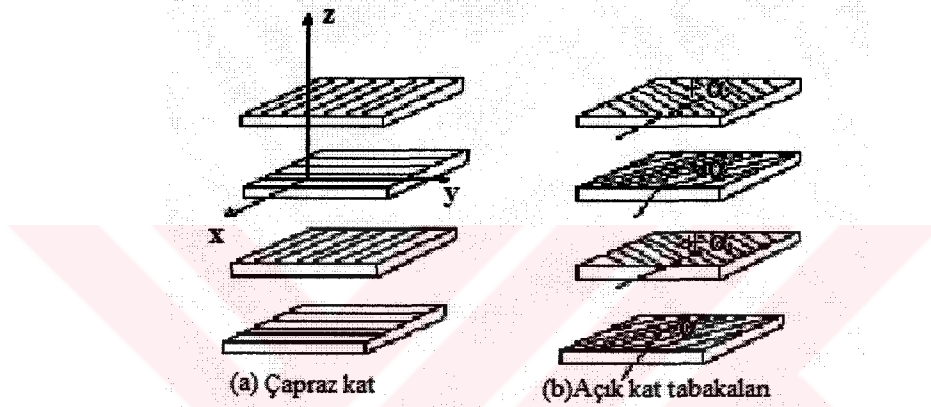
$A_{16}, A_{26}, D_{16}, D_{26}$ rijitliklerini içeren analitik zorluklardan, bir tabakanın bu rijitliklere sahip olması istenmez. Tabakalar, asal malzeme yönleri, tabaka eksenleri boyunca uzanan ortotropik katmanlardan oluşturulabilir. Eğer, kalınlığı, konumu ve malzeme özellikleri, tabakanın orta yüzeyine göre simetrik ise eğilme ve uzama arasında bağlantı oluşmaz. Uzama ve eğilme rijitlikleri k.nci katman için aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

$$(\overline{Q}_{11})_{i=1,2}^k = \frac{E_1^k}{1-\nu_{12}^k \nu_{21}^k}, (\overline{Q}_{12})^k = \frac{\nu_{21}^k E_1^k}{1-\nu_{12}^k \nu_{21}^k}, (\overline{Q}_{66})_k = G_{12}^k$$

$$(\overline{Q}_{22})_{i=1,2}^k = \frac{E_2^k}{1-\nu_{12}^k \nu_{21}^k}, (\overline{Q}_{16})_k = (\overline{Q}_{26})_k = 0$$

$(\overline{Q}_{16})_k$ ve $(\overline{Q}_{26})_k$ sıfır olduğundan $A_{16}, A_{26}, D_{16}, D_{26}$ da sıfır olur. Ayrıca B_{ij} rijitliğinde simetriden dolayı sıfırdır. Kuvvet ve moment bileşkeleri denklem (6.5) ' den hesaplanır. Birden çok özel ortotropik katmandan oluşan simetrik tabakalar, tabakaların kalınlık ve malzeme özellikleri aynı ise özel bir durum oluşturur. Fakat ana malzeme yönleri tabaka eksenlerine göre değişir. Örneğin; $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ aynı kalınlık ve özellikli dört katmandan oluşan simetrik tabakaların Şekil 6.1 (b) 'de gösterilmiştir. Bu tabakalara simetrik düzenli çapraz kat denir.

Genellikle birden çok ortotropik katmanlardan oluşan simetrik tabakalandırmalar; Birden çok orta yüzeye göre simetrik olarak yerleştirilmiş ortotropik katmanlardan oluşan bir plakanın B_{ij} değeri sıfır olur. Moment ve kuvvet bileşkesi de hesaplanabilir. Burada normal kuvvet ve kayma şekil değiştirmesi, kesme kuvveti ve normal şekil değiştirme, eğilme momenti ve burulma momentinden dolayı A_{ij} ve D_{ij} sıfırdan farklıdır. Bunlar $A_{16}, A_{26}, D_{16}, D_{26}$ rijitlikleri ile elde edilebilir. Simetrik tabakaların bir alt sınıfı ise sabit simetrik köşe (aç) kat tabakalarıdır. Bu tabakalar tabaka eksenine göre asal malzeme özelliklerinin yönlerinin açıları zıt işaretlidir. Örneğin; $+\alpha/-\alpha/-\alpha/+\alpha$ açıları dört katman için Şekil 6.2. (b) 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Düzenli antisimetrik dört katmanın ayrık görünüşü

Birden çok anizotropik katmanlı simetrik tabakalar orta yüzey etrafında simetrik yerleştirilmiş anizotropik katmanlardan oluşan tabakalar simetri nedeniyle B_{ij} 'nin ihmal edilmesi dışında herhangi bir farklılık yoktur. $A_{16}, A_{26}, D_{16}, D_{26}$ rijitlikleri mevcuttur ve katman sayısı arttıkça sıfırdan farklıdır. Sonuç olarak, diğer tabakalar için mümkün olan birçok rijitlik sadeleştirilmesi bu sınıf için geçerli değildir.

6.2.3 Antisimetrik Tabakalar

Bir tabakanın orta yüzeye göre simetrik olması, eğilme ve uzama etkisi oluşturmadığı için gereklidir. Fakat tabakalandırılmış bir çok kompozitten oluşan fiziksel uygulamalar, antisimetrik tabaka oluşturma gereksinimlerini ortaya çıkarır. Dört katmandan oluşan antisimetrik tabakaların değişimi katmandan katmana göre farklıdır. $+\alpha/-\alpha/-\alpha/+\alpha$ sonuç olarak , orta yüzeye göre simetri bozulur ve tabakanın karakteristik davranışı esas olarak simetrik duruma dönüştürülebilir. Her bir tabakanın aynı kalınlığa sahip olması gerekir[3].

6.2.3.1 Antisimetrik Çapraz Kat Tabakaları

Bir antisimetrik çapraz kat tabaka ve tek sayıdaki ve asal malzeme yönleri 0° ve 90° arasında değişen tabakalardan oluşur. Kuvvet ve moment bileşenleri denklemler yardımıyla hesaplanır. Fakat bu denklemlerde;

$$A_{16} = A_{26} = B_{12} = B_{16} = B_{26} = B_{66} = D_{16} = D_{26} = 0 \text{ ve } B_{22} = -B_{11} \quad (6.6)$$

olur. Düzenli antisimetrik çapraz kat tabakalandırma, aynı kalınlıktaki tabakalardan oluşur ve üretim kolaylığından dolayı yaygındır. Katman sayısı arttıkça, bağlantı rijitliği B_{11} yaklaşık sıfır olarak gösterilebilir[3].

6.2.3.2 Antisimetrik Açılı Kat Tabakalar

Bir simetrik açılı kat tabaka, orta yüzeyin bir tarafında tabaka koordinat eksenine $+\alpha$ derece yönlendirilmiş ve diğer tarafta da eşit kalınlıktaki tabakaya $-\alpha$ derece yönlendirilmiş tabakalardan oluşur[3].

6.2.3.3 Simetrik Olmayan Tabakalar

t_k kalınlığı keyfi olduğu zamanlarda rijitlik değeri için özel bir dönüşüm mümkün değildir. Eğilme ve uzama arasında bağıntı, değişik kalınlıklardaki izotropik katmanların orta yüzeyine göre antisimetrik olacak şekilde elde edilebilir. Böylece eğilme ve uzama bağlantısı malzeme ortotropisinin bir göstergesi değildir. Fakat tabaka antisimetriktir; buda geometrik ve malzeme özelliklerinin bileşimidir. Kuvvet ve moment bileşenleri denklemlerden bulunur. Fakat bu denklemlerde :

$$A_{16} = A_{26} = B_{16} = B_{26} = D_{16} = D_{26} = 0$$

dir.

Birden çok ortotropik katmanlardan oluşan simetrik olmayan tabakalarına sahip olduğu kuvvet ve moment bileşenleri denklemlerden fakat A_{11}, B_{11}, D_{11} 'den farklı olarak A_{22}, B_{22}, D_{22} elde edilir. Bu da, kayma gerilmesi bağıntısının olmadığı ve bu tür tabakalandırma problemlerinin çözümü izotropik katmanlardaki kadar kolay olduğu anlamına gelir. Bütün rijitlikler mevcuttur. (Yani sıfırdan farklıdır.) Sonuç olarak bu iki tabakalı konfigürasyonların analizi, birden çok izotropik katmanlarda yada birden çok özellikli ortotropik katmanlarda oluşanlara göre daha zordur.

Eğilme ve uzama arasındaki ilişki olmadığından orta yüzey bir referans yüzeyidir. Çok katmanlı tabakalar genellikle uzama ve eğilme arasındaki ilişkiyi geliştirir. Bu durumda, tabakanın geometrisinin ve malzeme özelliklerinin etkisi vardır. Özel durumlarda,

tabakalandırma içerisindeki tabakanın simetrisi artırılabilir veya azaltılabilir[40]. Uzama ve eğilme arasındaki ilişki iyi anlaşılmalıdır.

Cord ve Jones uzunlamasına yerleştirilmiş sertleştiriciler dairesel silindirik kabuğun dış tarafında olanlara göre, aynı sertleştiriciler kabuğun iç tarafına yerleştirildiğinde burkulma yükü değerinin iki kat daha fazla olduğunu göstermişlerdir[3].

$$\left(\overline{Q}_{12}\right)^k = \frac{\nu_{21}^k E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k}$$

$$\left(\overline{Q}_{66}\right)_k = G_{12}^k$$



7. ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ

Malzemeyi bir çekme kuvveti uygulanırsa bir miktar uzama meydana gelir. Malzemede akma sonrası oluşan gerilmeler elasto-plastik gerilme analizi ile elde edilir. Elasto-plastik gerilme analizi iki adımlıdır. Birincisi, yük artışı sırasında elastik şekil değiştirmeler hesaplanır ve başlangıç şekil değiştirme olarak kabul edilir. Yani elastik bölgede gerilme analizi yükleme yada gerilme, malzeme içerisindeki elastik bölgede ise yükü kaldırdığımızda malzeme yüklemenden önceki halini alır. Fakat malzemede gerilme akma noktasından büyükse malzeme eski haline dönemez. Bu yaklaşım ideal plastik yada sertleşmenin küçük olduğu malzemeler için uygun değildir. İkincisi ise, plastik deformasyonun hesaba katılmasında her yük artışında gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin de belirlenmesidir. Yani plastik bölgede plastik gerilme analizi yapılır. Analizler için çekme diyagramından yararlanılır.

İyi tanımlanmış elasto-plastik matriksli ile bu artışı elastisite yaklaşımı, sertleşmiş plastisite için ideal olarak uygulanır. Artışlı elastisite işleminin hesaplama açısından en ciddi olumsuzluğu yapının matriks hesaplamasının her adımda değişmesidir. Çözümün iterasyonlu işlemi sonlu elmanlar yöntemiyle yapılmaktadır.

Başlangıç gerilme yöntemi Zienkiewicz (1971) tarafından artışlı elastisite işlemine alternatif bir yaklaşım olarak geliştirmiştir. Bunun kullanılması ile ideal plastisite artışları gerilim sistemini tek olarak belirleyen şekil değiştirmede bir ayarlama işlemi oluşturulur. Bu durumda başlangıç gerilmeleri yapı boyunca elastik olarak dağılmış olur. Bu yaklaşım başlangıç işleminin başarılı olmasını sağlar. En hızlı yaklaşımdır. Bu yöntemde elasto-plastik gerilme analizine başlamak için elasto-plastik bölgelerdeki bir boyutlu çekme örneği kullanılır. Daha sonra iki ve üç boyutlu gerilmelere uygun akma kriterleri kullanılarak geçilir.

Bu çalışmada kullanılan plaka, çelik fiber ile takviyelendirilmiş termoplastik (PVC) matriksli kompozit malzemedir. Plastik bölgede gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Ramberg-Osgood tarafından;

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon_p^n \quad (7.1)$$

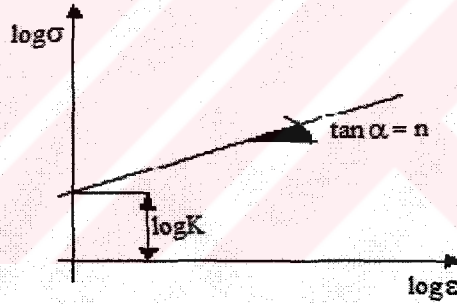
ifadesi ile verilmiştir. Ramberg-Osgood tarafından verilen bu bağıntı bir çok malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini hassas bir şekilde vermek için kullanılır. Bu bağıntıya göre, elastik ve plastik şekil değiştirmeler ayrı ayrı ele alınıp toplanmıştır. Denklem 7.1' deki bağıntı toplam şekil değiştirmeye uygulanır.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \quad (7.2)$$

Burada görüldüğü gibi elastik şekil değiştirmeyi gerilme cinsinden ifade etmek için E' den yararlanılır. 7.1 ve 7.2 denklemleri birleştirilecek olursa, gerilme ve toplam şekil değiştirme arasında şu bağıntı ortaya çıkar.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^n \quad (7.3)$$

Buradaki K Şekil değiştirme sertleşmesi parametresini, n ise şekil değiştirme sertleşmesi üssünü belirtmektedir. Bunlar tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen çekme eğrisinden alınan değerler yardımıyla hesaplanabilir. σ ve ε 'un logaritmaları alınarak bulunur. $\varepsilon_p=1$ olduğundan log'un değeri K sabitine eşittir. Eğer iki yöndeki $\log \sigma, \log \sigma$ logaritmik onluk grupla eşit uzaklıkta olursa, n sabiti de logaritmik çizimde eğime eşit olur. σ gerilmesi ile buna karşı gelen toplam şekil değiştirme sırasında çizilen grafik logaritmik bir eğridir. Küçük şekil değiştirmelerde bu eğri, elastik şekil değiştirmelere karşı gelen eğriye karşılık büyük şekil değiştirmelerde ise, n plastik şekil değiştirme doğrusuna yaklaşır. K ve n değerlerinin elde edilmesi aşağıdaki şekilden de rahatlıkla görülebilir.



Şekil 7.1 K ve n değerlerinin tespiti

$\sigma = K \varepsilon_p^n$ ifadesinin logaritması alınırsa;

$\log \sigma = \log k + n \log \varepsilon_p$ ve $y=ax+b$ şeklinde bir doğru denklem ortaya çıkar. Buradan K ve n değerleri rahatlıkla tespit edilebilir.

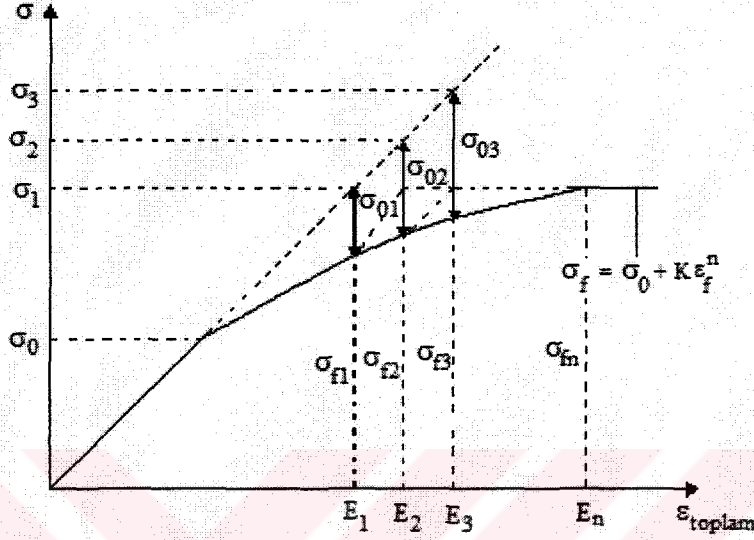
Çekme numunesi elastik bölgenin üstüne ($\varepsilon_{toplam} = \varepsilon_1$) yüklenir. σ_x gerilmesi lineer olarak hesaplanır. Böylece σ_{fl} gerilmesi aşağıda gösterilen şekilde verilmektedir. Burada σ_{0i} başlangıç gerilmesidir.

$$\sigma_{01} = \sigma_x - \sigma_{fl} = \sigma_1 - \sigma_{fl} \quad (7.4)$$

σ_{01} kullanılarak gerilmedeki artış değeri bulunur.

$$\sigma_2 = \sigma_x + \sigma_{01}$$

Bu ε_2 'ye karşılık gelir. En son denklemde ε_2 'deki gerçek gerilme ε_2 arasındaki fark σ_{02} yi verir. Aşağıdaki analog iterasyon adımları noktanın, elasto-plastik şekil değiştirmenin ε_n ve gerilmenin σ_x olmasını sağlar.



Şekil 7.2 Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı

Bu çalışmada anizotropik malzemeler için uygun düşen akma kriteri Tsai-Hill kuralına göre elde edilen gerilme değerlerinden eşdeğer gerilmeler elde edilir. Eşdeğer gerilme düzlemsel gerilme durumunda ise:

$$\sigma_e = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \frac{x^2}{y^2} + (\lambda_{12}^2 + \lambda_{13}^2 + \lambda_{23}^2) \frac{x^2}{S^2} = x^2 \quad (7.5)$$

şeklinde yazılır.

Burada σ_1, σ_2 ve $\lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{23}$ gerilme bileşenleridir. O halde başlangıç gerilmesi bir boyutlu durumda plastik bölge için

$$\sigma_0 = \sigma - \sigma_f \quad (7.6)$$

olur. Burada $\sigma_f(\sigma, \sigma_{toplam})$ diyagramı tek eksenli yüklenmiş çekme örneğinden elde edilir.

Fakat başlangıç gerilmesi aşağıdaki gibi matematiksel olarak tanımlanır.

$$\{\sigma_0\} = \{\sigma_{0x} \sigma_{0y} \lambda_{xy0}\}^T \quad (7.7)$$

Burada $\{\sigma_0\}$ bileşenleri elastik olarak hesaplanan gerilmeyle orantılıdır. Denklem 7.5'e göre ilgili eşdeğer gerilme değeri bir boyutlu durumda $\{\sigma_0\}$ 'a eşittir.

$$\sigma_0 = \sigma_e \quad (7.8)$$

Başlangıç gerilmesine bağlı yükleme aşağıdaki gibidir.

$$\{F\} \sigma_0 = V [B]^2 \{\sigma_0\} dV \quad (7.9)$$

İlk $\{F\} \sigma_{01}$ için hesaplanan ilk çözüm vektörü

$$\{\delta\}_1 = [K]^{-1} \{F\}_m \quad (7.10)$$

Burada $\{F\} = \{F\} + \{F\} \sigma_0$ ve deneme adımları $\{\delta\}_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ arasında bir farkın olmayacağı açıktır. Dolayısı ile deplasman vektörü ;

$$\{\delta\}_1 = [K]^{-1} \{F\}_m \quad (7.11)$$

Son olarak $\{\delta\}_n$ 'e karşılık gelen elasto-plastik bölgede gerilme;

$$\{\delta\}_n = [C][B]\{\delta\}_n \quad (7.12)$$

denklemindeki gibi hesaplanır.

Elasto-plastik bölgede artık gerilmeler belirli yakınsamanın elde edildiği iterasyon sonunda aşağıdaki gibi bulunur.

$$\{\sigma_{0i}\} = -\{\{\sigma\}_L - \{\sigma\}\} \quad (7.13)$$

Burada denemenin en sonunda lineer elastik gerilmede elde edilir ve $\{\sigma\}_L$ bulunur.

7.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Makine, uçak, inşaat gibi bir çok mühendislik problemlerinin çözülmesinde kullanılan sonlu elemanlar metodu, özellikle makine mühendisliğinin çeşitli problemleri için son derece uygun çözümler sunar.

Katı cismin değişik geometrili cisimlere uygulanabilmesi, sınır şartlarının kolaylıkla uygulanması, problemlere cevap verecek kadar esnek olması ve tam çözüme eleman sayısı arttıkça yaklaşabilmesi gibi çeşitli avantajlar nedeniyle çok tercih edilir.

Sonlu eleman modeli ile problem çözümü için aşağıdaki işlemler yapılmalıdır.

- 1- Cisim sonlu sayıda elemanlara ayrılır
- 2- Her eleman için rijitlik matrisi oluşturulur.
- 3- Sınır şartları belirlenir.
- 4- x ve y doğrultularında yer değiştirmelerin sıfır olduğu noktalar belirlenir.
- 5- Hangi düğüm noktalarında kuvvet olduğu belirlenir.
- 6- Sistemin rijitlik matrisi belirlenir.
- 7- Yer değiştirme $[K]$, $\{\delta\} = \{P\}$ denklemi yardımıyla bulunur. (P:Cisme uygulanan dış kuvvet, K: Rijitlik matrisi, δ : Yer değiştirme)

- 8- Her bir eleman için gerilmeler bulunur.
- 9- Eşlenik gerilmeler hesaplanır.
- 10- Akma kontrolü yapılır.
- 11- Plastik deformasyonun olduğu bölgelerde artık gerilmeler elde edilir.

Sonlu elemanlar analizi yönteminin en büyük özelliği, her bir elemanın ayrı ayrı formülize edilebilmesidir[3].

7.1.1. Sonlu Elemanlar Metodunda Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Bu hususlar maddeler halinde şöyle sıralanabilir.

- 1- Sonlu elemanlar metodunda yapının tipine göre çeşitli şekiller kullanılabilir(üçgen, dörtgen, yamuk v.b). Problemin çözümünde eleman tipi önemlidir. Çünkü eleman tipi, yapılacak hatanın büyüklüğünde etkilidir.
- 2- Üçgen elemanlardan oluşmuş bir yapıda meydana gelebilecek üçgen elemanın boyutunun karesi ile doğru orantılı iken dörtgen elemanda küpüyle doğru orantılı olmaktadır. Yani dörtgen elemandaki hata, üçgen elemandaki hatadan daha azdır.
- 3- Seçilen elemanın tipinde düğüm sayısı önemlidir. Örneğin lineer bir üçgen elemanda yapılacak hata, kübik üçgen elemanda yapılacak hatadan çok daha fazladır.
- 4- Eleman sayısı artıkça çözüme yaklaşım daha da artmaktadır. Bu sebeple ortamın eleman sayısı mümkün mertebe yüksek olmalıdır.
- 5- Eleman sıklığı da önemlidir. Örneğin, malzemenin bir kısmının incelenmesi önemli olabilir. Böyle bir durumda o bölgedeki elemanlar sıkı tutulup, diğer kısımlarda seyrekleştirilebilir[3].

