

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

134730

**KOMPOZİT LEVHALARDA FİBER MATRİKS
ARAYÜZEYİNDE GERİLME ANALİZİ**

Kadir TURAN

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ, 2003

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT LEVHALARDA FİBER MATRİKS ARAYÜZEYİNDE GERİLME ANALİZİ

Kadir TURAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM
BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Bu tez, 01-08-2003 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç.Dr. Mustafa GÜR

Üye: Prof.Dr. Aydın TURGUT

Üye: Y.Doç.Dr. Ragıp İNCE

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/08/2003 tarih ve 2003-29/15 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Ö Z E T

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT LEVHALARDA FİBER MATRİKS ARAYÜZEYİNDE GERİLME ANALİZİ

Kadir TURAN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2003 , Sayfa 78

Bu çalışmada kompozit malzemelerin arayüzey özellikleri Sonlu Elemanlar Metodunun kullanılmasıyla tespit edildi. Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin tespiti büyük oranda fiber – matris arayüzey özelliklerinin tespit edilmesine bağlıdır. Arayüzeydeki gerilmelerin anlaşılmasıyla fiber takviyeli kompozitlerin tüm mekanik özelliklerinin hesabı, kompozit bileşenlerinin tespiti ve kompozit yapıların hasarının tespitinin tahmini yapılabilir. Bu çalışmada Sonlu Elemanlar için seçilen model tek fiberli pull – out testi modelinden yararlanılarak elde edilmiş bir modeldir. Tek bir fiber matris içerisine boydan boya yerleştirilmiş ve fiberin ucundan çekme yükü uygulanmıştır. Fiber ve matris malzeme özelliklerinin değişimi ve modelin geometrik yapısının değişimine göre analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda, arayüzeydeki eksenel normal gerilmeler ve arayüzey kayma gerilmeleri fiber uzunluğunun değişim oranına bağlı olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak fiber ve matris malzemelerinin Elastisite modülünün artması, fiber çapının artması ve model uzunluğunun artması ile arayüzey kayma gerilmelerinin fiberin sonuna doğru azaldığı görülmüştür. Gerilme dağılımı, arayüzey özellikleri, geometrik özellikler ve kompozit bileşenlerin özelliklerinin değişimi ile doğrudan değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fiber – matris arayüzeyi , Sonlu Elemanlar Metodu , Fiber pull – out metodu , kompozitler , düzlem gerilme analizi.

Ö Z E T

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT LEVHALARDA FİBER MATRİKS ARAYÜZEYİNDE GERİLME ANALİZİ

Kadir TURAN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2003 , Sayfa 78

Bu çalışmada kompozit malzemelerin arayüzey özellikleri Sonlu Elemanlar Metodunun kullanılmasıyla tespit edildi. Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin tespiti büyük oranda fiber – matriks arayüzey özelliklerinin tespit edilmesine bağlıdır. Arayüzeydeki gerilmelerin anlaşılmasıyla fiber takviyeli kompozitlerin tüm mekanik özelliklerinin hesabı, kompozit bileşenlerinin tespiti ve kompozit yapıların hasarının tespitinin tahmini yapılabilir. Bu çalışmada Sonlu Elemanlar için seçilen model tek fiberli pull – out testi modelinden yararlanılarak elde edilmiş bir modeldir. Tek bir fiber matriks içerisine boydan boya yerleştirilmiş ve fiberin ucundan çekme yükü uygulanmıştır. Fiber ve matriks malzeme özelliklerinin değişimi ve modelin geometrik yapısının değişimine göre analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda, arayüzeydeki eksenel normal gerilmeler ve arayüzey kayma gerilmeleri fiber uzunluğunun değişim oranına bağlı olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak fiber ve matriks malzemelerinin Elastisite modülünün artması, fiber çapının artması ve model uzunluğunun artması ile arayüzey kayma gerilmelerinin fiberin sonuna doğru azaldığı görülmüştür. Gerilme dağılımı, arayüzey özellikleri, geometrik özellikler ve kompozit bileşenlerin özelliklerinin değişimi ile doğrudan değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fiber – matriks arayüzeyi , Sonlu Elemanlar Metodu , Fiber pull – out metodu , kompozitler , düzlem gerilme analizi.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezimin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR' e yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Sürekli olarak çalışmamda her türlü yardımda bulunan ve çalışmamın her aşamasında emeği olan hocam Sayın Doç.Dr. Nurettin ARSLAN' a , çalışmama destek olan Bölüm başkanımız Sayın Prof.Dr. Aydın TURGUT' a teşekkür eder saygılar sunarım. Eğitimimin sürmesi ve çalışmalarımın devamı için fedakarlıktan kaçınmayan ve maddi manevi destek olan aileme çok teşekkür eder saygılar sunarım. Ayrıca maneviyatı ile her zaman bana destek olan Eşim Gülay'a ve tüm dostlarıma teşekkür eder saygılar sunarım.