7.2.Sonlu Elemanlar Yönteminin Plaka Analizinde Kullanılması

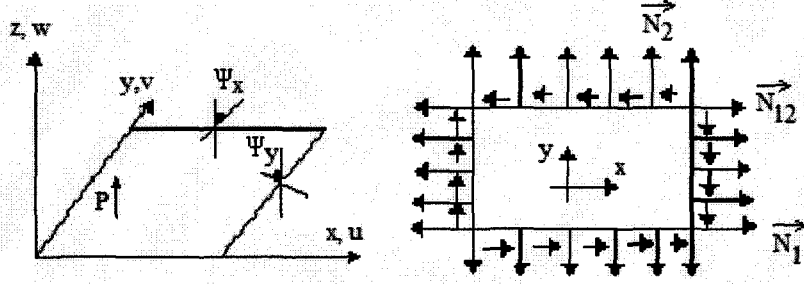
Kompozit bir plakanın davranışını analiz etmek için beş adet şekil değiştirme boyutu vardır. Bunlar u , v , w , $\psi_x(x, y)$ ve $\psi_y(x, y)$ şeklindedir.

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) + z\psi_x(x, y)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) + z\psi_y(x, y) \quad (7.14)$$

$$w(x, y, z) = w(x, y)$$

genel yükleme biçimi şekildeki gibidir



Şekil 7.3 Tabakalanmış plakanın genel yükleme şekli

Ortotropik plakalar için asal malzeme eksenleri malzemenin doğal eksenleri ile çakışır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_{11} & \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{16} \\ \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{22} & \bar{\sigma}_{26} \\ \bar{\sigma}_{16} & \bar{\sigma}_{26} & \bar{\sigma}_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} \lambda_{yz} \\ \lambda_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{44} & \sigma_{45} \\ \sigma_{45} & \sigma_{55} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (7.15)$$

Burada σ_{ij} rijitlik dönüşümü, koordinat değişimleri mühendislik sabitleriyle ifade edilebilir. Şekil değiştirme boyutu denklem (7.15)' te belirtildiği gibidir. Kirchhoff hipotezine göre; plakanın orta yüzeyindeki şekil değiştirmeler ve eğilmeler denklem (7.17) şeklinde verilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (7.16)$$

Bu denklemde kalınlık boyunca çapraz kayma şekil değiştirmeleri sabit kabul edilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial y} - \psi_y \\ \frac{\partial w}{\partial x} - \psi_x \end{Bmatrix} \quad (7.17)$$

Denklemde görüldüğü gibi şekil değiştirme eğilme ve dönmeler vektörelidir. Sonlu elemanlar yönteminde elemana ait denge denklemlerini oluşturmak için; toplam potansiyel enerji (Π), dış kuvvet yoğunluk değeri (p) ve düzlem kuvvetlerin $\bar{Q}_n^b, \bar{Q}_s^b$ eşit olarak kabul edilir.

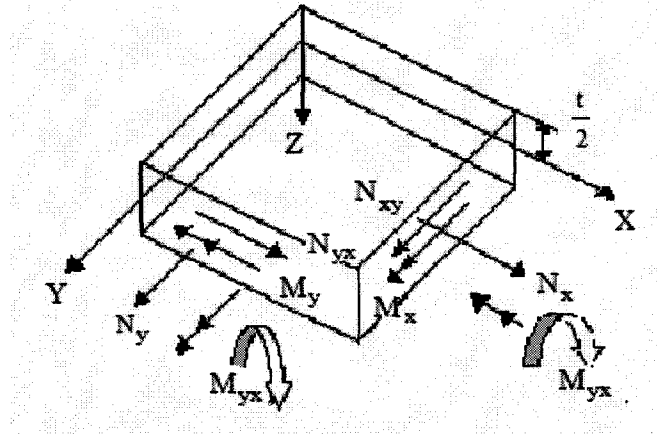
$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \left[(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \lambda_{xy} \gamma_{xy}) dA \right] dz + \frac{1}{2} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \left[(\lambda_{yz} \gamma_{yz} + \lambda_{xz} \gamma_{xz}) dA \right] dz - \int w p dA - \int_{\partial R} \left(\overline{Q_n^{-b} u_n^0} + \overline{Q_n^{-b} u_s^0} \right) ds \quad (7.18)$$

Burada, p: dış kuvvet yoğunluğu, da=dx dy plaka alanı, ∂R : düzlem kuvvet sınırı. Yukarıdaki toplam potansiyel enerji denkleminde u ve v yer değiştirmelerinin çeşitli değerleri karşılaştırılırken, dış kuvvetlerin etkisi altında meydana gelen çeşitli şekil değiştirmeler, sistemin toplam şekil değiştirmesini sıfır yapar. Yani sistemin denge konumundaki toplam potansiyel enerjisi maksimum veya minimum olur. Dolayısı ile denge durumunda toplam potansiyel enerji değişimi;

$$\Pi = 0 \text{ olur.}$$

İnce tabakaların birleştirilmesi ile oluşan tabakalı kompozit plakalar gelişmiş bir yapı örneğidir. Bu yeni yapıyı oluşturan her bir plaka, uygulanan yükü asal doğrultularda taşıdığı için, plakanın yük taşıma kapasitesi artmış olacaktır. Tüm ince plakaların her birinin rijitlik matrisi kullanılarak, genel bir rijitlik matrisi elde edilir.

Şekil değiştirmeler, plakanın kalınlığı boyunca malzeme özelliği nedeniyle sürekliliğini korur ve lineer davranış gösterir (Kirchhoff Hipotezi). Fakat gerilmeler plaka tabakaları farklı olduğundan kalınlık boyunca sürekli değildir. Yani lineer değildir. Bundan dolayı tabakalı plakanın birim kesitinde sonuç kuvvetleri, moment ve kesme kuvvetleri aşağıdaki gibi gerilmelerin kalınlık boyunca integrasyonu ile bulunur.



Şekil 7.4 Düzlemsel laminat plakada yüklerin ve momentlerin tanımı

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^n \int_{-Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} dz$$

ve

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^n \int_{-Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} z dz$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \lambda_{xz} \\ \lambda_{yz} \end{Bmatrix} dz \quad (7.19)$$

Q_x = Tabakanın genişliği boyunca uygulanan çekme kuvveti

M_x = Tabakanın her iki kesiti boyunca uygulanan moment

Plakadaki şekil değiştirme oranı çok küçük olduğu için toplam rijitlik matrisi sabit alınmıştır.

Rijitlik matrisi minimum potansiyel enerji kullanılarak bulunmuştur. Eğilme ve kayma rijitlik matrisleri :

$$[K_b] = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [B_b]^T [D_b] [B_b] dA$$

$$[K_s] = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [B_s]^T [D_s] [B_s] dA$$

$$[D_b] = \begin{pmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ B_{ij} & D_{ij} \end{pmatrix}, \quad [D_s] = \begin{pmatrix} k_1^2 A_{44} & 0 \\ 0 & k_2^2 A_{55} \end{pmatrix}$$

$$(A_{44}, B_{ij}, D_{ij}) = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} Q_{ij} (1, z, z^2) dz \quad (i,j=1,2,6)$$

$$(A_{44}, A_{55}) = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} (Q_{44}, Q_{55}) dz$$

D_b ve D_s sırasıyla malzemenin eğilme ve kayma kısımları, k_1^2 ve k_2^2 ise kayma düzeltme faktörü olup, dikdörtgen kesitli olduğundan;

$$k_1^2 = k_2^2 = \frac{5}{6} \text{ dır.}$$

Nümerik çözüm sırasında takviye açısına simetrik antisimetrik durumuna göre değişik kuvvetler kullanılmıştır. Bu tür çözümlerde hesaplanan gerilmeler ve gerçek gerilmeler çakışmalıdır.

Dengelenmemiş kuvvetler, yaklaşımı sağlamak ve artışları bulmak için şu ifadeden yararlanılır:

$$\{R\} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [B_b]^T [\sigma] dA = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [B_b]^T [\sigma_b] dA + \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} [B_s]^T [\sigma_s] dA$$

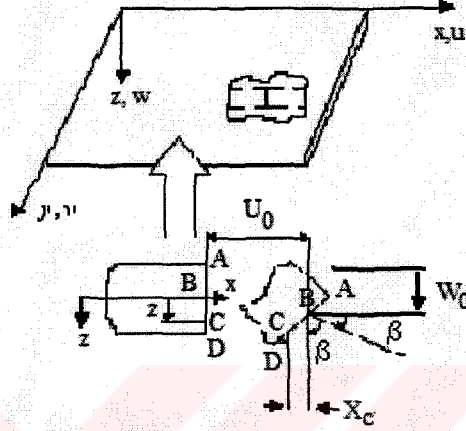
ters yönde dış kuvvet uygulanırsa, sonuç kuvveti sıfır olur. Dolayısı ile elasto-plastik gerilmeler ile elastik gerilmeler arasındaki fark artık gerilmeleri verir.

Bu çalışmada kullanılan plaka, çelik fiber ile takviyelendirilmiş termoplastik matriksli kompozit malzemedir. Akma kriteri olarak Tsai-Hill kriteri kullanılmıştır[3].

8. PLAK TEORİLERİ

8.1 Kirchhoff Teorisi

Tabakayı oluşturan tek bir katmanın gösterdiği davranış, kabuklar için Kirchhoff-Love ve plakalar için Kirchhoff hipotezlerinin toplamı ile gösterilir. Kirchhoff yada Kirchhoff-Love'ın tabakalardaki x, y, z yönlerinde u, v ve w 'nin yer değişimi hipotezi tabakanın Şekil 8.1' de gösterilen xz düzlemindeki kesitinden elde edilir.



Şekil 8.1 xz düzlemindeki şekil değiştirme geometrisi

B noktasının deforme olmayan halinde, deforme olan halindeki orta yüzeyin x yönündeki yer değişimi U_0 'dır. ABCD çizgisi kadar tabakalar deformasyon altında kalır.

$$U_0 = u_0 - z_c \beta_x \quad v_c = v_0 - z_c \beta_y \quad (8.1)$$

$$u_c = u_0 - z_c \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad v_c = v_0 - z_c \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (8.2)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (8.3)$$

Burada u, v ve w'yi bulmak için denklem (8.2)' den yararlanılırsa şekil değiştirmeler;

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (8.4)$$

yada matris formunda:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (8.5)$$

Orta tabakadaki şekil değiştirmeler ve eğilmeler,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (8.6)$$

Kirchhoff hipotezi, tabakalardaki şekil değiştirmenin lineer olduğunu varsaymaktadır. (denklem 8.1 kabulüne göre yazılmıştır) Denklem (8.3) 'teki şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkilerinden dolayı, gerilme analizleri sadece plakalar için geçerlidir.

Denklem (8.6)'da verilen şekil değiştirme değişkenlerinin, gerilme şekil değiştirme bağıntısında yerine yazılmasıyla, k'inci katmandaki gerilmeler, tabakaların orta yüzeyindeki gerilmeler ve şekil değiştirmeler cinsinden

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_{11} & \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{16} \\ \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{22} & \bar{\sigma}_{26} \\ \bar{\sigma}_{16} & \bar{\sigma}_{26} & \bar{\sigma}_{66} \end{pmatrix}_k \left\{ \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \right\}_k \quad (8.7)$$

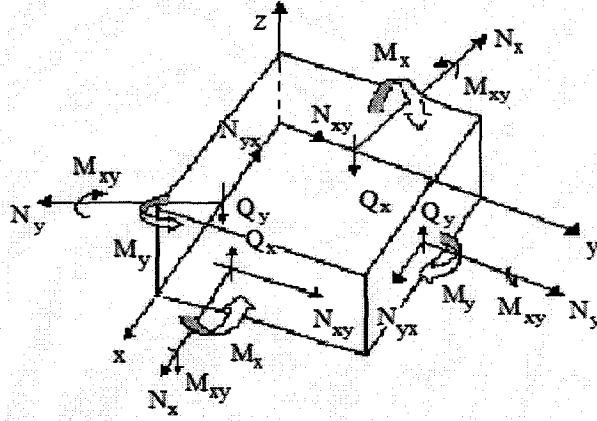
şeklinde elde edilir.

$\bar{\sigma}_{ij}$ her katman için farklı olacağından şekil değiştirme değişimi lineer olmasına rağmen tabaka boyunca gerilme değişimi lineer olmaz[3].

8.2. Tabakaya Uygulanan Kuvvetler ve Momentler

Tabakaya etkiyen iç kuvvet ve momentler, tabaka kalınlığı boyunca veya her katman uygulanan gerilmelerin integrasyonu ile elde edilir[40]. t kalınlığındaki plaka için gerilme bileşenleri ve gerilme bağıntıları :

$$\begin{Bmatrix} N_x, M_x \\ N_y, M_y \\ N_{xy}, M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} (l, z) dz \quad \begin{Bmatrix} N_{xz} \\ N_{yz} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} dz \quad (8.8)$$

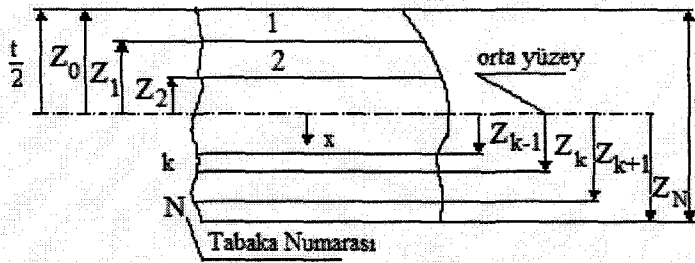


Şekil 8.2 Gerilme ve moment bileşenleri

Aslında N katmanlı tabakaların birim uzunluktaki sonuç momentleri ve kesit alanının birim genişliğindeki gerilme Şekil (8.2)' de gösterilmiştir. Bu durumu aşağıdaki formüllerle ifade etmek mümkündür.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad (8.9)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \lambda_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (8.10)$$



Şekil 8.3 N katmanlı tabakaların geometrisi

Burada Z_k ve Z_{k-1} Şekil 8.3' te görülmektedir. Bu kuvvetler ve momentler integrasyondan sonra $Z_0 = -t/2$ ' ye bağlı değildir. Fakat tabakaların orta yüzeyinin x, y koordinatlarına bağlı fonksiyonlarıdır. Denklem (8.9) ve (8.10)' daki integrasyonlar tekrar düzenlenebilir. Bu da bize bir tabakanın rijitlik matrisini elde etmek gibi bir avantaj sağlar. Böylece integrasyonun içinde

kalan kısımlar her iki katmandaki rijitlik matrisini verir. Bunlar integrasyonun içinde kalan ifadelerle toplanarak her bir katmanda meydana gelen kuvvet ve momentleri elde etmemize yardımcı olur. Tabakaların gerilme şekil değiştirme bağıntısı denklem (8.7)'de verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_{11} & \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{16} \\ \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{22} & \bar{\sigma}_{26} \\ \bar{\sigma}_{16} & \bar{\sigma}_{26} & \bar{\sigma}_{66} \end{pmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xyz} \end{Bmatrix} z dz \right\} \quad (8.11.a)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} \bar{\sigma}_{11} & \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{16} \\ \bar{\sigma}_{12} & \bar{\sigma}_{22} & \bar{\sigma}_{26} \\ \bar{\sigma}_{16} & \bar{\sigma}_{26} & \bar{\sigma}_{66} \end{pmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xyz} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (8.11.b)$$

Bununla beraber $\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, K_x, K_y, K_{xy}$ orta yüzey değerleri olup z 'nin fonksiyonu değildirler. Yukarıdaki toplama işaretleri kaldırıldığında aşağıdaki durum elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xyz} \end{Bmatrix} \quad (8.12.a)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xyz} \end{Bmatrix} \quad (8.12.b)$$

Burada;

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \text{ veya } A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \quad (8.13.a)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \text{ veya } B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \bar{z}_k \quad (8.13.b)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \text{ veya } D_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left(t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12} \right) \quad (8.13.c)$$

t_k kalınlık ve $\bar{z}_k$ k'nci katmanın orta yüzeye, (tabakaya) olan uzaklığıdır. A_{ij} ise eğilme rijitliğidir. B_{ij} 'nin varlığı bir tabakanın uzama ve eğilmesi arasındaki ilişkiyi ifade eder. Böylece B_{ij} terimlerini tabakada eş zamanlı burulma veya eğilme olmadan bir tabaka üzerinden çekmek imkansızdır. Yani çekme kuvvetleri neticesinde tabakada sadece uzama deformasyonu

değil, burulma ve eğilme de meydana gelir. Ayrıca böyle bir tabaka orta yüzeyinde eş zamanlı uzamalar olmadan momente maruz kalmayabilir[3].

8.3.Tsai Hill Teorisi

Tsai Hill anizotropik malzemeler için aşağıda görülen akma teorisini ileri sürmüştür.

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (8.14)$$

teorisini yukarıdaki denklemle ifade etmiştir. Bu teori Von Mises izotropik akma teorisinin anizotropik malzemelere tatbik edilmiş hali olarak düşünülebilir.

Sadece τ_{12} kayma gerilmesinin etkisi var ise,

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (8.15)$$

Sadece σ_1 etki ediyor ise;

$$G+H = \frac{1}{X^2} \quad (8.16)$$

Sadece σ_2 etki ediyor ise;

$$F+H = \frac{1}{Y^2} \quad (8.17)$$

Eğer z doğrultusundaki gerilme Z ile gösterilirse ve sadece σ_3 etki ediyor ise;

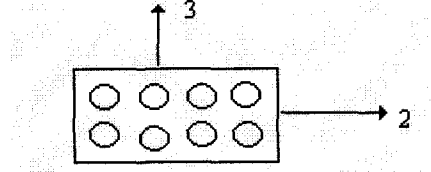
$$F+G = \frac{1}{Z^2} \quad (8.18)$$

Bu üç bağıntıdan denklemler çözülerek H, G, F bulunur.

$$\begin{aligned} 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \\ 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \end{aligned} \quad (8.19)$$

1.doğrultusunda takviye edilmiş düzlem gerilme için $\sigma_3 = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$ ' dir. Bununla beraber şekildeki gibi bir takviyede geometrik simetri düşüncesinden $Y=Z$ ' dir. Bu takdirde denklem :

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\lambda_{12}}{S^2} = 1 \quad (8.20)$$



Şekil 8.4 Asal eksen takımlarının tanımlanması

Şeklinde ifade edilebilir. Sonuç olarak takviye eksenini ile θ açısı yapacak şekilde bir yükleme halinde, gerilmelerin, malzemenin asal eksenlerine indirgenmesi için dönüşüm denklemleri kullanılır.

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta$$

$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta$$

$$\tau_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta$$

Bunları yukarıdaki denklemde σ_1 , σ_2 , τ_{12} değerleri yerlerine konulduğunda;

$$\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (8.21)$$

denklem elde edilir.

Bu kriter yalnız başına kompozit malzemelerin kırılmasını izah etmek için yeterlidir[40].

8.4. Tsai- Wu Tensör Teorisi

Bu teori anizotropik malzemeler için aşağıdaki formülü akma olarak verilmiştir.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j=1, \dots, 6) \quad (8.22)$$

iki eksenli gerilme hali için bu denklem

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (8.23)$$

Tek eksenli gerilme halinde ise X_t çekme mukavemeti X_c basma mukavemeti olmak üzere formül (8.23) kısaca

$$F_1 X_t + F_{11} X_t^2 = 1 \quad (8.24)$$

$$F_1 X_c + F_{11} X_c^2 = 1$$

şeklinde yazılabilir. Burada F_i tensörü ile ifade edilen katsayılar malzemenin çekme ve basma mukavemet değerlerine bağlı olarak şöyle ifade edilirler.

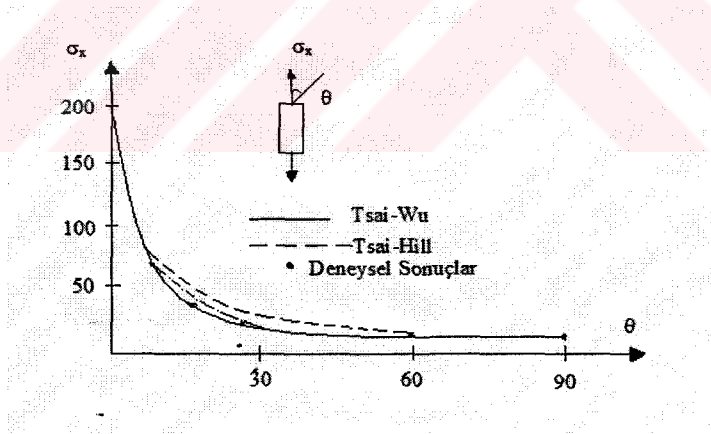
$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \\
F_{11} &= \frac{-1}{X_t X_c} \\
F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\
F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} \\
F_6 &= 0 \\
F_{66} &= \frac{1}{S^2}
\end{aligned}
\tag{8.25}$$

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ iki eksenli gerilme hali için (8.23) denklemi

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1 \tag{8.26}$$

(8.26) Denklemi ile ifade edilir. Burada daha önceden belirlenmemiş olan F_{12} eleman ise aşağıda görüldüğü gibidir.

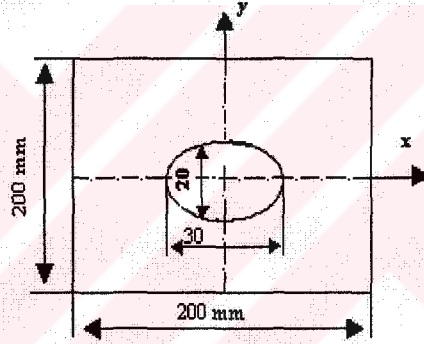
$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right] \tag{17.31}$$



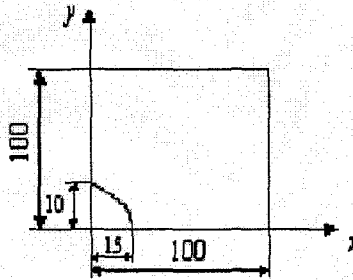
Şekil 8.5 Tsai-Wu/Tsai-Hill Deneysel sonuçlar grafiği[40]

9. SAYISAL ÇÖZÜMLER

Sayısal çözüm için Şekil 9.1’de görüldüğü gibi kare şeklinde ortasında eliptik delik bulunan tabakalı kompozit plaka seçilmiştir. Bu çalışmada Şekil 9.2’de görüldüğü gibi bu plakanın $\frac{1}{4}$ ’ ü alınarak çözüm gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme olarak çelik fiber takviyeli termoplastik tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Matriks malzemesi termoplastik(PVC (poliyvinilyl cloride)), fiber takviyesi(woven) olarak da paslanmaz çelik fiber seçilmiştir. Takviyelendirme dokuma olarak yapılmış olup, farklı açılara göre gerçekleştirilmiştir. Plakayı oluşturan her bir tabaka 2.1 mm kalınlığında olup farklı takviye açılarına sahiptir. Bu tabakalardan 4’er tanesi bir araya getirilerek tabakalı kompozit plakalar elde edilmiştir. Plakaların gerilme analizi Şekil 9.6’da görüldüğü gibi basit mesnetli durumu için gerçekleştirilmiştir. Plakalara düşey yayılı yük uygulanmıştır. Plakada akma meydana getirecek düşey yükler uygulanarak plastik bölgeler ve ortaya çıkan artık gerilmeler, takviye açıları ve uygulanan yük miktarına bağlı olarak elde edilmiştir.

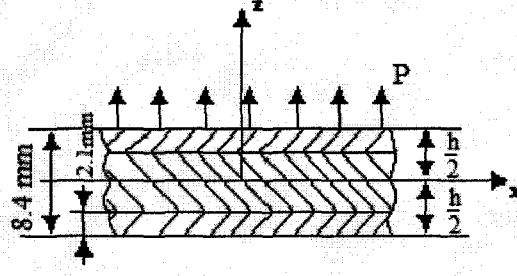


Şekil 9.1 Kare şeklinde ortasında eliptik delik bulunan tam plakanın boyutları



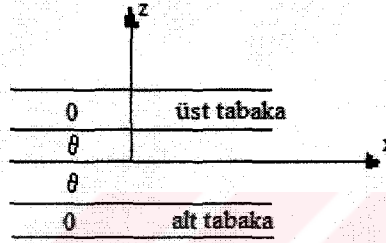
Şekil 9.2 Ortasında eliptik delik bulunan plakanın $\frac{1}{4}$ 'lük kısmı

Şekil 9.3 'te sabit kalınlıklara sahip paslanmaz çelik fiberlerle takviyelendirilmiş termoplastik matriksli tabakaların boyutlandırılması gösterilmektedir.

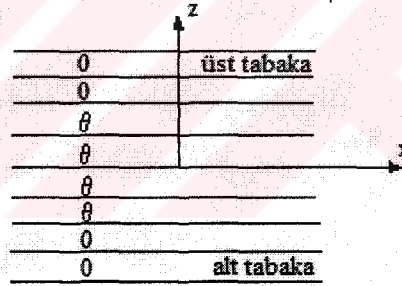


Şekil 9.3 Kompozit plakanın kalınlığı ve yükün uygulanışı

Bu çalışmada plakalar Şekil 9.4 görüldüğü gibi simetrik dizilime sahiptirler. Plakanın orta yüzeyine göre simetrik olarak birleştirilmişlerdir. Şekil 9.5'te ise hayali sekiz tabakaya ayrılmış kompozit plakanın simetrik olarak 8 adet dizilimi gösterilmektedir.



Şekil 9.4 Kompozit plakanın simetrik dizilimi (simetrik $[0^{\circ}/0^{\circ}]$)

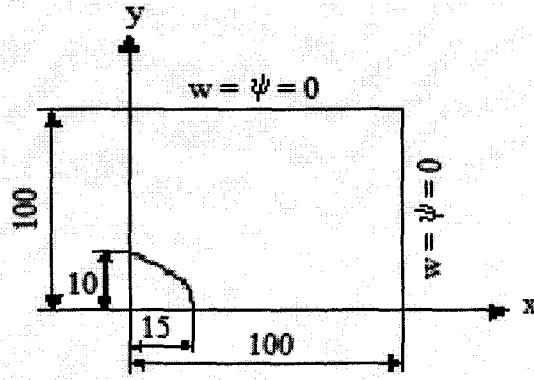


Şekil 9.5 Kompozit plakanın simetrik 8 adet dizilimi

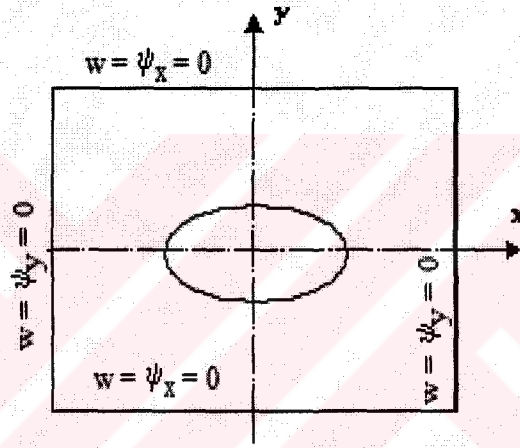
Bu çalışmada tabakalardaki her bir plakanın oriyantasyon açıları; $[30^{\circ}/-30^{\circ}]$, $[60^{\circ}/-60^{\circ}]$, $[45^{\circ}/-45^{\circ}]$ ve $[0^{\circ}/0^{\circ}]$ olarak seçilmiştir.

9.1 Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada analizi gerçekleştirilen basit mesnetli plaka, Şekil 9.6 görüldüğü gibi kare şeklinde ortasında eliptik delik bulunan plakanın $\frac{1}{4}$ 'üdür.



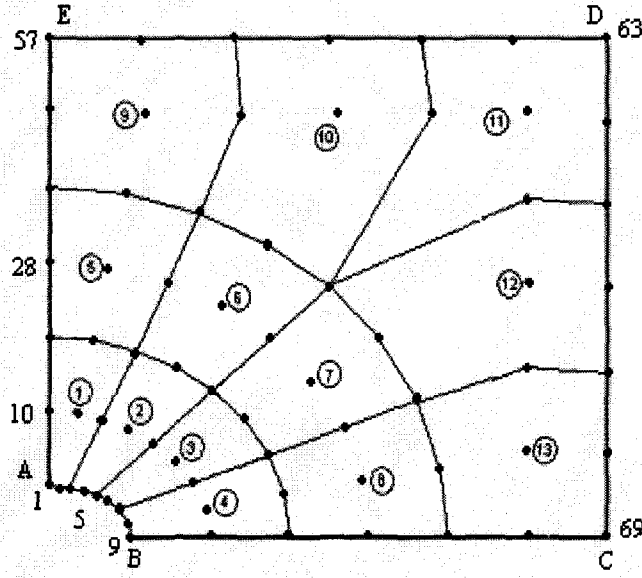
Şekil 9.6 Kompozit tabakanın 1/4'ünün boyutları ve sınır şartları



Şekil 9.7 Tam plakanın basit mesnetli hali

9.2 Kompozit Plakanın Sonlu Eleman Modeli

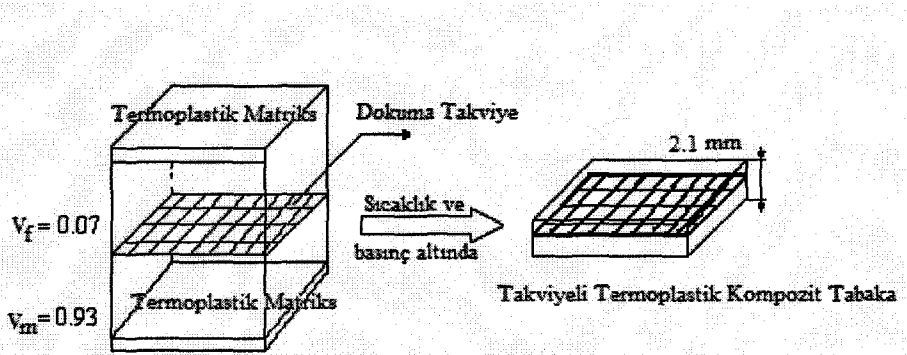
Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Şekil 9.6'da basit mesnetlenmiş 1/4 plakanın boyutları ve sınır şartları görülmektedir. Sonlu eleman çözümünde 9 düğümlü izoparametrik sonlu eleman tipi kullanılmıştır. Çözüm, 1/4 'lük plaka için 13 eleman ve 69 düğümden oluşturulmuş bir mesh üzerinde gerçekleştirilmiştir.(Şekil 9.8).



Şekil 9.8 Çalışmada kullanılan plakanın sonlu eleman ağı

9.3 Termoplastik Tabakalı Kompozit Plakalar

Kompozit laminat tabaka düşük yoğunluklu polietilen termoplastik malzeme ve dokuma şeklinde Cr-Ni çelik fiberlerin kullanımıyla elde edilmektedir. Polietilen tanecikleri kalıpların içirisine bırakılır ve elektrikli rezistans kullanılarak sıcaklık derecesi $160-200^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar çıkarılır. Sonra bu sıcaklık derecesinde, 2-2.5 MPa basınç altında minimum 5 dakika bekletilir. 15 MPa'lık bir basınç altında sıcaklık 30°C 'ye kadar düşürülür. Böylece bir polietilen kompozit tabakanın imalatı gerçekleştirilir. Bir dokuma çelik fiber iki polietilen tabaka arasında birleştirilir. Birleştirme işlemleri Şekil 9.9' da gösterilmiştir. Kompozit tabakanın kalınlığı 2.1 mm'dir. Dört tabaka benzer şekilde birleştirilirse plakanın toplam kalınlığı $4 \times 2.1 = 8.4$ mm olur. Üretilen termoplastik kompozit plakanın ölçülen mekaniksel özellikleri Tablo 9.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 9.9 Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozit Tabakanın Üretimi

Tablo 9.1 Fiber takviyeli termoplastik kompozit tabakanın akma noktaları ve ölçülmüş mekanik özellikleri [33].

E_1	9550 (MPa)	
E_2	9550 (MPa)	
G_{12}	670 (MPa)	
ν_{12}	0.32	
Eksenel akma değeri	X	18.5 (MPa)
Enine(çaprazlama)akma değeri	Y	18.5 (MPa)
Kesme akma değeri	S	8.26 (MPa)
Sertleşme parametresi	K	99.5 (MPa)
Gerilme sertleşmesi üssü	n	0.676
Fiber hacim oranı	V_f	0.07
Matriks hacim oranı	V_m	0.93

10. SAYISAL SONUÇLAR

[30°/-30°], [60°/-60°], [45°/-45°], [0°/0°] dizilimine sahip, ortasında eliptik delik bulunan basit mesnetli kare plakanın düşey statik üniform yük altında, elastik ve elasto-plastik gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Simetrik dizilime sahip termoplastik tabakalar 4 tabakanın birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Yüklemeler ilk akmayı başlatan yük değerinden itibaren 0.0001'lik artışlar halinde iterasyonla gerçekleştirilmiştir. Yükleme adımları 25, 50, 75, 100 olarak seçilmiştir. Plastik ve elastik gerilme sonuçlarının arasındaki farktan artık gerilmeler elde edilmiştir. Basit mesnetli simetrik tabakalarda, eksene dik yönde etkiyen kuvvetin oluşturduğu akma noktaları Tablo 10.1 'de verilmiştir.

Tablo 10.1 Basit mesnetli simetrik tabakalarda akmayı başlatan yük değerleri (MPa)

Plaka dizimi	0°/0°	45°/-45°	30°/-30°	60°/-60°
Simetrik/MPa	0.0495	0.0251	0.0679	0.0777

[45°/-45°] dizilimine sahip plakalardaki akmayı başlatan yük değerinin seçilen diğer açılara göre daha düşük olduğu görülmektedir.

10.1 Plastik Bölge Dağılımının İncelenmesi

Mekanik özellikleri Tablo 9.1' de verilen kompozit plakanın akma gerilmesi olan, 18.5 MPa değerinin üzerinde gerilme meydana gelen noktaların birleştirilmesi sonucu elde edilen plastik bölgeler artan yüklemeye bağlı olarak Şekil 10.1'de verilmiştir. Yüklemeler her iterasyonda 0.0001 MPa 'lık adımlarla artırılarak 25, 50, 75 ve 100 yükleme kademeleri için yapılmıştır. Buna bağlı olarak her açıda plastik bölgenin yayılışı elde edilmiştir.

[45°/-45°] dizilimine sahip simetrik tabakalı kompozit levhada 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlara göre plastik bölgenin meydana geldiği noktalar Şekil 10.1 'de gösterilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0251 MPa sabit yüklemede akmalar 1. ve 8. tabakada meydana gelmiştir. Ara tabakalarda akmalar meydana gelmemiştir. 25 ve 50 iterasyon plastik bölgenin oluşumu, ¼ eliptik deliğin x eksenine yönündeki uç noktalarının(B noktasının) biraz üzerinde oluşmaktadır. 75 ve 100 iterasyonda ise plastik bölge dağılımında iterasyon sayısına bağlı olarak 25 ve 50 iterasyonlara göre daha fazla artışlar görülmüştür. Buradaki plastik bölge dağılımı eliptik deliğin x eksenine yönündeki uç kısmının hemen üzerinde başlayıp, eliptik deliğin çevresi boyunca yukarılara doğru olduğu görülmektedir. 2., 3., 4., 5., 6., 7. tabakalarda ise plastik bölgeler oluşmamıştır. 25 ve 50 iterasyonlarda, 75 ve 100 iterasyonlarda oluşan

plastik bölge dağılımları benzerlik göstermektedirler. Plastik bölge dağılımının iterasyon sayısının artması ile eliptik deliğin uç noktalarından üst noktalara doğru kaydığı görülmektedir.

[30°/-30°] dizilimine sahip simetrik tabakalı kompozit levhada 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlara göre plastik bölgenin meydana geldiği noktalar Şekil 10.2’de gösterilmiştir. 0.0001 MPa’lık artışlarla p:0.0679 MPa sabit yüklemde akmalar 1. ve 8. tabakada meydana gelmiştir. 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalarda akmalar meydana gelmemiştir.

[30°/-30°] dizilimine sahip tabakada; 25 iterasyonda plastik bölge, ¼ eliptik deliğin x eksen yönündeki uç noktalarının üzerinde oluşmaktadır. 50 iterasyonda eliptik deliğin x eksen yönündeki uç noktasının hemen üzerinden başlamaktadır. 50 ve 75 iterasyonlarda plastik bölge dağılımı arasında benzerlik görülmektedir. 100 iterasyonda plastik bölge dağılımında, deliğin uç noktasının üzerinden yukarılara doğru diğer iterasyon sayılarında görülen dağılımlardan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalarda ise plastik bölgeler oluşmamıştır.

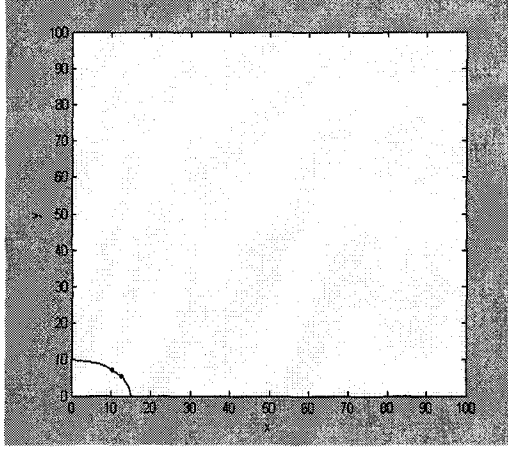
[60°/-60°] dizilimine sahip simetrik tabakalı kompozit levhada 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlara göre plastik bölgenin meydana geldiği noktalar Şekil 10.3’ te gösterilmiştir. 0.0001 MPa’lık artışlarla p:0.0777 MPa sabit yüklemde akmalar 1. ve 8. tabakada meydana gelmiştir. 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakada akmalar meydana gelmemiştir.

[60°/-60°] dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada; iterasyon sayısına bağlı olarak plastik bölge dağılımının arttığı görülmüştür. Bu artışlar eliptik deliğin x eksen yönündeki uç kısmının daha üzerinde başlayıp deliğin bombe taraflarına doğru gitmektedir. Bu dizilime sahip tabakalarda plastik bölge dağılımının diğer oriyantasyon açılardaki dizilimlere göre eliptik deliğin uç kısımlarından daha yukarılarda başladığı ve iterasyon sayısına göre plastik bölgedeki dağılımında artışların arttığı görülmüştür. 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalarda ise plastik bölgeler oluşmamıştır.

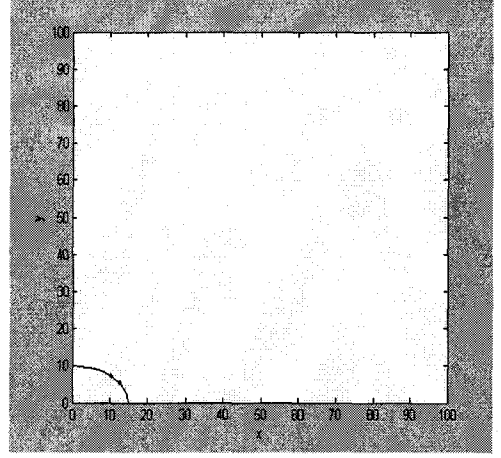
[0°/0°] dizilimine sahip simetrik tabakalı kompozit levhada 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlara göre plastik bölgenin meydana geldiği noktalar Şekil 10.4’ te gösterilmiştir. 0.0001 MPa’lık artışlarla p:0.0495 MPa sabit yüklemde akmalar 1. ve 8. tabakada meydana gelmiştir. 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakada akmalar meydana gelmemiştir.

[0°/0°] dizilimine sahip tabakalandırmada; 25 iterasyonda plastik bölge, ¼ eliptik deliğin B noktasında oluşmaktadır. 50 iterasyonda plastik bölge, B noktasında başlayıp yukarıya çıkmaktadır. 75 ve iterasyonda plastik bölge dağılımı 50 iterasyondaki plastik bölge dağılımı ile benzerlik göstermektedir. [0°/0°] dizilimine sahip bu tabakalarda plastik bölge dağılımı, diğer dizilime sahip oriyantasyon açılara göre, eliptik deliğin x eksen yönündeki uç kısmının tam bitişiinde (B noktasında) başlayıp yukarıya doğru dağılım göstermektedir. 2., 3.,

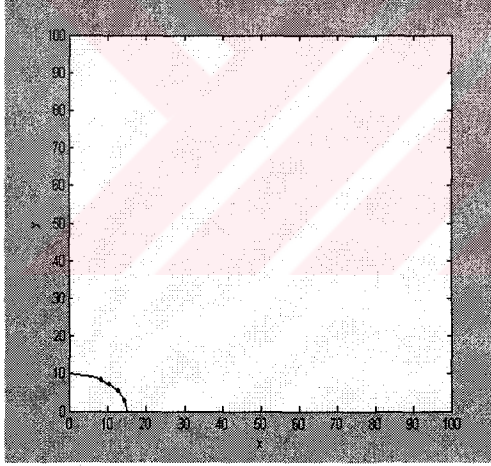
4., 5., 6. ve 7. tabakalarda ise plastik bölgeler oluşmamıştır. Bu dizilime sahip tabakada plastik bölgenin çok erken oluştuğu görülmüştür.