Kadir TURAN

Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
	No:
ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	X
SİMGELER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. FİBER MATRİKS ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ	5
2.1. Adsorbsiyon ve İslanma	8
2.2. Taneler Arası Difizyon	9
2.3. Eletro Statik Çekim	10
2.4. Kimyasal Yapışma	11
2.5. Mekanik Yapışma	11
3. Problemin Sonlu Elemanlar Analizi	12
3.1. Problemin Sonlu Eleman Analizinde İzlenen Yol	13
3.2. Sonlu Eleman Formülasyonu	15
3.3. Arayüzeyde Süreklilik	15
3.4. Sürekli Elemanların Formülasyonu	15
3.5. Tek Boyutlu Elemanlarda İnterpolasyon Kavramı ve Lagrange Polinomları	16
3.6. İki boyutlu Elemanlarda İnterpolasyon Fonksiyonu	18
4. SONLU ELEMAN FORMÜLASYONUNUN UYGULANMASI.....	23
4.1. Direngenlik Matrisinin Teşkili	28
4.2. Nümerik İntegrasyon	29
4.3. Sistemin Sonlu Elemanlara Bölünmesi	31
4.4. Sonlu Elemanların Numaralandırılması	32

5. PROBLEMİN TANIMI.....	34
5.1. Problemin Çözümü ile İlgili Bilgiler.....	34
6. SONUÇLAR.....	37
6.1. Aynı Fiber Çapına Karşılık Boy Değişiminin Gerilme Dağılımına Etkisi.....	37
6.2. Aynı Boya Karşılık Fiber Çapı Değişiminin Gerilme Dağılımına Etkisi.....	39
6.3. Aynı geometrik Özelliklere Sahip Kompozitlerde Malzeme Değişiminin Gerilme Dağılımına Etkisi	41
6.4. Aynı Matriks Malzemesi ile Farklı Fiber Malzemelerinin Kullanılması Durumunda Gerilme Dağılımının İncelenmesi	45
6.5. Aynı Fiber Malzemesi ile Farklı Matriks Malzemelerinin Kullanılması Durumunda Gerilme Dağılımının İncelenmesi	57
7.SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	69
8.TARTIŞMAveÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
	No:
Şekil 2.1. Farklı arayüzey modelleri	5
Şekil 2.2. Kompozit tabakaları arasındaki ilişki	6
Şekil 2.3. İki katı malzeme arasındaki yapışma durumunun incelenmesi.	8
Şekil 2.4. Arayüzey yapışma mekanizmaları.....	9
Şekil 3.1. Gelişigüzel bir şeklin dikdörtgen elemanlara bölünmesi.	12
Şekil 3.2. Bir i dikdörtgen elemanında düğüm noktalarındaki kuvvetler	13
Şekil 3.3. Bir boyutlu elemanda düğüm noktaları	16
Şekil 3.4. İki boyutlu elemanlarda dönüşüm	18
Şekil 3.5. İki boyutlu dört düğümlü eleman.....	19
Şekil 3.6 Düğümleri 4' ten 9'a kadar değişebilen iki boyutlu eleman.	20
Şekil 4.1. Model olarak kullanılan iki boyutlu eleman.	22
Şekil 4.2. Doğal sınırların değişimi.	31
Şekil 4.3. Örnek ağ yapısı	31
Şekil 5.1. Model olarak kullanılan kompozitin görünüşü	34
Şekil 5.2. Modelin Sonlu Elaman ağı.	35
Şekil 6.1.1 Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Boyla Değişimi	37
Şekil 6.1.2.. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Boyla Değişimi	37
Şekil 6.1.3.. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Boyla Değişimi	38
Şekil 6.1.4. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Boyla Değişimi	38
Şekil 6.2.1. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Fiber Çapıyla Değişimi.	39
Şekil 6.2.2. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Fiber Çapıyla Değişimi.....	39

Şekil 6.2.3. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Fiber Çapıyla Değişimi.....	40
Şekil 6.2.4. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Fiber Çapıyla Değişimi.	40
Şekil 6.3.1. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	41
Şekil 6.3.2. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	41
Şekil 6.3.3. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	42
Şekil 6.3.4. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	42
Şekil 6.3.5. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	43
Şekil 6.3.6. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	43
Şekil 6.3.7. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	44
Şekil 6.3.8. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin Malzeme ile Değişimi	44
Şekil 6.4.1. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	45
Şekil 6.4.2. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	45
Şekil 6.4.3. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	46
Şekil 6.4.4. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	46
Şekil 6.4.5. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	47
Şekil 6.4.6. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.....	47
Şekil 6.4.7. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	48
Şekil 6.4.8. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	48
Şekil 6.4.9. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	49
Şekil 6.4.10. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	49
Şekil 6.4.11. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	50
Şekil 6.4.12. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	50
Şekil 6.4.13. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	51
Şekil 6.4.14. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı.....	51
Şekil 6.4.15. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	52
Şekil 6.4.16. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	52