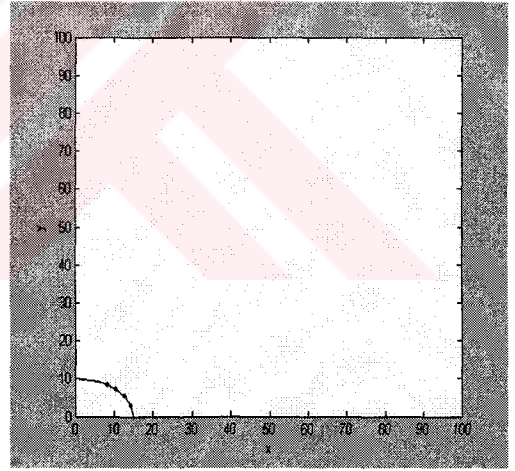
a) 45/-45 25 iterasyon



b) 45/-45 50 iterasyon

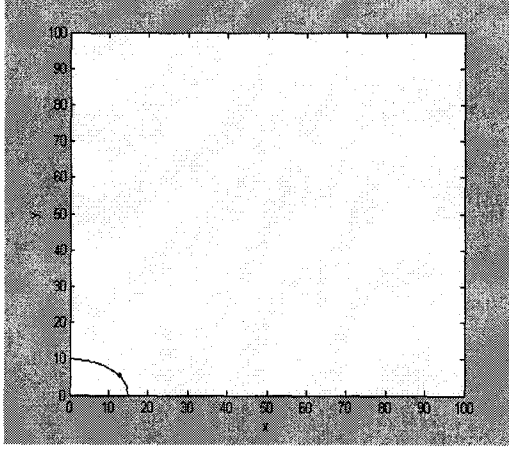


c) 45/-45 75 iterasyon

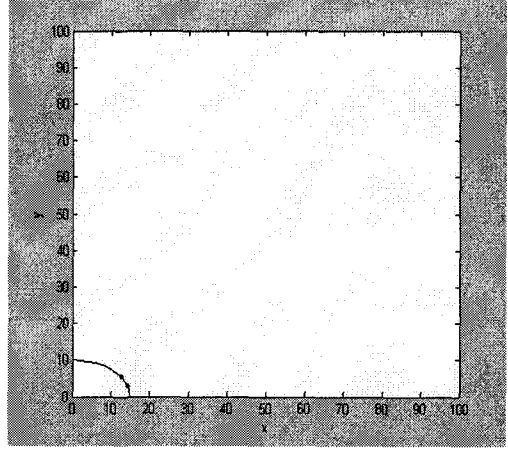


d) 45/-45 100 iterasyon

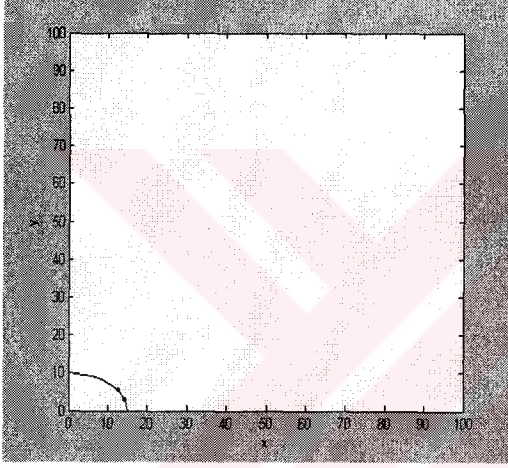
Şekil 10.1 Basit mesnetli $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı(üst tabaka)



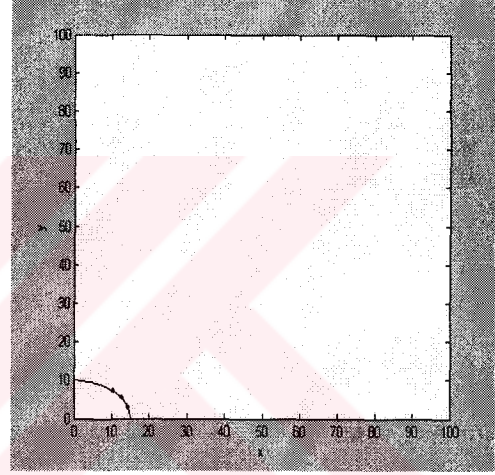
a)30/-30 25 iterasyon



b)30/-30 50 iterasyon

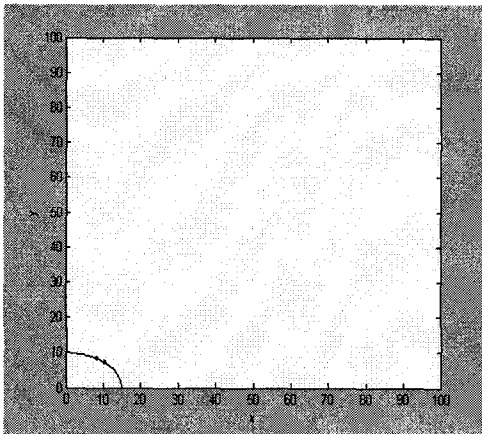


c) 30/-30 75 iterasyon

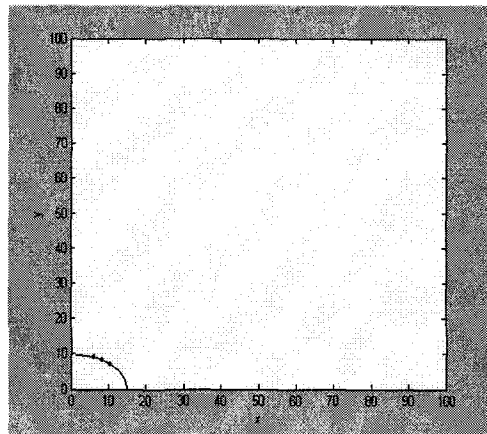


d) 30/-30 100 iterasyon

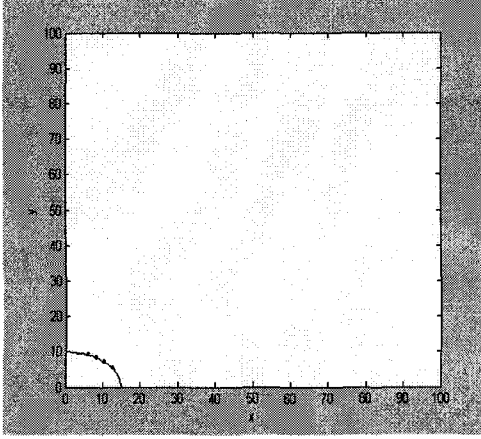
Şekil 10.2 Basit mesnetli $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı(üst tabaka)



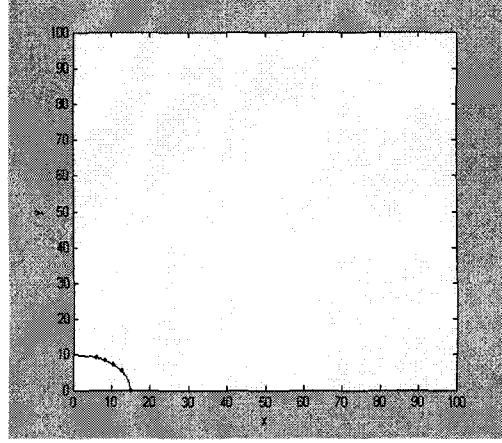
a) 60/-60 25 iterasyon



b) 60/-60 50 iterasyon

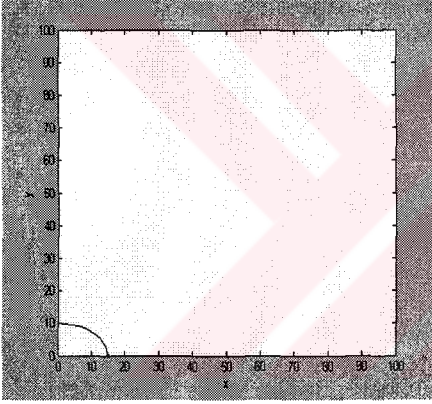


c) 60/-60 75 iterasyon

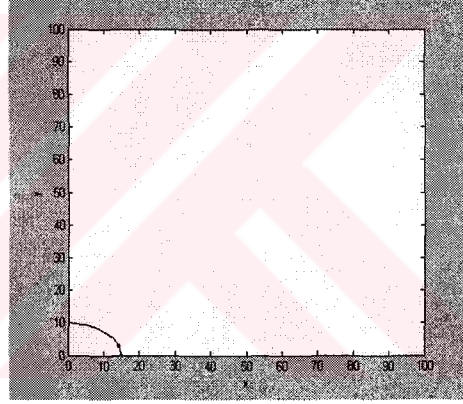


d) 60/-60 100 iterasyon

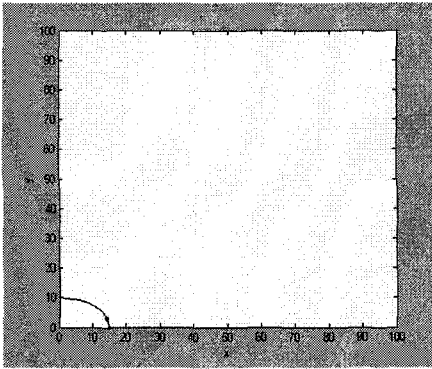
Şekil 10.3 Basit mesnetli $[60^\circ/-60^\circ]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı(üst tabaka)



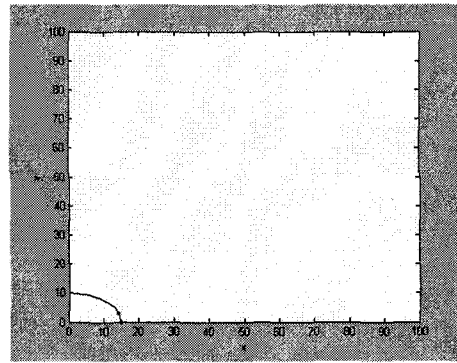
a) 0/0 25 iterasyon



b) 0/0 50 iterasyon

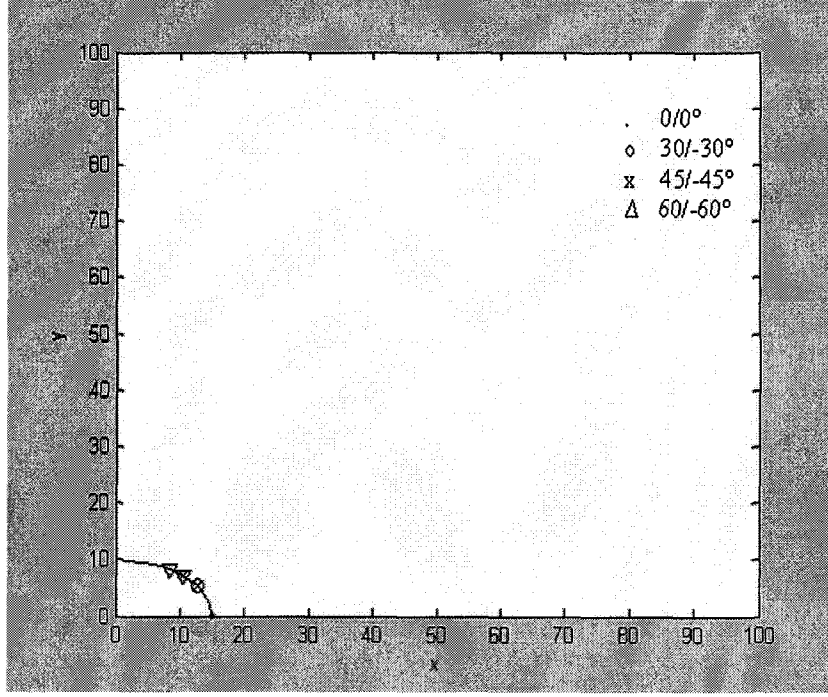


c) 0/0 75 iterasyon

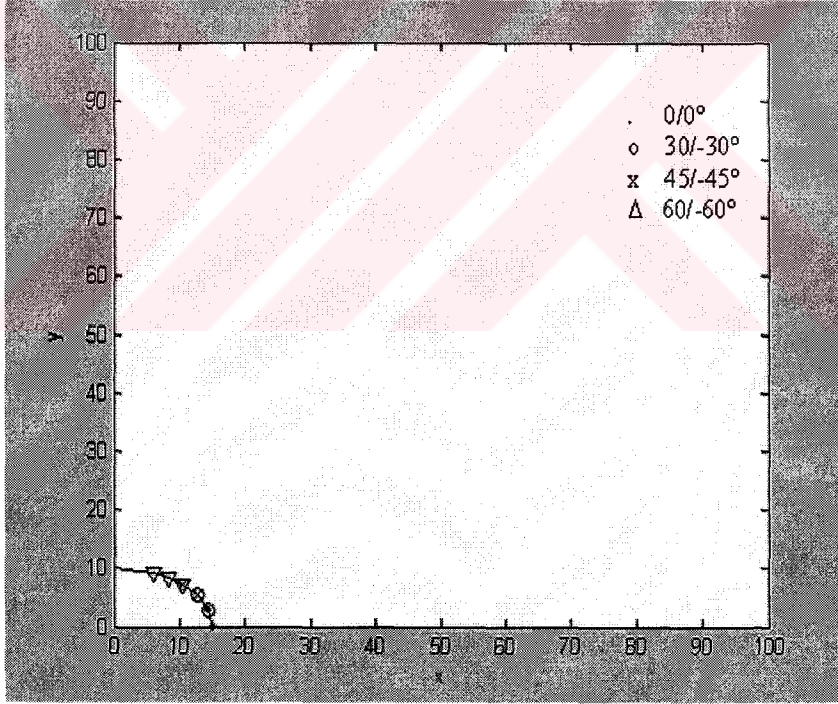


d) 0/0 100 iterasyon

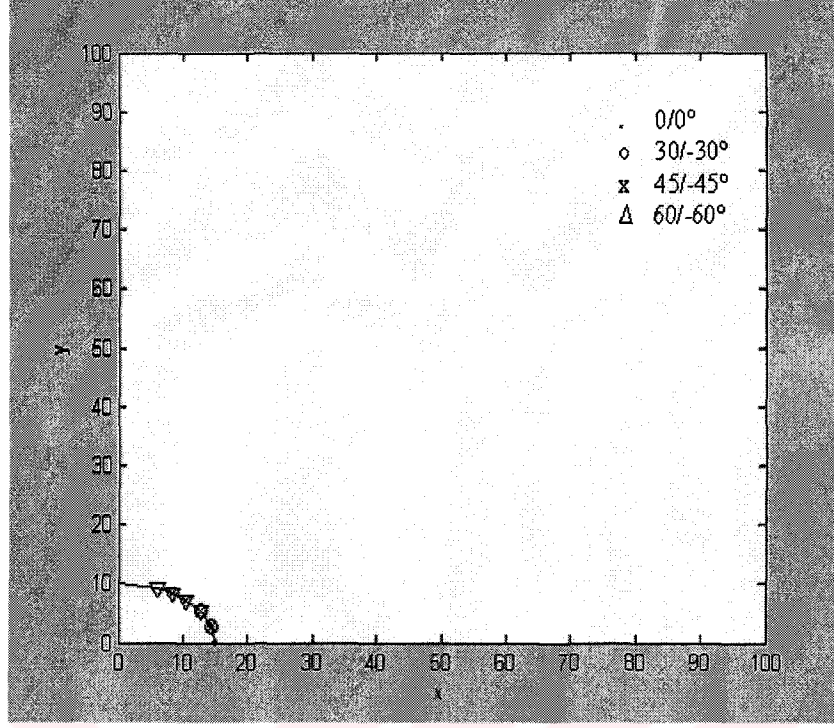
Şekil 10.4 Basit mesnetli 0/0 dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakadaki plastik bölge dağılımı(üst tabaka)



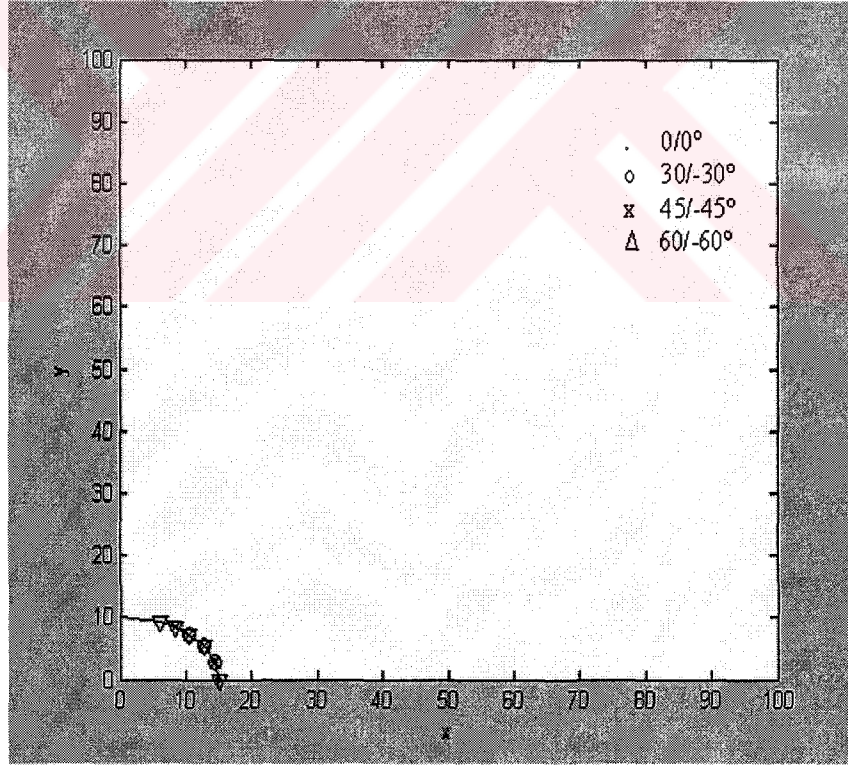
Şekil 10.5 25 iterasyon toplu grafikleri



Şekil 10.6 50 iterasyon toplu grafikleri



Şekil 10.7 75 iterasyon toplu grafikleri



Şekil 10.8 100 iterasyon toplu grafikleri

Şekil 10.5'te 25 iterasyonda plastik bölge dağılımlarının toplu grafikleri görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip tabakada plastik bölgenin çok erken ve eliptik

deliğin B noktasında başladığı, bunu sırasıyla $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip tabaka, $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip tabaka ve en sonda plastik bölgenin geç olduğu $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip tabaka izlemektedir.

Şekil 10.6, Şekil 10.7, Şekil 10.8' de iterasyon sayılarına bağlı olarak plastik bölgelerin açılara göre dağılımındaki artışlar gösterilmektedir. 100 iterasyon toplu grafiğinde de görüldüğü gibi açılara bağlı olarak plastik bölge eliptik deliğin B noktasından başlayıp, deliğin çevresi boyunca üst kısımlarına doğru oluşmaktadır.

10.2 Yükleme Basamaklarında elde edilen Elastik, Plastik, Elasto-Plastik ve Artık Gerilme değerleri

Tablo 10.2' den Tablo 10.17'e kadar basit mesnetli $[45^0/-45^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[0^0/0^0]$ dizilimleri için simetrik istiflenmede, üst ve alt yüzeydeki maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25, 50, 75, 100 iterasyondaki değerlerini göstermektedir. Bu tablolarda plastik, elastik, elasto-plastik gerilme bileşenleri; $\sigma_{xx}=S_{xx}$, $\sigma_{yy}=S_{yy}$, $\tau_{xy}=S_{xy}$, $\tau_{yz}=S_{yz}$, $\tau_{xz}=S_{xz}$ şeklinde olup, artık gerilme bileşenleri; RS_{xx} , RS_{yy} , RS_{xy} , RS_{yz} , RS_{xz} şeklinde gösterilmiştir.

Tablo 10.2' den Tablo 10.17'e kadar yükleme adımlarına göre her açıda tabakalarda ortaya çıkan gerilme değerleri verilmiştir. Bu tablolardan da görülebileceği gibi elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenleri yükleme adımlarının artırılması ile birlikte artmaktadır.

Ayrıca, simetrik olmasından kaynaklı orta düzleme göre aynı mesafedeki plakalarda oluşan elastik, plastik, elasto plastik ve artık gerilme değerleri mutlak değerce aynı kalmaktadır. Buda kullanılan bilgisayar programının doğru çalıştığının kanıtlanması açısından önemlidir.

Tablo 10.2'de görüldüğü gibi $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 25 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0251 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yine yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin olduğu görülmüştür.

Tablo 10.3'de $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 50 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0251 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yine iterasyon sayısına bağlı olarak 50 iterasyonda ortaya çıkan elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25 iterasyonda elde edilen

değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Yine yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.4 'de $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 75 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0251 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yine iterasyon sayısına bağlı olarak 75 iterasyonda ortaya çıkan elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 50 iterasyonda elde edilen değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Yine yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.5 'de $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 100 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0251 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. Yine iterasyon sayısına bağlı olarak 100 iterasyonda ortaya çıkan elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 75 iterasyonda elde edilen değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Yine yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.6'de $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 25 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0679 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.7 'de $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 50 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0679 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. Yine iterasyon sayısına bağlı olarak 50 iterasyonda ortaya çıkan elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25 iterasyonda elde edilen değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.8'de $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 75 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0679 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. Yine iterasyon sayısına bağlı olarak 75 iterasyonda ortaya çıkan elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 50 iterasyonda elde edilen değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.9'de $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 100 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0679 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür. 100 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25, 50 ve 75 iterasyonda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.10'da $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 25 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0777 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 10.11'da $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 50 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0777 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür. 50 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25 iterasyonda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.12'de $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 75 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0777 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6., ve 7. tabakalara göre daha

fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin olduğu görülmüştür. 75 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25 ve 50 iterasyonda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.13'de $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 100 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0777 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin olduğu görülmüştür. 100 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25, 50 ve 75 iterasyonlarda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.14'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 25 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0495 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin olduğu görülmüştür.

Tablo 10.15'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 50 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa 'lık artışlarla p:0.0495 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin olduğu görülmüştür. 50 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25 iterasyonda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.16'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 75 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa'lık artışlarla p:0.0495 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik, plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5.,6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin olduğu görülmüştür. 75 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25 ve 50 iterasyonlarda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.17’de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş tabakada 100 iterasyona göre ortaya çıkan plastik, elastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerleri verilmiştir. 0.0001 MPa ‘lık artışlarla p:0.0495 MPa sabit yüklemde alt ve üst tabakalarda elastik,plastik ve elasto-plastik gerilme değerlerinin 2., 3., 4., 5., 6. ve 7. tabakalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum gerilmeler alt ve üst tabakada oluşmuştur. yz ve xz düzlemlerinde eşit kayma gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür. 100 iterasyonda meydana gelen elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme değerlerinin 25, 50 ve 75 iterasyonlarda ortaya çıkan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10.2 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

45/-45	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(45)	13.965	17.516	-9.349	2.078	2.013
	2(45)	9.975	12.511	-6.678	2.078	2.013
	3(-45)	5.985	7.507	-4.007	2.078	2.013
	4(-45)	1.995	2.502	-1.336	2.078	2.013
	5(-45)	-1.995	-2.502	1.336	2.078	2.013
	6(-45)	-5.985	-7.507	4.007	2.078	2.013
	7(45)	-9.975	-12.511	6.678	2.078	2.013
	8(45)	-13.965	-17.516	9.349	2.078	2.013

45/-45	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(45)	13.916	17.419	-9.353	2.079	2.014
	2(45)	9.949	12.442	-6.681	2.079	2.014
	3(-45)	5.969	7.465	-4.008	2.079	2.014
	4(-45)	1.988	2.488	-1.336	2.079	2.014
	5(-45)	-1.988	-2.488	1.336	2.079	2.014
	6(-45)	-5.969	-7.465	4.008	2.079	2.014
	7(45)	-9.949	-12.442	6.681	2.079	2.014
	8(45)	-13.916	-17.419	9.353	2.079	2.014

45/-45	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(45)	-0.360	-0.324	0.267	-0.015	0.027
	2(45)	0.117	0.144	-0.080	-0.015	0.027
	3(-45)	0.070	0.086	-0.048	-0.015	0.027
	4(-45)	0.023	0.029	-0.016	-0.015	0.027
	5(-45)	-0.023	-0.029	0.016	-0.015	0.027
	6(-45)	-0.070	-0.086	0.048	-0.015	0.027
	7(45)	-0.117	-0.144	0.080	-0.015	0.027
	8(45)	0.360	0.324	-0.267	-0.015	0.027

45/-45	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(45)	14.325	17.840	-9.616	2.093	1.986
	2(45)	9.858	12.367	-6.598	2.093	1.986
	3(-45)	5.915	7.421	-3.959	2.093	1.986
	4(-45)	1.972	2.473	-1.320	2.093	1.986
	5(-45)	-1.972	-2.473	1.320	2.093	1.986
	6(-45)	-5.915	-7.421	3.959	2.093	1.986
	7(45)	-9.858	-12.367	6.598	2.093	1.986
	8(45)	-14.325	-17.840	9.616	2.093	1.986

Tablo 10.3 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

45/-45	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(45)	14.385	18.042	-9.631	2.140	2.073
	2(45)	10.275	12.887	-6.879	2.140	2.073
	3(-45)	6.165	7.732	-4.127	2.140	2.073
	4(-45)	2.055	2.577	-1.376	2.140	2.073
	5(-45)	-2.055	-2.577	1.376	2.140	2.073
	6(-45)	-6.165	-7.732	4.127	2.140	2.073
	7(45)	-10.275	-12.887	6.879	2.140	2.073
	8(45)	-14.385	-18.042	9.631	2.140	2.073

45/-45	Tabaka	Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(45)	14.334	17.844	-9.638	2.144	2.076
	2(45)	10.349	12.746	-6.884	2.144	2.076
	3(-45)	6.209	7.648	-4.131	2.144	2.076
	4(-45)	2.070	2.549	-1.377	2.144	2.076
	5(-45)	-2.070	-2.549	1.377	2.144	2.076
	6(-45)	-6.209	-7.648	4.131	2.144	2.076
	7(45)	-10.349	-12.746	6.884	2.144	2.076
	8(45)	-14.334	-17.844	9.638	2.144	2.076

45/-45	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(45)	-0.721	-0.646	0.529	-0.030	0.054
	2(45)	0.235	0.278	-0.175	-0.030	-0.055
	3(-45)	0.141	0.167	-0.105	-0.030	-0.055
	4(-45)	0.047	0.056	-0.035	-0.030	-0.055
	5(-45)	-0.047	-0.056	0.035	-0.030	-0.055
	6(-45)	-0.141	-0.167	0.105	-0.030	-0.055
	7(45)	-0.235	-0.278	0.175	-0.030	-0.055
	8(45)	0.721	0.646	-0.529	-0.030	0.054

45/-45	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(45)	15.106	18.688	-10.160	2.170	2.019
	2(45)	10.040	12.609	-6.704	2.170	2.128
	3(-45)	6.024	7.565	-4.022	2.170	2.128
	4(-45)	2.008	2.521	-1.341	2.170	2.128
	5(-45)	-2.008	-2.521	1.341	2.170	2.128
	6(-45)	-6.024	-7.565	4.022	2.170	2.128
	7(45)	-10.040	-12.609	6.704	2.170	2.128
	8(45)	-15.106	-18.688	10.160	2.170	2.019

Tablo 10.4 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

45/-45	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(45)	14.805	18.569	-9.912	2.203	2.134
	2(45)	10.575	13.264	-7.080	2.203	2.134
	3(-45)	6.345	7.958	-4.248	2.203	2.134
	4(-45)	2.115	2.653	-1.416	2.203	2.134
	5(-45)	-2.115	-2.653	1.416	2.203	2.134
	6(-45)	-6.345	-7.958	4.248	2.203	2.134
	7(45)	-10.575	-13.264	7.080	2.203	2.134
	8(45)	-14.805	-18.569	9.912	2.203	2.134

45/-45	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(45)	14.536	18.294	-9.925	2.209	2.138
	2(45)	10.774	13.067	-7.089	2.209	2.138
	3(-45)	6.464	7.840	-4.254	2.209	2.138
	4(-45)	2.155	2.613	-1.418	2.209	2.138
	5(-45)	-2.155	-2.618	1.481	2.209	2.138
	6(-45)	-6.464	-7.840	4.254	2.209	2.138
	7(45)	-10.774	-13.067	7.089	2.209	2.138
	8(45)	-14.536	-18.294	9.925	2.209	2.138

45/-45	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(45)	-1.080	-0.965	0.795	-0.047	0.068
	2(45)	0.369	0.438	-0.279	-0.047	0.076
	3(-45)	0.222	0.263	-0.167	-0.047	0.076
	4(-45)	0.074	0.088	-0.056	-0.047	0.076
	5(-45)	-0.074	-0.088	0.056	-0.047	0.076
	6(-45)	-0.222	-0.263	0.167	-0.047	0.076
	7(45)	-0.369	-0.438	0.279	-0.047	0.076
	8(45)	1.080	0.965	-0.795	-0.047	0.068

45/-45	Tabaka	Elasto -Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(45)	15.885	19.534	-10.707	2.250	2.066
	2(45)	10.206	12.826	-6.801	2.250	2.058
	3(-45)	6.123	7.695	-4.081	2.250	2.058
	4(-45)	2.041	2.565	-1.360	2.250	2.058
	5(-45)	-2.041	-2.565	1.360	2.250	2.058
	6(-45)	-6.123	-7.695	4.081	2.250	2.058
	7(45)	-10.206	-12.826	6.801	2.250	2.058
	8(45)	-15.885	-19.534	10.707	2.250	2.058

Tablo 10.5 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[45^0/-45^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

45/-45	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(45)	15,226	19.096	-10.193	2.265	2.194
	2(45)	10.875	13.640	-7.281	2.265	2.194
	3(-45)	6.525	8.184	-4.368	2.265	2.194
	4(-45)	2.175	2.728	-1.456	2.265	2.194
	5(-45)	-2.175	-2.728	1.456	2.265	2.194
	6(-45)	-6.525	-8.184	4.368	2.265	2.194
	7(45)	-10.875	-13.640	7.281	2.265	2.194
	8(45)	-15.226	-19.096	10.193	2.265	2.194

45/-45	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(45)	14.880	18.767	-10.213	2.275	2.201
	2(45)	10.917	13.405	-7.295	2.275	2.201
	3(-45)	6.735	8.043	-4.377	2.275	2.201
	4(-45)	2.245	2.681	-1.459	2.275	2.201
	5(-45)	-2.245	-2.681	1.459	2.275	2.201
	6(-45)	-6.735	-8.043	4.377	2.275	2.201
	7(45)	-10.917	-13.405	7.295	2.275	2.201
	8(45)	-14.880	-18.767	10.213	2.275	2.201

45/-45	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(45)	-1.438	-1.280	1.077	-0.066	0.068
	2(45)	0.506	0.627	-0.388	-0.067	0.092
	3(-45)	0.303	0.376	-0.233	-0.067	0.092
	4(-45)	0.101	0.125	-0.078	-0.067	0.092
	5(-45)	-0.101	-0.125	0.078	-0.067	0.092
	6(-45)	-0.303	-0.376	0.233	-0.067	0.092
	7(45)	-0.506	-0.627	0.388	-0.067	0.092
	8(45)	1.438	1.280	-1.077	-0.066	0.068

45/-45	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(45)	16.664	20.376	-11.270	2.331	2.126
	2(45)	10.369	13.013	-6.893	2.332	2.173
	3(-45)	6.222	7.808	-4.135	2.332	2.173
	4(-45)	2.074	2.603	-1.378	2.332	2.173
	5(-45)	-2.074	-2.603	1.378	2.332	2.173
	6(-45)	-6.222	-7.808	4.135	2.332	2.173
	7(45)	-10.369	-13.013	6.893	2.332	2.173
	8(45)	-16.664	-20.376	11.270	2.331	2.173

Tablo 10.6 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

30/-30	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(30)	13.037	18.182	-6.745	1.901	2.029
	2(30)	9.312	12.987	-4.818	1.901	2.029
	3(-30)	6.477	7.974	-2.987	1.901	2.029
	4(-30)	2.159	2.658	-0.996	1.901	2.029
	5(-30)	-2.159	-2.658	0.996	1.901	2.029
	6(-30)	-6.477	-7.974	2.987	1.901	2.029
	7(30)	-9.312	-12.987	4.818	1.901	2.029
	8(30)	-13.037	-18.182	6.745	1.901	2.029

30/-30	Tabaka	Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(30)	13.029	18.238	-6.747	1.903	2.031
	2(30)	9.307	13.027	-4.878	1.903	2.031
	3(-30)	6.438	6.836	-2.989	1.903	2.031
	4(-30)	2.146	2.641	-0.996	1.903	2.031
	5(-30)	-2.146	-2.641	0.996	1.903	2.031
	6(-30)	-6.438	-6.836	2.989	1.903	2.031
	7(30)	-9.307	-13.027	4.878	1.903	2.031
	8(30)	-13.029	-18.238	6.747	1.903	2.031

30/-30	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(30)	-0.182	-0.551	0.331	-0.022	0.025
	2(30)	0.129	0.263	-0.107	-0.022	0.025
	3(-30)	0.118	0.117	-0.031	-0.022	0.025
	4(-30)	0.039	0.039	-0.010	-0.022	0.025
	5(-30)	-0.039	-0.039	0.010	-0.022	0.025
	6(-30)	-0.118	-0.117	0.031	-0.022	0.025
	7(30)	-0.129	-0.263	0.107	-0.022	0.025
	8(30)	0.182	0.551	-0.331	-0.022	0.025

30/-30	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(30)	13.219	18.733	-7.076	1.923	2.004
	2(30)	9.183	12.724	-4.711	1.923	2.004
	3(-30)	6.359	7.857	-2.956	1.923	2.004
	4(-30)	2.120	2.619	-0.986	1.923	2.004
	5(-30)	-2.120	-2.619	0.986	1.923	2.004
	6(-30)	-6.359	-7.857	2.956	1.923	2.004
	7(30)	-9.183	-12.724	4.711	1.923	2.004
	8(30)	-13.219	-18.733	7.076	1.923	2.004

Tablo 10.7 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

30/-30	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(30)	13.499	18.827	-6.984	1.969	2.101
	2(30)	9.642	13.448	-4.989	1.969	2.101
	3(-30)	6.706	8.256	-3.093	1.969	2.101
	4(-30)	2.235	2.752	-1.031	1.969	2.101
	5(-30)	-2.235	-2.752	1.031	1.969	2.101
	6(-30)	-6.706	-8.256	3.093	1.969	2.101
	7(30)	-9.642	-13.448	4.989	1.969	2.101
	8(30)	-13.499	-18.827	6.984	1.969	2.101

30/-30	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(30)	13.478	18.581	6.991	1.972	2.104
	2(30)	9.627	13.646	-5.204	1.972	2.104
	3(-30)	6.625	8.183	-3.096	1.972	2.104
	4(-30)	2.208	2.728	-1.032	1.972	2.104
	5(-30)	-2.208	-2.728	1.032	1.972	2.104
	6(-30)	-6.625	-8.183	3.096	1.972	2.104
	7(30)	-9.627	-13.646	5.204	1.972	2.104
	8(30)	-13.478	-18.581	-6.991	1.972	2.104

30/-30	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(30)	-0.328	-1.061	0.649	-0.050	0.034
	2(30)	0.317	0.634	-0.263	-0.050	0.044
	3(-30)	0.297	0.274	-0.082	-0.050	0.044
	4(-30)	0.099	0.091	-0.027	-0.050	0.044
	5(-30)	-0.099	-0.091	0.027	-0.050	0.044
	6(-30)	-0.297	-0.274	0.082	-0.050	0.044
	7(30)	-0.317	-0.634	0.263	-0.050	0.044
	8(30)	0.328	1.061	-0.649	-0.050	0.034

30/-30	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(30)	13.827	19.888	-7.633	2.019	2.067
	2(30)	9.325	12.814	-4.726	2.019	2.057
	3(-30)	6.409	7.982	-3.011	2.019	2.057
	4(-30)	2.136	2.661	-1.004	2.019	2.057
	5(-30)	-2.136	-2.661	1.004	2.019	2.057
	6(-30)	-6.409	-7.982	3.011	2.019	2.057
	7(30)	-9.325	-12.814	4.726	2.019	2.057
	8(30)	-13.827	-19.888	7.633	2.019	2.067

Tablo 10.8 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

30/-30	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(30)	13.962	19.472	-7.223	2.036	2.173
	2(30)	9.973	13.908	-5.159	2.036	2.173
	3(-30)	6.936	8.539	-3.199	2.036	2.173
	4(-30)	2.312	2.846	-1.066	2.036	2.173
	5(-30)	-2.312	-2.846	1.066	2.036	2.173
	6(-30)	-6.936	-8.539	3.199	2.036	2.173
	7(30)	-9.973	-13.908	5.159	2.036	2.173
	8(30)	-13.962	-19.472	7.223	2.036	2.173

30/-30	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(30)	13.926	19.171	-7.235	2.042	2.178
	2(30)	9.947	13.694	-5.540	2.042	2.178
	3(-30)	6.898	8.447	-3.097	2.042	2.178
	4(-30)	2.299	2.816	-1.068	2.042	2.178
	5(-30)	-2.299	-2.816	1.068	2.042	2.178
	6(-30)	-6.898	-8.447	3.097	2.042	2.178
	7(30)	-9.947	-13.694	5.540	2.042	2.178
	8(30)	-13.926	-19.171	7.235	2.042	2.178

30/-30	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(30)	-0.514	-1.577	0.966	-0.079	0.065
	2(30)	0.522	1.033	-0.431	-0.080	0.065
	3(-30)	0.489	0.444	-0.140	-0.080	0.065
	4(-30)	0.163	0.148	-0.047	-0.080	0.065
	5(-30)	-0.163	-0.148	0.047	-0.080	0.065
	6(-30)	-0.489	-0.444	0.140	-0.080	0.065
	7(30)	-0.522	-1.033	0.431	-0.080	0.065
	8(30)	0.514	1.577	-0.966	-0.079	0.065

30/-30	Tabaka	Elasto -Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(30)	14.476	21.049	-8.189	2.115	2.108
	2(30)	9.451	12.875	-4.728	2.116	2.108
	3(-30)	6.447	8.095	-3.059	2.116	2.108
	4(-30)	2.149	2.698	-1.219	2.116	2.108
	5(-30)	-2.149	-2.698	1.019	2.116	2.108
	6(-30)	-6.447	-8.095	3.059	2.116	2.108
	7(30)	-9.451	-12.875	4.728	2.116	2.108
	8(30)	-14.476	-21.049	8.189	2.115	2.108

Tablo 10.9 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[30^0/-30^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

30/-30	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(30)	14.424	20.116	-7.462	2.104	2.245
	2(30)	10.303	14.369	-5.330	2.104	2.245
	3(-30)	7.166	8.822	-3.305	2.104	2.245
	4(-30)	2.389	2.941	-1.102	2.104	2.245
	5(-30)	-2.389	-2.941	1.102	2.104	2.245
	6(-30)	-7.166	-8.822	3.305	2.104	2.245
	7(30)	-10.303	-14.369	5.330	2.104	2.245
	8(30)	-14.424	-20.116	7.462	2.104	2.245

30/-30	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(30)	14.373	19.746	-7.479	2.113	2.253
	2(30)	10.266	15.303	-5.867	2.113	2.253
	3(-30)	7.288	8.704	-3.313	2.113	2.253
	4(-30)	2.429	2.901	-1.104	2.113	2.253
	5(-30)	-2.429	-2.901	1.104	2.113	2.253
	6(-30)	-7.288	-8.704	-3.313	2.113	2.253
	7(30)	-10.266	-15.303	5.867	2.113	2.253
	8(30)	-14.373	-19.746	7.479	2.113	2.253

30/-30	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(30)	-0.806	-2.102	1.278	-0.107	0.097
	2(30)	0.711	1.411	-0.588	-0.109	0.097
	3(-30)	0.667	0.606	-0.190	-0.109	0.097
	4(-30)	0.222	0.202	-0.063	-0.109	0.097
	5(-30)	-0.222	-0.202	0.063	-0.109	0.097
	6(-30)	-0.667	-0.606	0.190	-0.109	0.097
	7(30)	-0.711	-1.411	0.588	-0.109	0.097
	8(30)	0.806	2.102	-1.278	-0.107	0.097

30/-30	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(30)	15.230	22.218	-8.740	2.211	2.148
	2(30)	9.592	12.958	-4.742	2.354	2.148
	3(-30)	6.499	8.126	-3.115	2.354	2.148
	4(-30)	2.167	2.739	-1.039	2.354	2.148
	5(-30)	-2.167	-2.739	1.039	2.354	2.148
	6(-30)	-6.499	-8.216	3.115	2.354	2.148
	7(30)	-9.592	-12.958	4.742	2.354	2.148
	8(30)	-15.230	-22.218	8.740	2.211	2.148

Tablo 10.10 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

60/-60	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tab aka, 25 iterasyon	1(60)	17.068	18.434	-7.747	2.383	1.864
	2(60)	12.192	13.167	-5.553	2.383	1.864
	3(-60)	6.909	9.096	-3.376	2.383	1.864
	4(-60)	2.303	3.032	-1.125	2.383	1.864
	5(-60)	-2.303	-3.032	1.125	2.383	1.864
	6(-60)	-6.909	-9.096	3.376	2.383	1.864
	7(60)	-12.192	-13.167	5.553	2.383	1.864
	8(60)	-17.068	-18.434	7.747	2.383	1.864

60/-60	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tab aka, 25 iterasyon	1(60)	16.738	18.424	-7.750	2.385	1.865
	2(60)	12.521	13.160	-5.535	2.385	1.865
	3(-60)	6.888	9.093	-3.378	2.385	1.865
	4(-60)	2.296	3.031	-1.126	2.385	1.865
	5(-60)	-2.296	-3.031	1.126	2.385	1.865
	6(-60)	-6.888	-9.093	3.378	2.385	1.865
	7(60)	-12.521	-13.160	5.535	2.385	1.865
	8(60)	-16.738	-18.424	7.750	2.385	1.865

60/-60	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tab aka, 25 iterasyon	1(60)	-0.477	-0.121	0.297	-0.014	0.027
	2(60)	0.329	0.173	-0.145	0.006	0.033
	3(-60)	0.132	0.169	-0.061	0.006	0.033
	4(-60)	0.044	0.056	-0.020	0.006	0.033
	5(-60)	-0.044	-0.056	0.020	0.006	0.033
	6(-60)	-0.132	-0.169	0.061	0.006	0.033
	7(60)	-0.329	-0.173	0.145	0.006	0.033
	8(60)	0.477	0.121	-0.297	-0.014	0.027

60/-60	Tabaka	Elasto - Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tab aka, 25 İterasyon	1(60)	17.545	18.555	-8.044	2.397	1.837
	2(60)	11.863	12.994	-5.408	2.377	1.831
	3(-60)	6.777	8.927	-3.315	2.377	1.831
	4(-60)	2.259	2.976	-1.105	2.377	1.831
	5(-60)	-2.259	-2.976	1.105	2.377	1.831
	6(-60)	-6.777	-8.927	3.315	2.377	1.831
	7(60)	-11.863	-12.994	5.408	2.377	1.831
	8(60)	-17.545	-18.555	8.044	2.397	1.837

Tablo 10.11 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

60/-60	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tab aka, 50 iterasyon	1(60)	17.600	19.008	-7.988	2.458	1.922
	2(60)	12.571	13.577	-5.706	2.458	1.922
	3(-60)	7.125	9.379	-3.481	2.458	1.922
	4(-60)	2.375	3.126	-1.160	2.458	1.922
	5(-60)	-2.375	-3.126	1.160	2.458	1.922
	6(-60)	-7.125	-9.379	3.481	2.458	1.922
	7(60)	-12.571	-13.577	5.706	2.458	1.922
	8(60)	-17.600	-19.008	7.988	2.458	1.922

60/-60	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tab aka, 50 iterasyon	1(60)	17.253	18.984	-7.994	2.461	1.924
	2(60)	13.263	13.560	-5.710	2.461	1.924
	3(-60)	7.078	9.372	-3.486	2.461	1.924
	4(-60)	2.359	3.124	-1.162	2.461	1.924
	5(-60)	-2.359	-3.124	1.162	2.461	1.924
	6(-60)	-7.078	-9.372	3.486	2.461	1.924
	7(60)	-13.263	-13.560	5.710	2.461	1.924
	8(60)	-17.253	-18.984	7.994	2.461	1.924

60/-60	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tab aka 50 iterasyon	1(60)	-0.917	-0.264	0.577	-0.034	0.047
	2(60)	0.692	0.362	-0.303	-0.013	0.063
	3(-60)	0.278	0.354	-0.127	-0.013	0.063
	4(-60)	0.093	0.118	-0.042	-0.013	0.063
	5(-60)	-0.093	-0.118	0.042	-0.013	0.063
	6(-60)	-0.278	-0.354	0.127	-0.013	0.063
	7(60)	-0.692	-0.362	0.303	-0.013	0.063
	8(60)	0.917	0.264	-0.577	-0.034	0.047

60/-60	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tab aka 50 iterasyon	1(60)	18.517	19.272	-8.565	2.492	1.875
	2(60)	11.879	13.215	-5.403	2.471	1.853
	3(-60)	6.847	9.025	-3.354	2.471	1.853
	4(-60)	2.257	3.008	-1.118	2.471	1.853
	5(-60)	-2.257	-3.008	1.118	2.471	1.853
	6(-60)	-6.847	-9.025	3.354	2.471	1.853
	7(60)	-11.879	-13.215	5.403	2.471	1.853
	8(60)	-18.517	-19.272	8.565	2.492	1.875

Tablo 10.12 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^\circ/-60^\circ]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

60/-60	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tab aka 75 iterasyon	1(60)	18.131	19.582	-8.229	2.532	1.980
	2(60)	12.951	13.987	-5.878	2.532	1.980
	3(-60)	7.340	9.663	-3.586	2.532	1.980
	4(-60)	2.447	3.221	-1.195	2.532	1.980
	5(-60)	-2.447	-3.221	1.195	2.532	1.980
	6(-60)	-7.340	-9.663	3.586	2.532	1.980
	7(60)	-12.951	-13.987	5.878	2.532	1.980
	8(60)	-18.131	-19.582	8.229	2.532	1.980

60/-60	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(60)	17.344	19.520	-8.241	2.538	1.984
	2(60)	13.893	13.943	-5.886	2.538	1.984
	3(-60)	7.254	9.658	-3.612	2.538	1.984
	4(-60)	2.418	3.219	-1.204	2.538	1.984
	5(-60)	-2.418	-3.219	1.204	2.538	1.984
	6(-60)	-7.254	-9.658	3.612	2.538	1.984
	7(60)	-13.893	13.943	5.886	2.538	1.984
	8(60)	-17.344	-19.520	8.241	2.538	1.984

60/-60	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(60)	- 1.386	-0.437	0.840	-0.054	-0.060
	2(60)	0.942	0.496	-0.422	0.023	0.081
	3(-60)	0.371	0.492	-0.186	0.023	0.081
	4(-60)	0.124	0.164	-0.062	0.023	0.081
	5(-60)	- 0.124	-0.164	0.062	0.023	0.081
	6(-60)	- 0.371	-0.492	0.186	0.023	0.081
	7(60)	- 0.942	-0.496	0.422	0.023	0.081
	8(60)	1.386	0.437	-0.840	-0.054	-0.060

60/-60	Tabaka	Elasto -Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(60)	19.517	20.019	-9.069	2.586	2.040
	2(60)	12.009	13.491	-5.456	2.509	1.899
	3(-60)	6.969	9.171	-3.400	2.509	1.899
	4(-60)	2.323	3.057	-1.133	2.509	1.899
	5(-60)	-2.323	-3.057	1.133	2.509	1.899
	6(-60)	-6.969	-9.171	3.400	2.509	1.899
	7(60)	-12.009	-13.491	5.456	2.509	1.899
	8(60)	-19.517	-20.019	9.069	2.586	2.040

Tablo 10.13 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[60^0/-60^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

60/-60	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(60)	18.663	20.156	-8.470	2.606	2.038
	2(60)	13.330	14.397	-6.050	2.606	2.038
	3(-60)	7.555	9.946	-3.692	2.606	2.038
	4(-60)	2.518	3.315	-1.231	2.606	2.038
	5(-60)	-2.518	-3.315	1.231	2.606	2.038
	6(-60)	-7.555	-9.946	3.692	2.606	2.038
	7(60)	-13.330	-14.397	6.050	2.606	2.038
	8(60)	-18.663	-20.156	8.470	2.606	2.038

60/-60	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(60)	17.618	19.899	-8.488	2.616	2.045
	2(60)	14.461	14.357	-6.063	2.616	2.045
	3(-60)	7.427	9.958	-3.755	2.616	2.045
	4(-60)	2.476	3.319	-1.252	2.616	2.045
	5(-60)	-2.476	-3.319	1.252	2.616	2.045
	6(-60)	-7.427	-9.958	3.755	2.616	2.045
	7(60)	-14.461	-14.357	6.063	2.616	2.045
	8(60)	-17.618	-19.899	8.488	2.616	2.045

60/-60	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(60)	-1.871	-0.624	1.092	-0.073	-0.081
	2(60)	1.131	0.581	-0.518	0.034	-0.093
	3(-60)	0.439	0.588	-0.229	0.034	-0.093
	4(-60)	0.146	0.196	-0.076	0.034	-0.093
	5(-60)	-0.146	-0.196	0.076	0.034	-0.093
	6(-60)	-0.439	-0.588	0.229	0.034	-0.093
	7(60)	-1.131	-0.581	0.518	0.034	-0.093
	8(60)	1.871	0.624	-1.092	-0.073	-0.081

60/-60	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(60)	20.534	20.780	-9.562	2.679	2.119
	2(60)	12.199	13.816	-5.532	2.572	2.131
	3(-60)	7.116	9.358	-3.463	2.572	2.131
	4(-60)	2.372	3.119	-1.155	2.572	2.131
	5(-60)	-2.372	-3.119	1.155	2.572	2.131
	6(-60)	-7.116	-9.358	3.463	2.572	2.131
	7(60)	-12.199	-13.816	5.532	2.572	2.131
	8(60)	-20.534	-20.780	9.562	2.679	2.119

Tablo 10.14 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 25 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

0/0	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(0)	17.087	21.657	-1.557	2.089	1.715
	2(0)	12.205	15.470	-1.112	2.089	1.715
	3(0)	7.323	9.282	-0.667	2.089	1.715
	4(0)	2.445	3.094	-0.222	2.089	1.715
	5(0)	-2.445	-3.094	0.222	2.089	1.715
	6(0)	-7.323	-9.282	0.667	2.089	1.715
	7(0)	-12.205	-15.470	1.112	2.089	1.715
	8(0)	-17.087	-21.657	1.557	2.089	1.715

0/0	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(0)	17.095	20.626	-1.558	2.091	1.716
	2(0)	12.210	15.875	-1.113	2.091	1.716
	3(0)	7.326	9.525	-0.668	2.091	1.716
	4(0)	2.442	3.175	-0.223	2.091	1.716
	5(0)	-2.442	-3.175	0.223	2.091	1.716
	6(0)	-7.326	-9.525	0.668	2.091	1.716
	7(0)	-12.210	-15.875	1.113	2.091	1.716
	8(0)	-17.095	-20.626	1.558	2.091	1.716

0/0	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(0)	0.035	-1.032	-0.021	0.033	-0.039
	2(0)	0.094	0.405	-0.015	0.033	0.015
	3(0)	0.056	0.243	-0.009	0.033	0.015
	4(0)	0.019	0.081	-0.003	0.033	0.015
	5(0)	-0.019	-0.081	0.003	0.033	0.015
	6(0)	-0.056	-0.243	0.009	0.033	0.015
	7(0)	-0.094	-0.405	0.015	0.033	0.015
	8(0)	-0.035	1.032	0.021	0.033	-0.039

0/0	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 25 İterasyon	1(0)	17.052	20.625	-1.536	2.056	1.754
	2(0)	12.111	15.065	-1.097	2.056	1.700
	3(0)	7.267	9.039	-0.658	2.056	1.700
	4(0)	2.426	3.013	-0.219	2.056	1.700
	5(0)	-2.426	-3.013	0.219	2.056	1.700
	6(0)	-7.267	-9.039	0.658	2.056	1.700
	7(0)	-12.111	-15.065	1.097	2.056	1.700
	8(0)	-17.052	-20.625	1.536	2.056	1.754

Tablo 10.15 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 50 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

0/0	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(0)	17.907	22.697	-1.632	2.189	1.797
	2(0)	12.790	16.212	-1.165	2.189	1.797
	3(0)	7.674	9.727	-0.699	2.189	1.797
	4(0)	2.558	3.242	-0.233	2.189	1.797
	5(0)	-2.558	-3.242	0.233	2.189	1.797
	6(0)	-7.674	-9.727	0.699	2.189	1.797
	7(0)	-12.790	-16.212	1.165	2.189	1.797
	8(0)	-17.907	-22.697	1.632	2.189	1.797

0/0	Tabaka	Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(0)	17.928	20.828	-1.634	2.195	1.801
	2(0)	12.806	17.081	-1.167	2.195	1.801
	3(0)	7.683	10.249	-0.700	2.195	1.801
	4(0)	2.561	3.416	-0.227	2.195	1.801
	5(0)	-2.561	-3.416	0.227	2.195	1.801
	6(0)	-7.683	-10.249	0.700	2.195	1.801
	7(0)	-12.806	-17.081	1.167	2.195	1.801
	8(0)	-17.928	-20.828	1.634	2.195	1.801

0/0	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(0)	0.032	-1.995	-0.048	0.062	-0.076
	2(0)	0.198	0.869	-0.034	0.064	0.033
	3(0)	0.119	0.521	-0.020	0.064	0.033
	4(0)	0.040	0.174	-0.007	0.064	0.033
	5(0)	-0.040	-0.174	0.007	0.064	0.033
	6(0)	-0.119	-0.521	0.020	0.064	0.033
	7(0)	-0.198	-0.869	0.034	0.064	0.033
	8(0)	-0.032	1.995	0.048	0.062	-0.076

0/0	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 50 iterasyon	1(0)	17.875	24.692	-1.584	2.127	1.873
	2(0)	12.592	15.343	-1.131	2.125	1.764
	3(0)	7.555	9.206	-0.679	2.125	1.764
	4(0)	2.518	3.068	-0.226	2.125	1.764
	5(0)	-2.518	-3.068	0.226	2.125	1.764
	6(0)	-7.555	-9.206	0.679	2.125	1.764
	7(0)	-12.592	-15.343	1.131	2.125	1.764
	8(0)	-17.875	-24.692	1.584	2.125	1.873

Tablo 10.16 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 75 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

0/0	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tab aka, 75 iterasyon	1(0)	18.727	23.736	-1.706	2.290	1.879
	2(0)	13.376	16.954	-1.219	2.290	1.879
	3(0)	8.026	10.173	-0.710	2.290	1.879
	4(0)	2.675	3.391	-0.244	2.290	1.879
	5(0)	-2.675	-3.391	0.244	2.290	1.879
	6(0)	-8.026	-10.173	0.710	2.290	1.879
	7(0)	-13.376	-16.954	1.219	2.290	1.879
	8(0)	-18.727	-23.736	1.706	2.290	1.879

0/0	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tab aka, 75 iterasyon	1(0)	18.766	20.902	-1.710	2.300	1.886
	2(0)	13.404	18.349	-1.221	2.300	1.886
	3(0)	8.042	11.009	-0.733	2.300	1.886
	4(0)	2.681	3.670	-0.244	2.300	1.886
	5(0)	-2.681	-3.670	0.244	2.300	1.886
	6(0)	-8.042	-11.009	0.733	2.300	1.886
	7(0)	-13.404	-18.349	1.221	2.300	1.886
	8(0)	-18.766	-20.902	1.710	2.300	1.886

0/0	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik tab aka, 75 iterasyon	1(0)	-0.072	-2.964	-0.077	0.088	-0.113
	2(0)	0.316	1.395	-0.055	0.095	0.053
	3(0)	0.189	0.837	-0.033	0.095	0.053
	4(0)	0.063	0.279	-0.011	0.095	0.053
	5(0)	-0.063	-0.279	0.011	0.095	0.053
	6(0)	-0.189	-0.837	0.033	0.095	0.053
	7(0)	-0.316	-1.395	0.055	0.095	0.053
	8(0)	0.072	2.964	0.077	0.088	-0.113

0/0	Tabaka	Elasto -Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik tabaka, 75 iterasyon	1(0)	18.799	26.700	-1.629	2.202	1.992
	2(0)	13.060	15.559	-1.164	2.195	1.826
	3(0)	7.837	9.336	-0.677	2.195	1.826
	4(0)	2.612	3.112	-0.233	2.195	1.826
	5(0)	-2.612	-3.112	0.233	2.195	1.826
	6(0)	-7.837	-9.336	0.677	2.195	1.826
	7(0)	-13.060	-15.559	1.164	2.195	1.826
	8(0)	-18.799	-26.700	1.629	2.202	1.992

Tablo 10.17 Tabakalı basit mesnetli simetrik plakada $[0^0/0^0]$ elde edilen maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinin 100 iterasyonluk yükleme basamaklarında elde edilen değerler

0/0	Tabaka	Elastik Gerilme(MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(0)	19.546	24.775	-1.781	2.390	1.961
	2(0)	13.962	17.697	-1.272	2.390	1.961
	3(0)	8.325	10.618	-0.763	2.390	1.961
	4(0)	2.792	3.539	-0.254	2.390	1.961
	5(0)	-2.792	-3.539	0.254	2.390	1.961
	6(0)	-8.377	-10.618	0.763	2.390	1.961
	7(0)	-13.962	-17.697	1.272	2.390	1.961
	8(0)	-19.546	-24.775	1.781	2.390	1.961

0/0	Tabaka	Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 iterasyon	1(0)	19.603	20.976	-1.786	2.404	1.972
	2(0)	14.002	19.620	-1.276	2.404	1.972
	3(0)	8.401	11.772	-0.766	2.404	1.972
	4(0)	2.800	3.924	-0.255	2.404	1.972
	5(0)	-2.800	-3.924	0.255	2.404	1.972
	6(0)	-8.401	-11.772	0.760	2.404	1.972
	7(0)	-14.002	-19.620	1.276	2.404	1.972
	8(0)	-19.603	-20.976	1.786	2.404	1.972

0/0	Tabaka	Artık Gerilme(MPa)				
		RS_{xx}	RS_{yy}	RS_{xy}	RS_{yz}	RS_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(0)	-0.166	-3.940	-0.104	0.112	-0.149
	2(0)	0.437	1.924	-0.076	0.127	0.073
	3(0)	0.262	1.154	-0.046	0.127	0.073
	4(0)	0.087	0.385	-0.015	0.127	0.073
	5(0)	-0.087	-0.385	0.015	0.127	0.073
	6(0)	-0.262	-1.154	0.046	0.127	0.073
	7(0)	-0.437	-1.924	0.076	0.127	0.073
	8(0)	0.166	3.940	0.104	0.112	-0.149

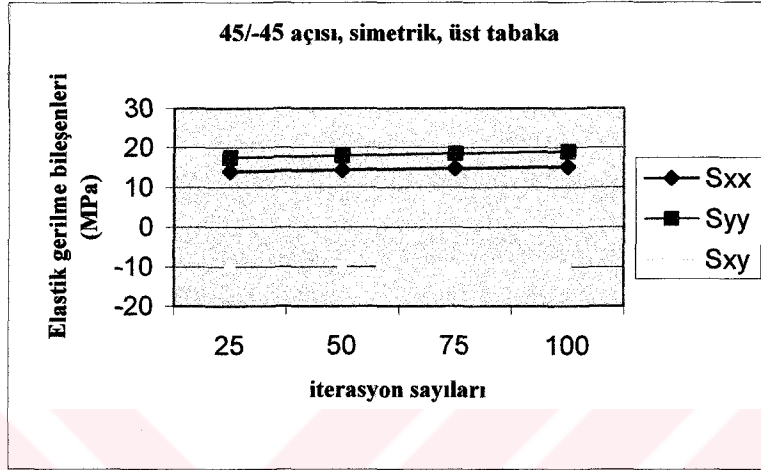
0/0	Tabaka	Elasto-Plastik Gerilmeler (MPa)				
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
Simetrik Tabaka, 100 İterasyon	1(0)	19.712	28.715	-1.677	2.278	2.110
	2(0)	13.525	15.773	-1.196	2.263	1.888
	3(0)	8.063	9.464	-0.717	2.263	1.888
	4(0)	2.705	3.154	-0.239	2.263	1.888
	5(0)	-2.705	-3.154	0.239	2.263	1.888
	6(0)	-8.063	-9.464	0.717	2.263	1.888
	7(0)	-13.525	-15.773	1.196	2.263	1.888
	8(0)	-19.712	-28.715	1.677	2.278	1.888

[45°/-45°], [30°/-30°], [60°/-60°] ve [0°/0°] dizilimine sahip simetrik tabakalanmada oluşan elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenleri iterasyon sayılarına göre incelendiği zaman bütün açılarda 1. ve 8. tabakalarda maksimum gerilmeler oluşmakta olup, ara tabakalardaki gerilmeler alt ve üst tabakalardan daha düşük elde edilmiştir. Ayrıca simetriklik özelliğinden kaynaklı, 1-8, 2-7, 3-6, 4-5. tabakalardaki gerilmeler mutlak değerce eşit olarak görülmektedir. [0°/0°] diziliminde oluşan elastik, plastik, elasto-plastik gerilmeler; [60°/-60°], [45°/-45°], [30°/-30°] dizilimlerinde oluşan gerilmelerden daha yüksek olup, en düşük gerilmeler [30°/-30°] diziliminde oluşmuştur.

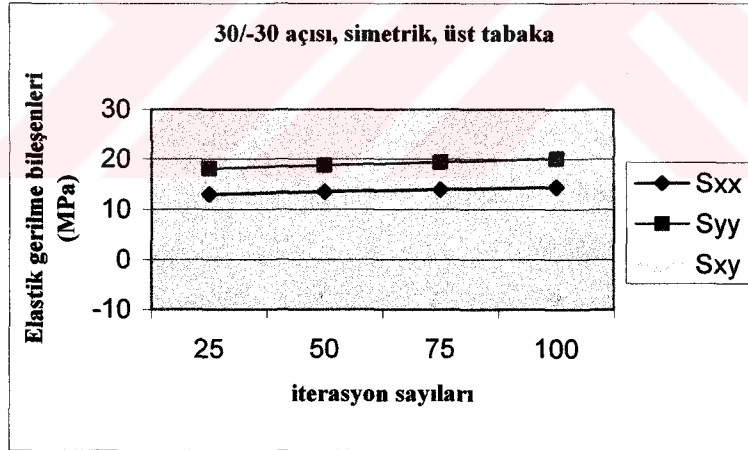
Tablolar incelendiği zaman [0°/0°] diziliminde oluşan gerilmelerin [60°/-60°] dizilimindeki gerilmelerden daha yüksek, [60°/-60°] diziliminde oluşan gerilmelerinde [45°/-45°] diziliminde oluşan gerilmelerden fazla olduğu görülmüştür.

10.3 İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Elastik Gerilme Bileşenlerinin Değişim Grafikleri

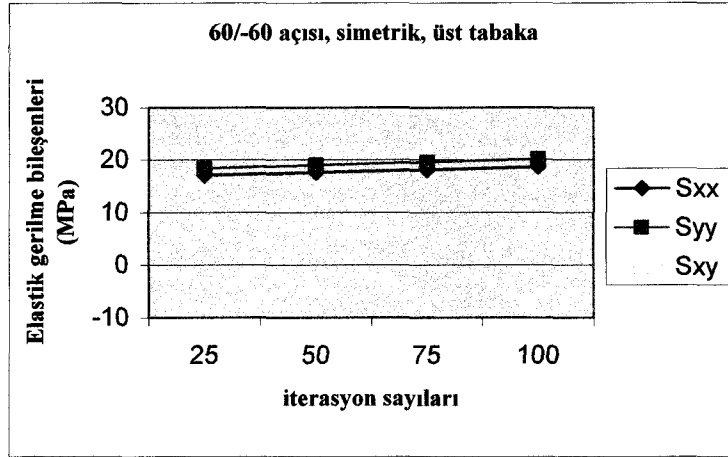
Oriyantasyon açılarına göre elde edilen elastik gerilme bileşenlerinin 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlardaki değişimi aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



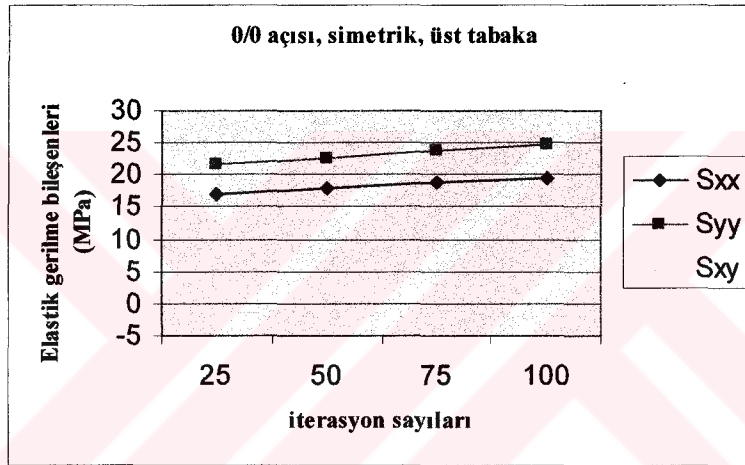
Şekil 10.9 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.10 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.11 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.12 İterasyon sayılarına göre elastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)

Şekil 10.9'da $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, elde edilen değerler grafiklere yansıtılmıştır. $[45^0/-45^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri elde edilen sonuçlardan alınarak grafik oluşturulmuştur. $[45^0/-45^0]$ diziliminde 1.tabakada ve 8.tabakada elastik gerilme bileşenlerinin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir. 1. ve 8. tabakadaki değerler, mutlak değerce aynı olup, grafikte üst tabakanın değişimi verilmiştir. Grafikteki değişimler doğru orantılı olarak elastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir.

Şekil 10.10'da $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, elde edilen değerler grafiklere yansıtılmıştır. $[30^0/-30^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. $[30^0/-30^0]$ diziliminde 1.tabakada ve 8.tabakada elastik gerilme

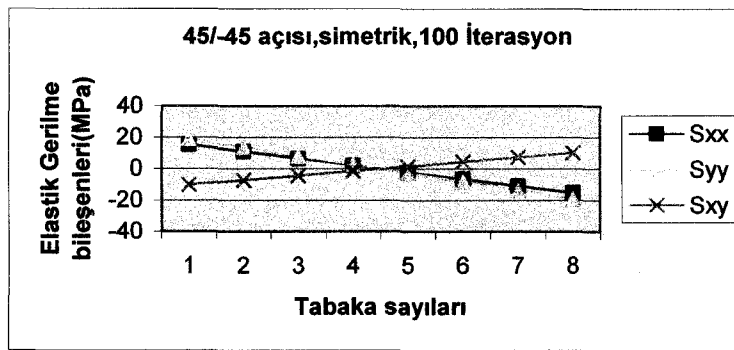
bileşenlerinin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir. 1. ve 8. tabakadaki değerler, mutlak değerce aynı olup, grafikte üst tabakanın değişimi verilmiştir. Grafikteki değişimler doğru orantılı olarak elastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir.

Şekil 10.11'de $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, elde edilen değerler grafiklere yansıtılmıştır. $[60^0/-60^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. $[60^0/-60^0]$ diziliminde 1.tabakada ve 8.tabakada elastik gerilme bileşenlerinin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir. 1. ve 8. tabakadaki değerler, mutlak değerce aynı olup, grafikteki değişimler üst tabaka için verilmiştir. Grafikte iterasyon sayısına göre doğru orantılı elastik gerilmelerinde arttığı görülmektedir.

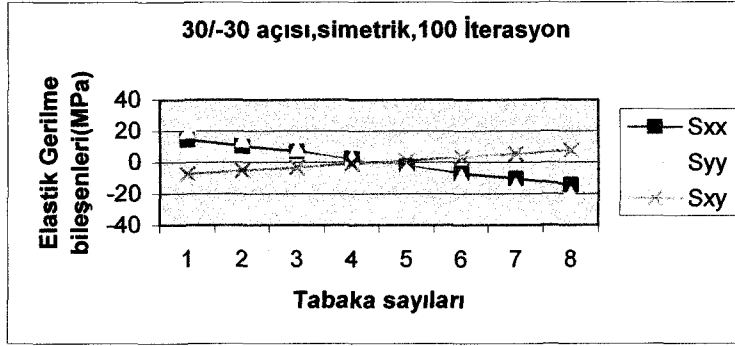
Şekil 10.12'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, elde edilen değerler grafiklere yansıtılmıştır. $[0^0/0^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. $[0^0/0^0]$ diziliminde 1.tabakada ve 8.tabakada elastik gerilme bileşenlerinin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir. 1. ve 8. tabakadaki değerler, mutlak değerce aynı olup, grafikteki değişimler üst tabaka için verilmiştir. Grafikte elastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

10.4 Elastik Gerilme Bileşenlerinin Tabakalardaki Değişim Grafikleri

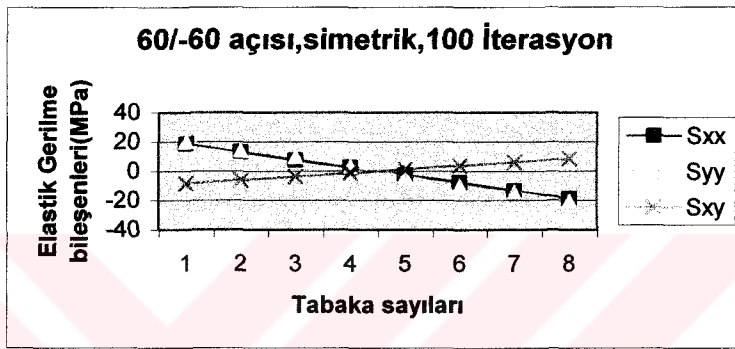
Elastik gerilmelerin tabakalardaki değişimini örneklendirmek için 100 iterasyonda elde edilen değerler tablolardan alınmış ve grafiklere aktarılmıştır.



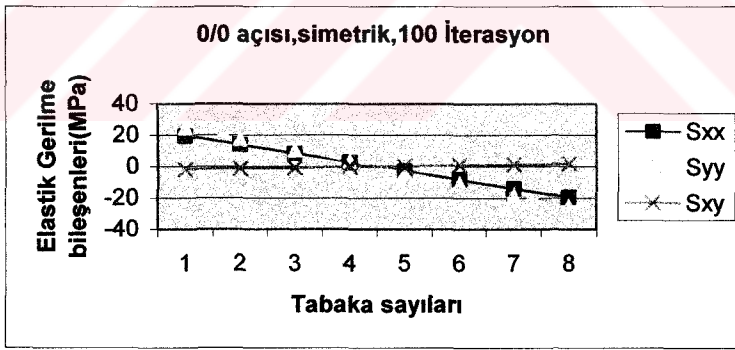
Şekil 10.13 $[45^0/-45^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi



Şekil 10.14 $[30^0/-30^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi



Şekil 10.15 $[60^0/-60^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi



Şekil 10.16 $[0^0/0^0]$ diziliminde elastik gerilme bileşenlerinin tabakalardaki değişimi

Şekil 10.13'te elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y ve τ_{xy} değerlerinin tabakalardaki değerleri verilmiştir. 1., 2., 3. ve 4. tabakalardaki elastik gerilme değerleri ile 5., 6., 7. ve 8. tabakalarda oluşan elastik gerilme değerleri mutlak değerce aynıdır.

Şekil 10.14 'da elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y ve τ_{xy} değerlerinin tabakalardaki değerleri verilmiştir. 1., 2., 3. ve 4. tabakalardaki elastik gerilme değerleri ile 5., 6., 7. ve 8. tabakalarda oluşan elastik gerilme değerleri mutlak değerce aynıdır.

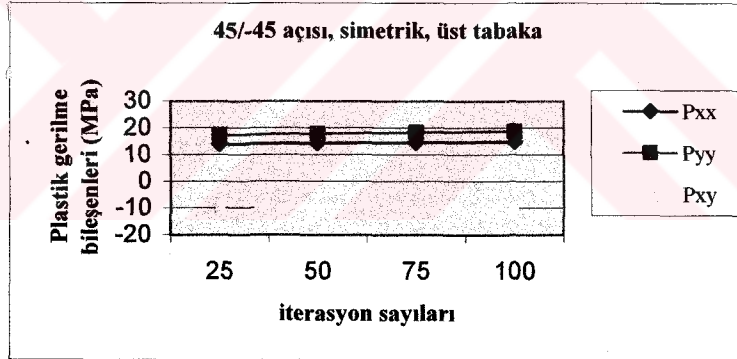
Şekil 10.15 'te elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y ve τ_{xy} değerlerinin tabakalardaki değerleri verilmiştir. 1., 2., 3. ve 4. tabakalardaki elastik gerilme değerleri ile 5., 6., 7. ve 8. tabakalarda oluşan elastik gerilme değerleri mutlak değerce aynıdır.

Şekil 10.16'da elastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y ve τ_{xy} değerlerinin tabakalardaki değerleri verilmiştir. 1., 2., 3. ve 4. tabakalardaki elastik gerilme değerleri ile 5., 6., 7. ve 8. tabakalarda oluşan elastik gerilme değerleri mutlak değerce aynıdır.

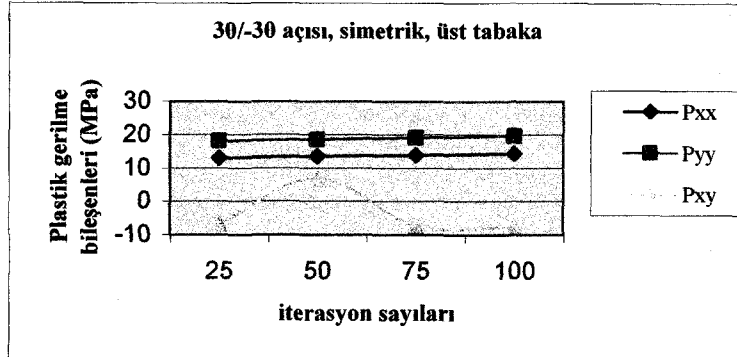
Bütün dizilimlerde görüldüğü gibi yükleme şartlarından dolayı, iç tabakalarda oluşan elastik gerilmeler üst ve alt tabakaya göre daha düşüktür. Ayrıca τ_{yz} ve τ_{xz} değerlerinin bütün tabakalarda eşit değerde olduğu görülmüştür.

10.5 İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Plastik Gerilme Bileşenlerinin Değişim Grafikleri

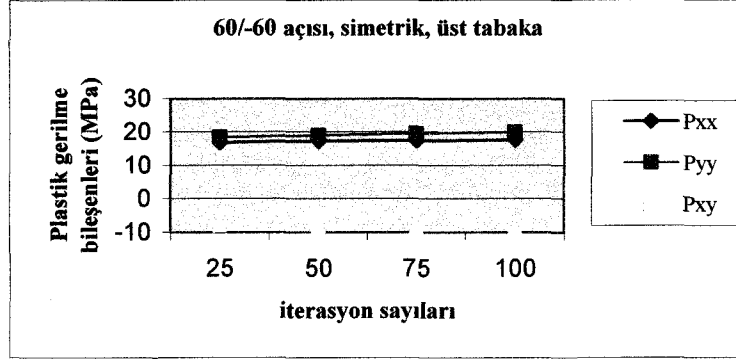
Oriyantasyon açılara göre elde edilen plastik gerilme bileşenlerinin 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlardaki değişimi aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir. Plastik gerilme değerleri 1. ve 8. tabakada maksimum olup, mutlak değerce aynıdır. Elde edilen plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri grafikte Pxx, Pyy, Pxy ile gösterilmiştir.



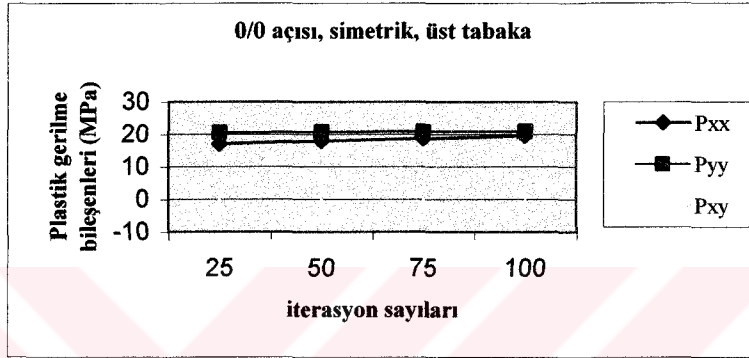
Şekil 10.17 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.18 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.19 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.20 İterasyon sayılarına göre plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)

Şekil 10.17'de $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[45^0/-45^0]$ diziliminde elde edilen maksimum plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri elde edilen sonuçlardan alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda σ_x değeri 13.916 MPa iken 100 iterasyonda 14.880 MPa olduğu, σ_y değerinin 25 iterasyonda 17.419 MPa iken 100 iterasyonda 18.767 MPa olduğu, τ_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda -9.353 MPa iken 100 iterasyonda 2.201 MPa olarak arttığı tespit edilmiştir. Plastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Şekil 10.18'de $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[30^0/-30^0]$ diziliminde elde edilen maksimum plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda σ_x değeri 13.029 MPa iken 100 iterasyonda 14.373 MPa olduğu, σ_y değerinin 25 iterasyonda 18.238 MPa iken 100 iterasyonda 19.746 MPa olduğu, τ_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda -6.747 MPa iken 100 iterasyonda -7.479 MPa olarak arttığı tespit edilmiştir. Plastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Şekil 10.19'da $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[60^0/-60^0]$ diziliminde elde edilen maksimum plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda σ_x değeri 16.738 MPa iken 100 iterasyonda 17.618 MPa olduğu, σ_y değerinin 25 iterasyonda 18.424 MPa iken 100 iterasyonda 19.899 MPa olduğu, τ_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda -7.750 MPa iken 100 iterasyonda -8.488 MPa olarak arttığı tespit edilmiştir. Plastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

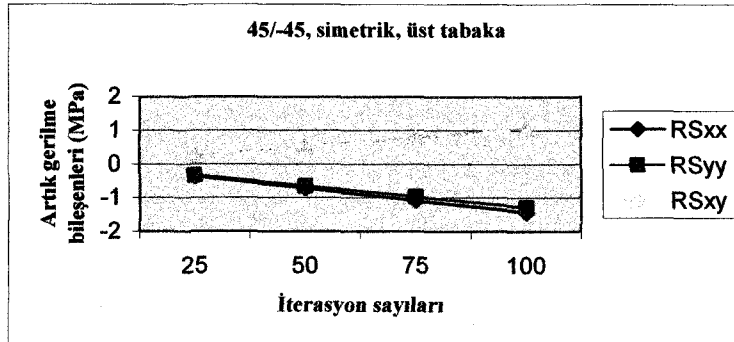
Şekil 10.20'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[0^0/0^0]$ diziliminde elde edilen maksimum plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda σ_x değeri 17.095 MPa iken 100 iterasyonda 19.603 MPa olduğu, σ_y değerinin 25 iterasyonda 20.626 MPa iken 100 iterasyonda 20.902 MPa olduğu, τ_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda -1.558 MPa iken 100 iterasyonda -1.710 MPa olarak arttığı tespit edilmiştir. Plastik gerilmelerin iterasyon sayısına göre doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

100 iterasyonda σ_x değerinin maksimum olduğu dizilimler sırasıyla $[0^0/0^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[45^0/-45^0]$, $[30^0/-30^0]$ 'dir. σ_y değerinin maksimum olduğu dizilimler sırasıyla $[0^0/0^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[45^0/-45^0]$ 'dir. τ_{xy} değerinin maksimum olduğu dizilimler ise sırasıyla $[45^0/-45^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[0^0/0^0]$ 'dir.

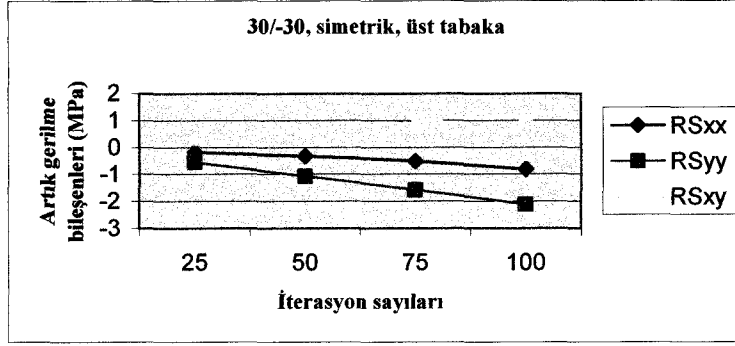
Ayrıca τ_{yz} ve τ_{xz} değerlerinin bütün tabakalarda eşit değerde olduğu görülmüştür.

10.6 İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Artık Gerilme Bileşenlerinin Değişim Grafikleri

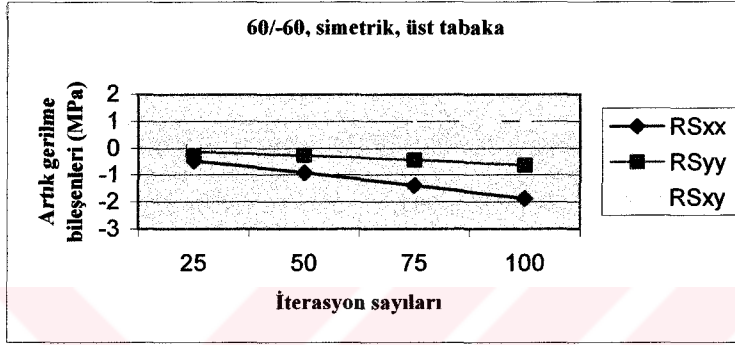
Oriyantasyon açılarına göre elde edilen artık gerilme bileşenlerinin 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlardaki değişimi aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir. Elde edilen artık gerilme bileşenlerinden RS_{xx} , RS_{yy} , RS_{xy} değerleri grafikte gösterilmiştir.



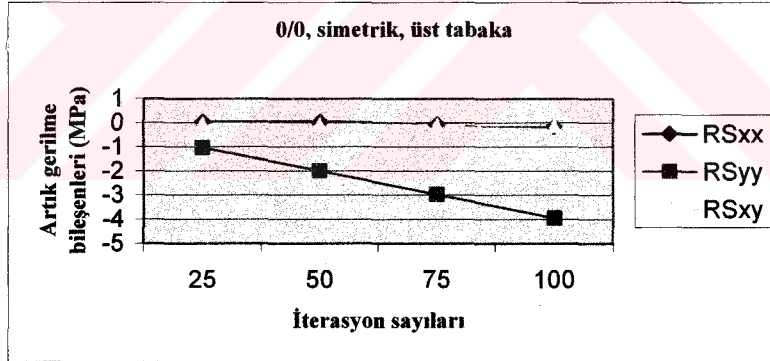
Şekil 10.21 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.22 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.23 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.24 İterasyon sayılarına göre artık gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)

Şekil 10.21'de $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum artık gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[45^0/-45^0]$ diziliminde elde edilen maksimum artık gerilme bileşenlerinden RSxx, RSyy, RSxy değerleri elde edilen sonuçlardan alınarak grafiğe aktarılmıştır. 25 iterasyonda RSxx değeri -0.360 MPa iken 100 iterasyonda -1.438 MPa, RSyy değerinin 25 iterasyonda -0.324 MPa iken 100 iterasyonda -1.280 Mpa, RSxy değerinin ise 25 iterasyonda 0.267 MPa iken 100 iterasyonda 1.077 Mpa olarak arttığı görülmüştür. Artık gerilme değerlerinin iterasyon sayıları ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 10.22'de $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum artık gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[30^0/-30^0]$ diziliminde elde edilen maksimum artık gerilme bileşenlerinden RS_{xx} , RS_{yy} , RS_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda RS_{xx} değeri -0.182 MPa iken 100 iterasyonda -0.806 MPa, RS_{yy} değerinin 25 iterasyonda -0.551 MPa iken 100 iterasyonda -2.102 Mpa, RS_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda 0.331 MPa iken 100 iterasyonda 1.278 Mpa olarak arttığı görülmüştür. Artık gerilme değerlerinin iterasyon sayıları ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 10.23'de $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum artık gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[60^0/-60^0]$ diziliminde elde edilen maksimum artık gerilme bileşenlerinden RS_{xx} , RS_{yy} , RS_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda RS_{xx} değeri -0.477 MPa iken 100 iterasyonda -1.871 MPa, RS_{yy} değerinin 25 iterasyonda -0.121 MPa iken 100 iterasyonda -0.624 Mpa, RS_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda 0.297 MPa iken 100 iterasyonda 1.092 Mpa olarak arttığı görülmüştür. Artık gerilme değerlerinin iterasyon sayıları ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 10.24'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum artık gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[0^0/0^0]$ diziliminde elde edilen maksimum artık gerilme bileşenlerinden RS_{xx} , RS_{yy} , RS_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda RS_{xx} değeri 0.035 MPa iken 100 iterasyonda -0.166 MPa, RS_{yy} değerinin 25 iterasyonda -1.032 MPa iken 100 iterasyonda -3.940 Mpa, RS_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda -0.021 MPa iken 100 iterasyonda -0.104 Mpa olarak arttığı görülmüştür. Artık gerilme değerlerinin iterasyon sayıları ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

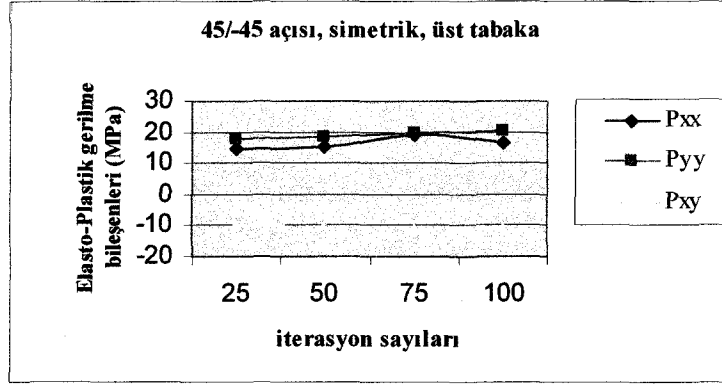
100 iterasyonda RS_{xx} değerinin maksimum olduğu dizilimler sırasıyla $[60^0/-60^0]$, $[45^0/-45^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[0^0/0^0]$ 'dir. RS_{yy} değerinin maksimum olduğu dizilimler $[0^0/0^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[45^0/-45^0]$, $[60^0/-60^0]$ 'dir. RS_{xy} değerinin maksimum olduğu dizilimler ise sırasıyla $[30^0/-30^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[45^0/-45^0]$, $[0^0/0^0]$ 'dir.

Ayrıca RS_{xz} ve RS_{yz} değerlerinin bütün tabakalarda eşit değerde olduğu görülmüştür.

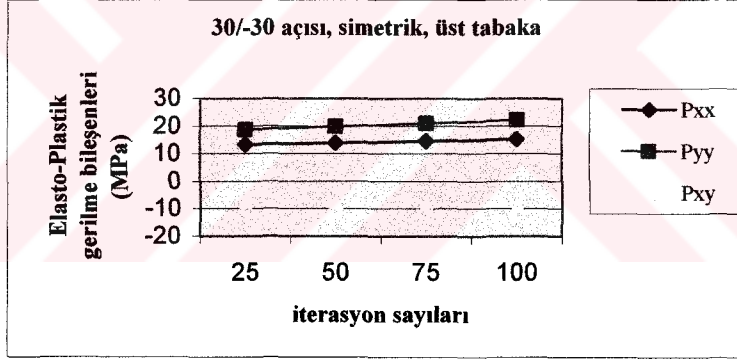
10.7 İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Elasto-Plastik Gerilme Bileşenlerinin Değişim Grafikleri

Örnek problemimizin çözümünde kullandığımız programda ortaya çıkan gerilmeler elastik, plastik ve artık gerilmelerdir. Elasto-plastik gerilmeler, elastik gerilmelerin artık gerilmelerden çıkarılması ile elde edilmiştir.

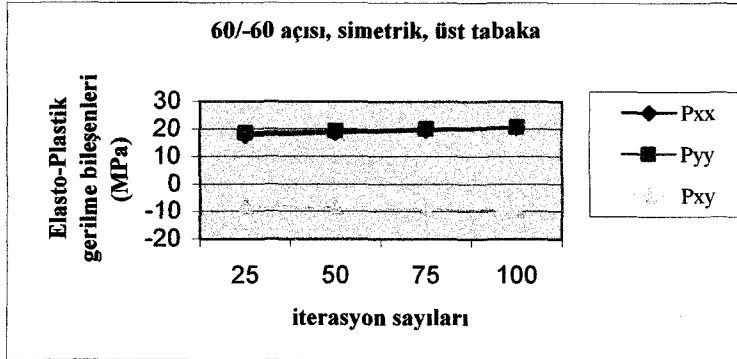
Oriyantasyon açılara göre elde edilen elasto-plastik gerilme bileşenlerinin 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlardaki değişimleri aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir. Alt ve üst tabakalarda ortaya çıkan elasto-plastik gerilme değerleri mutlak değerce aynı olup, aşağıdaki grafiklerde üst tabakaların iterasyon sayılarına göre değişimleri verilmiştir. Elde edilen artık gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri, grafikte Pxx, Pyy, Pxy ile gösterilmiştir.



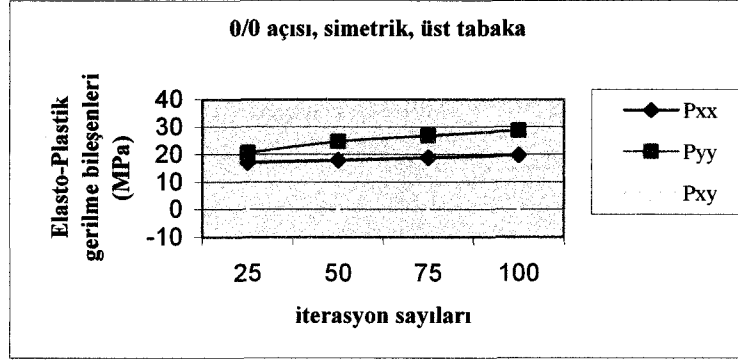
Şekil 10.25 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.26 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.27 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)



Şekil 10.28 İterasyon sayılarına göre elasto-plastik gerilme bileşenlerinin değişim grafiği(üst tabaka)

Şekil 10.25'te $[45^0/-45^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elasto-plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[45^0/-45^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri elde edilen sonuçlardan alınarak grafik oluşturulmuştur. 25 iterasyonda elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x değeri 14.325 MPa olarak ortaya çıkarken, 100 iterasyonda bu değer 16.664 MPa olmuştur. Yine 25 iterasyonda σ_y değeri 17.840 MPa iken 100 iterasyonda 20.376 MPa olmuştur. τ_{xy} değeri ise 25 iterasyonda -9.616 MPa iken 100 iterasyonda -11.720 MPa olduğu görülmüştür. Grafikte te görüldüğü gibi elasto-plastik gerilme değerlerinin iterasyon sayısına göre doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 10.26'da $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elasto-plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, 1. ve 8. tabakadaki değerler, mutlak değerce aynı olup, grafikte üst tabakanın üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[30^0/-30^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. $[30^0/-30^0]$ diziliminde 25 iterasyonda elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x 13.219 MPa iken 100 iterasyonda bu değer 15.230 MPa ulaştığı görülmüştür. σ_y değerinin 25 iterasyonda 18.733 MPa iken 100 iterasyonda 22.218 MPa olduğu görülmüştür. τ_{xy} değerinin 25 iterasyonda -7.076 MPa iken 100 iterasyonda bu bileşenin -8.740 MPa 'a ulaştığı gözlenmiştir. $[30^0/-30^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada elasto-plastik gerilme değerlerinin iterasyon sayılarına göre doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 10.27'de $[60^0/-60^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elasto-plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, 1. ve 8. tabakadaki değerler, mutlak değerce aynı olup, grafikte üst tabakanın üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[60^0/-60^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. $[60^0/-60^0]$ diziliminde 25 iterasyonda σ_x değerinin 17.545 MPa iken 100

iterasyonda bu bileşenin 20.780 MPa ulaştığı gözlenmiştir. Yine elasto-plastik gerilme bileşenlerinden τ_{xy} değerinin ise 25 iterasyonda -8.565 MPa iken 100 iterasyonda bu bileşen değerinin -9.562 'e yükseldiği tespit edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi elasto-plastik gerilme değerlerinin iterasyon sayısına göre arttığı görülmektedir.

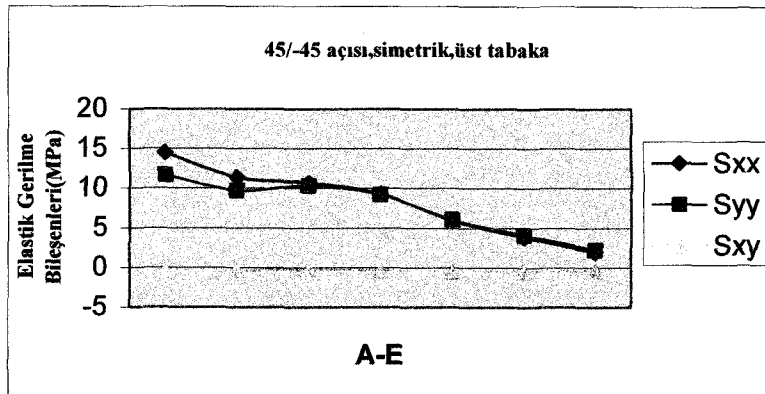
Şekil 10.28'de $[0^0/0^0]$ dizilimine sahip simetrik tabakada maksimum elasto-plastik gerilmeler 1. ve 8. tabakada oluşmuş olup, 1. ve 8. tabakadaki değerler mutlak değerce aynı olup, elde edilen değerler üst tabaka için grafiklere yansıtılmıştır. $[0^0/0^0]$ diziliminde elde edilen maksimum elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x , σ_y , τ_{xy} değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. $[0^0/0^0]$ diziliminde elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x 25 iterasyonda 17.052 MPa iken 100 iterasyonda bu değer 18.799 MPa olduğu, σ_y değerinin ise 25 iterasyonda 20.625 MPa iken 100 iterasyonda 28.715 MPa olduğu, τ_{xy} değerinin 25 iterasyonda -1.536 MPa iken 100 iterasyonda -1.677 'e yükseldiği tespit edilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi elasto-plastik gerilme değerlerinin iterasyon sayısına göre arttığı tespit edilmiştir.

100 iterasyonda σ_x değerinin maksimum olduğu dizilimler sırasıyla $[60^0/-60^0]$, $[0^0/0^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[45^0/-45^0]$ 'dir. σ_y değerinin maksimum olduğu dizilimler sırasıyla $[0^0/0^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[45^0/-45^0]$ 'dir. Kayma gerilme bileşenlerinden τ_{xy} 'nin ise maksimum olduğu dizilimler sırasıyla $[45^0/-45^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[0^0/0^0]$ 'dır.

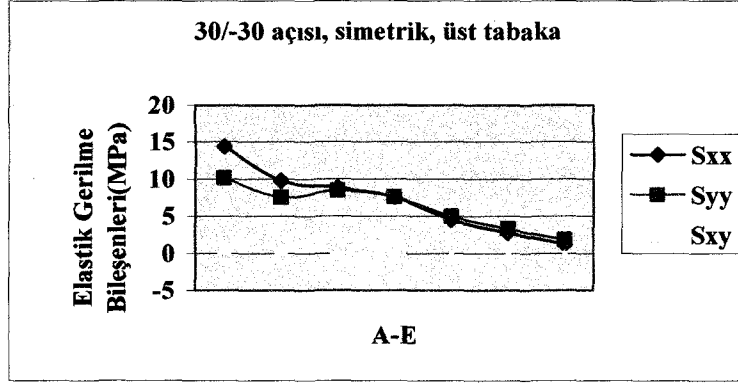
Ayrıca τ_{yz} ve τ_{xz} değerlerinin bütün tabakalarda eşit değerde olduğu görülmüştür.

10.8 A-E Doğrultusunda (Şekil 9.8) Meydana Gelen Elastik Gerilmelere Ait Grafikler

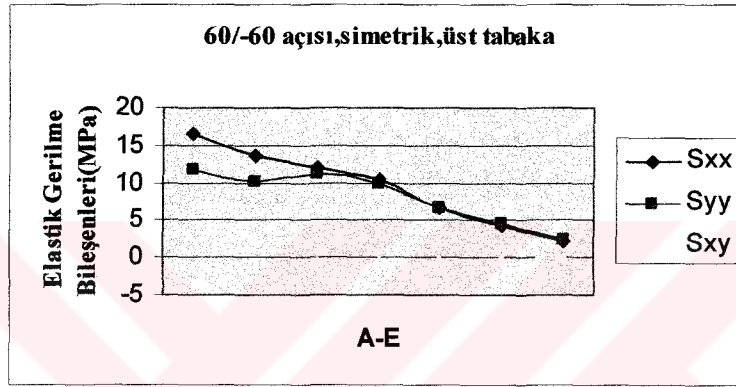
Basit mesnetli, üniform yük altında, kare ortasında eliptik delik bulunan kompozit plakanın $\frac{1}{4}$ 'ün incelenmesinde A-E çizgisi üzerinde 100 iterasyonda oluşan elastik gerilmelerin dizilim açılarına göre grafikleri aşağıda verilmiştir.



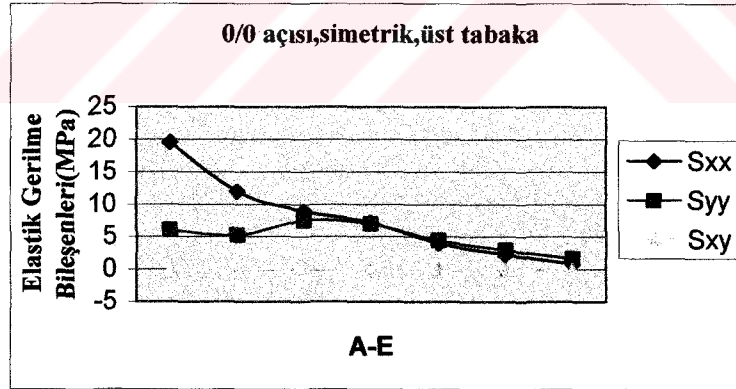
Şekil 10.29 $[45^0/-45^0]$ diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler.



Şekil 10.30 $[30^0/-30^0]$ diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler



Şekil 10.31 $[60^0/-60^0]$ diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler



Şekil 10.32 $[0^0/0^0]$ diziliminde 100 iterasyonda A-E çizgisindeki elastik gerilmeler

Şekil 10.29' da basit mesnetli için, $p: 0.0251 \text{ Mpa}$ sabit yüklemde $[45^0/-45^0]$ diziliminde simetrik istiflenmede üst yüzeylerdeki A-E çizgisi üzerinde oluşan elastik gerilme bileşenleri gösterilmektedir. A noktasından E noktasına doğru yaklaşıldıkça elastik gerilmelerde azalma olduğu ve sıfıra doğru yaklaşıldığı görülmektedir.

Şekil 10.30' da basit mesnetli için, $p: 0.0679 \text{ Mpa}$ sabit yüklemde $[30^0/-30^0]$ diziliminde simetrik istiflenmede üst yüzeylerdeki A-E çizgisi üzerinde oluşan elastik gerilme bileşenleri gösterilmektedir. A noktasından E noktasına doğru yaklaşıldıkça elastik gerilmelerde azalma olduğu ve sıfıra doğru yaklaşıldığı görülmektedir.

Şekil 10.31' de basit mesnetli için, $p: 0.0777 \text{ Mpa}$ sabit yüklemde $[60^0/-60^0]$ diziliminde simetrik istiflenmede üst yüzeylerdeki A-E çizgisi üzerinde oluşan elastik gerilme bileşenleri gösterilmektedir. A noktasından E noktasına doğru yaklaşıldıkça elastik gerilmelerde azalma olduğu ve sıfıra doğru yaklaşıldığı görülmektedir.

Şekil 10.32' de basit mesnetli için, $p: 0.0495 \text{ Mpa}$ sabit yüklemde $[0^0/0^0]$ diziliminde simetrik istiflenmede üst yüzeylerdeki A-E çizgisi üzerinde oluşan elastik gerilme bileşenleri gösterilmektedir. A noktasından E noktasına doğru yaklaşıldıkça elastik gerilmelerde azalma olduğu ve sıfıra doğru yaklaşıldığı görülmektedir.



11. SONUÇLAR

Bu çalışmada, simetrik $[0^0/0^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[45^0/-45^0]$ ve $[30^0/-30^0]$ dizilimli, basit mesnetli kare ortasında eliptik delik bulunan kompozit plakaların $\frac{1}{4}$ ' ün, üniform statik yük altında 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlarda ortaya çıkan elastik, plastik, elasto plastik ve artık gerilme bileşenleri ve plastik bölge dağılımları gösterilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- 1- Düşey yükleme ile yüklenmiş $[0^0/0^0]$, $[60^0/-60^0]$, $[45^0/-45^0]$ ve $[30^0/-30^0]$ dizilimli plakalarda, simetrik istiflenmede farklı akma değerleri elde edilmiştir.
- 2- En yüksek akma noktaları sırasıyla $[60^0/-60^0]$, $[30^0/-30^0]$, $[0^0/0^0]$, $[45^0/-45^0]$ dizilimlerinde meydana gelmiştir.
- 3- Maksimum elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenleri üst ve alt yüzeylerde meydana gelmiştir.
- 4- Ara tabakalardaki gerilme bileşenleri alt ve üst yüzeylerden daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.
- 5- İterasyon sayısına bağlı olarak elastik, plastik, elasto-plastik ve artık gerilme bileşenlerinde artış gözlenmiştir.
- 6- Plastik bölgeler alt ve üst yüzeylerde oluşmuş, ara yüzeylerde oluşmamıştır.
- 7- Plastik bölge dağılımı incelenen dizilimlerde $\frac{1}{4}$ eliptik deliğin x eksenine üzerindeki uç kısımdan başlayıp, deliğin çevresi boyunca ilerlediği görülmüştür. Plaka yüzeyinde plastik bölge oluşmamıştır.
- 8- Simetrik olarak istiflenmiş tabakalarda, dört farklı açı diziliminde de gerilme değerlerinin 1.- 8., 2.-7., 3.-6., 4.-5. tabakalarda mutlak değerce aynı olduğu görülmektedir.
- 9- 100 iterasyonda elasto-plastik gerilme bileşenlerinden σ_x değeri $[60^0/-60^0]$ diziliminde maksimum, $[45^0/-45^0]$ diziliminde ise minimum seviyededir. 100 iterasyonda σ_y değeri $[0^0/0^0]$ diziliminde maksimum, $[45^0/-45^0]$ diziliminde ise minimum seviyededir. Yine 100 iterasyonda kayma gerilme bileşenlerinden τ_{xy} değeri $[45^0/-45^0]$ diziliminde ise maksimum olup, $[0^0/0^0]$ diziliminde minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir.
- 10- 100 iterasyonda artık gerilme bileşenlerinden RS_{xx} değeri $[60^0/-60^0]$ diziliminde maksimum olup, $[0^0/0^0]$ diziliminde minimumdur. RS_{yy} değeri $[0^0/0^0]$ diziliminde maksimum olup, $[60^0/-60^0]$ diziliminde minimum seviyededir. RS_{xy} değeri ise $[30^0/-30^0]$ diziliminde maksimum olup, $[45^0/-45^0]$ diziliminde minimum seviyededir.
- 11- 100 iterasyonda plastik gerilme bileşenlerinden σ_x değeri $[0^0/0^0]$ diziliminde maksimum olup, $[30^0/-30^0]$ diziliminde minimumdur. σ_y değeri $[0^0/0^0]$ diziliminde maksimum olup, $[45^0/-$

45^0] diziliminde minumum seviyededir. τ_{xy} değeri ise $[45^0/-45^0]$ diziliminde maksimum olup, $[0^0/0^0]$ diziliminde minumum seviyededir.

12- Bütün dizilimlerde tabakalardaki τ_{yz} ve τ_{xz} değerlerinin eşit değerde olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma, değişik malzeme kombinazonları ve takviye açıları, farklı boyutlara sahip kompozit tabakalar ve delik ölçüleri, birden fazla sayıda delik ihtiva eden plakalar, değişik tip yükleme ve farklı mesnetleme durumlarına göre yapılacak çözümlere büyük oranda katkı sağlayabilecektir.



KAYNAKLAR

1. Ersoy, H.Y., "Kompozit Malzeme", Literatür Yayınları 66, 2001, İstanbul.
2. Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.
3. Alkan, O., "Basit ve Ankastre Mesnetli Termoplastik Kompozit Plakaların Elasto-Plastik Gerilme Analizi", Y.Lisans Tez, 2002, Elazığ.
4. Azzi, V.D.ve Tsai, S.W.", "Anisotropic Strength of Composite", Expl.mech., 283-286, 1965.
5. Yapıcı, A., Şahin, S.Ö., "Fiber Takviyeli Tabakalı Termoplastik Kompozit Levhalarda Delik-Kenar Arasında Oluşan Elasto-Plastik Gerilmeler ", Mühendis-Makine, Nisan 2003.
6. Chou, P. C., McNamer, B. M. and Chou, D.K., "The Criterion of Laminated Media", Journal of Composite Materials, 7, 22-35, 1973.
7. Chou, T.W., Kelly, A. Ve Okura A., "Fibre-Reinforced Metal –Matrix Composites", Journal of Composite Materials, 16:187-206, 1985.
8. Hoggatt, J.T., "Reinforced Structural Composites Using Thermoplastic Matrices", The 5th National SAMPE Technical Conference, Materials and Process for the 70's Cost Effectiveness and Reliability 5, 91-102, 1973.
9. Hoggatt, J. T., "Thermoplastic Resin Composite", The 20th national SAMPE Symposium, Technology in Transition, 20, 606-617, 1975.
10. Kays, A. O. ve Hunter, J.D., "Characterization of Some Solvent Resistant Thermoplastic Matrix Composites", Composite materials: Quality Assurance and Processing, ASTM-STP 797, Browning, ad.pp., 119-132, 1983.
11. Muzzy, J.D. ve Kays, A.O., "Thermoplastics vs.Thermosetting Structural Composites", Polymer Composites, 5, 169-172, 1984.
12. Lin, C. C. veKuo, C. C., "Buckling of Laminated Plates with Holes", Journal of Composite materials, V.23, p:536-553, 1989.

13. Karakuzu, R., Özel, A. ve Sayman, O., "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Metal Matrix Plates with Edge Notches", *Computers&Structures*, 63, 551-558, 1997.
14. Karakuzu, R. ve Sayman, O., "Elasto-plastic Finite Element Analysis of Orthotropic Rotating Discs With Holes", *Computers&Structures*.51, 695-703, 1991.
15. Yapıcı, A., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A. ve Avcı, A., "Elasto-Plastic Stresses Analysis of Thermoplastic Matrix Composite Laminated Plates under In-Plane Loading", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.14, March 2001.
16. Xiong, Y., "A Stres Analysis Method For bi- Axially Loaded Fastener Hole in Composite Laminate of Finite Geometry", *Journal of Applied Mechanics*, 65, 787-790, 1998.
17. Özer, D., Ö, M., "Düzlemsel Yüklenmiş Ortasında Dairesel Delik Bulunan Kompozit Plakta Oluşan Elastik Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi ", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, No 1*, 2004, Ankara
18. Özbay, M., "Stres Analysis of Metal Matrix Laminated Plates Under in Plane Loading", *Journal of the Institute of Science and Technology, Gazi Uni.*, 12, 3, 849-857, 1999.
19. Fish, J. & Guttal, R., "The s-version of Finite Element Method for Laminated Composites", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39, 3641-3662, 1996.
20. Sundaresan, P., Singh, G. & Rao, G.V., "Buckling of Moderately Thick Rectangular Composite Plates Subjected to Partial Edge Compression", *International Journal Mechanicals Science*, 40, 11, 1105-1117, 1998.
21. Karakuzu, R., Özel, A.& Sayman, O., "Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Metal Matrix Plates With Edge Notches", *Computers & Structures* , 63, 3 ,551-558, 1997.
22. Kaltakçı, M. Y., "İki Eksenli Yükleme veya Kesme Etkisindeki Daire Delikli Ortotropik Levhalarda Gerilme Yığılmaları", *S.Ü.Mühendislik Fakültesi Dergisi* , 10, 1-9, 1995.
23. Arslan, N., Pıhtılı H. & Gur M., "Elasto-Plastic Stres Analysis of Thermoplastic Matrix Composite Laminated and Perforated Plates Under in-Plane Loading ", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20, 1222-1252, 2001.

24. Arslan, N., Sancaktar, E., & Çelik, M., “Elasto-Plastic Behavior of Thermoplastic Matrix Roller Chain Link Plates Reinforced With Steel Finers”, ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conferences, 1-10, 2000.
25. Arslan, N., Sancaktar, E. & Turgut, A., “Elasto – Plastic Finite Element Analysis Of Isotropic Plates With U-Notches”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 92, 45-58, 1996.
26. Sayman, O., Karakuzu, R., Orhan, A., “Yarı Dairesel Çentikli Kompozit Levhaların Elasto-Plastik Zorlamalar Altında Mukavemetinin Artırılması”, 5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 16-18 Eylül 1992, ODTÜ, Ankara
27. Gür, M., Kaman, M., O., “Ortasında Dikdörtgen Delik Bulunan Düzlem Kompozit Levhada Elasto-Plastik Gerilme Analizi”, F.Ü. Fen ve Müh.Bilimleri Dergisi 13, 2, 225-236, 2001, Elazığ.
28. Sayman, O., Aksoy, S., “Elastic - Plastic Stres Analysis of Simply Supported and Clamped Aluminum Metal - Matrix Laminated Plates With a Hole”, Composite Structures 53, 355-364, 2001.
29. Kocaer, M., Yıldız, M., Avcı, A. “Kenarlarında Dairesel Çentikler Bulunan Levhaların Gerilme Yığılmasının Sonlu Elemanlar Metoduyla İncelenmesi”, 3. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi , 21-23 Eylül 1988, ODTÜ, Ankara.
30. Karakuzu, R., Özel, A., Sayman, O., “Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Metal Matrix Plates With Edge Notches”, Computers & Structures Vol.63.No.3, pp.551-558, 1997.
31. Sayman, O., “Elasto-Plastic Stress Analysis in Stainless Steel Fiber Reinforced Aluminum Metal Matrix Laminated Plates Loaded Transversely”, Composite Structures 43, 147-154, 1998.
32. Sayman, O., Akbulut, H., Meriç, C., “Elasto –Plastic Stress Analysis of Aluminum Metal-Matrix Composite Laminated Plates Under In-Plane Loading”, Computers and Structures 75, 55-63, 1999.
33. Arslan, N., Çelik, M., Arslan, N., “Prediction of the Elastic-Plastic Behavior of Thermoplastic Composite Laminated Plates ($[0^0 / 0^0]_2$) With Square Hole”, Composite Structures 55, 37-49, 2002.
34. Karakuzu, R., Orhan, A., Sayman, O., “Yarı dairesel çentikli kompozit levhaların elasto-plastik zorlamalar altında mukavemetinin artırılması”, 5.Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 16-

18 Eylül 1992, ODTÜ, Ankara.

35. Bahei-El-Din YA, Dvorak GJ., "Plasticity analysis of laminated composite plates", Trans ASME 1982.
36. Karakuzu, R., Özcan, R., "Exact solution of elasto-plastic stresses in a metal-matrix composite beam o arbitrary orientation subjected to transverse load", Compos Sci Technol , 1997.
37. Demirkesen, E., " Kompozit Malzemeler ", İ.T.Ü.Kimya-Metalurji Fakültesi, Yayın no : 3,1991, İstanbul.
38. Kılıçkap, E., "Al Si7 Mg2 / SiCp Metal Matrisli Kompozitlerin Talaşlı İşlenmesinin Araştırılması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2003, Elazığ .
39. Erdoğan, M., 1998, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt: II, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
40. Sayman, O., Aksoy, S., " Kompozit Malzemeler ", E.Ü.Makina Fakültesi, Bornova, İzmir.
41. Tavman, H.İ., " Kompozit Malzemelerin Savunma Sanayinde Kullanımı ", Dokuz Eylül Üniversitesi, 1997, İzmir
42. Sınmazçelik, T., "Makina Elemanlarında Kompozit Malzeme Kullanımı, Özellikleri ve Tasarım İlkeleri", TMMOB Mak. Müh. Odası Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi MATİT-2001, s:65-74.
43. Alkan, O., "Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemeler ve Mekaniği", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Seminer, 2002, Elazığ.
44. Yaşar, H., "Plastikler Dünyası", TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Yayın no :142 / 2. Baskı, 2001, Ankara.
45. Onaran, K., Malzeme Bilimi, 1993.
46. Akkurt , S., Plastik Malzeme Bilgisi, İ.T.Ü.Makina Fakültesi, İstanbul, 1991.
47. ASM Handbook, Volume 21 Composites, 2001.