Şekil 6.4.17. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	53
Şekil 6.4.18. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	53
Şekil 6.4.19. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	54
Şekil 6.4.20. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	54
Şekil 6.4.21. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	55
Şekil 6.4.22. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	55
Şekil 6.4.23. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	56
Şekil 6.4.24. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	56
Şekil 6.5.1. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	57
Şekil 6.5.2. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	57
Şekil 6.5.3. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	58
Şekil 6.5.4. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	58
Şekil 6.5.5. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	59
Şekil 6.5.6. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.....	59
Şekil 6.5.7. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	60
Şekil 6.5.8. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı	60
Şekil 6.5.9. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	61
Şekil 6.5.10. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	61
Şekil 6.5.11. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	62
Şekil 6.5.12. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	62
Şekil 6.5.13. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	63
Şekil 6.5.14. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı.....	63
Şekil 6.5.15. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	64
Şekil 6.5.16. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin sabit fiber çapı ve değişken boyda dağılımı	64
Şekil 6.5.17. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	65
Şekil 6.5.18. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	65

Şekil 6.5.19. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	66
Şekil 6.5.20. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	66
Şekil 6.5.21. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	67
Şekil 6.5.22. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	67
Şekil 6.5.23. Arayüzey Çekme Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	68
Şekil 6.5.24. Arayüzey Kayma Gerilmelerinin malzeme ile değişimi	68
Şekil 7.1. Fiber – matriks arayüzeyinde lc uzunluğuna bağlı olarak yük dağılımı	70



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa No:
Tablo3.1. Eleman Düğümleri 2'den 4'e kadar değişebilen bir boyutlu elemana ait interpolasyon fonksiyonları	18
Tablo 3.2. Düğüm numaraları 4'ten 9' a kadar değişebilen iki boyutlu elemanların interpolasyon fonksiyonları	22
Tablo 4.1. Gauss Legendre nümerik integrasyonuna göre seçilen noktalar (r_i) ve ağırlık değerleri (α_i)	31
Tablo 6.1.1. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve 6061 Al matriks malzemelerinin �zellikleri	37
Tablo 6.1.2. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri	38
Tablo 6.2.1. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri	39
Tablo 6.2.2. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri	40
Tablo 6.4.1. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri	45
Tablo 6.4.2. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri ...	46
Tablo 6.4.3. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri ...	47
Tablo 6.4.4. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri .	48
Tablo 6.4.5. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri ...	49
Tablo 6.4.6. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri ...	50
Tablo 6.4.7. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri .	51
Tablo 6.4.8. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Epoksi Reçine matriks malzemelerinin �zellikleri .	52
Tablo 6.5.1. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Nylon 6 matriks malzemelerinin �zellikleri	57

Tablo 6.5.2. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri	58
Tablo 6.5.3. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Naylon 6 matriks malzemelerinin özellikleri	59
Tablo 6.5.4. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri	60
Tablo 6.5.5. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Naylon 6 matriks malzemelerinin özellikleri	61
Tablo 6.5.6. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Naylon 6 matriks malzemelerinin özellikleri	62
Tablo 6.5.7. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri	63
Tablo 6.5.8. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri	64

SİMGELER LİSTESİ

A	: Alan	$[\text{mm}^2]$
E	: Elastisite modülü	$[\text{MPa}]$
F	: Kuvvet	$[\text{N}]$
G	: Kayma modülü	$[\text{MPa}]$
J	: Jakobiyen operatörü	-
$[J]$	: Jakobiyen matrisi	-
$\{P\}$	: Kuvvet vektörü	-
σ_{ij}	: Gerilme vektörü	-
ν	: Poisson oranı	-
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$	: Kartezyen koordinatlarda şekil değiştirme bileşenleri	-
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	: Kartezyen koordinatlarda gerilme bileşenleri	$[\text{MPa}]$
σ_a, σ_o	: Akma gerilmesi	$[\text{MPa}]$
ε_M	: Ortalama şekil değiştirme	-
ε_{ij}	: Ortalama şekil değiştirme	-
τ_i	: Arayüzey kayma gerilmesi	$[\text{MPa}]$
σ_i	: Arayüzeyde normal gerilme	$[\text{MPa}]$
σ_f	: Fiber eksenine normal gerilme	$[\text{MPa}]$
r, s	: Lokal koordinat takımı	
x, y	: Global koordinat takımı	
D_f, d_f	: Fiberin eni	$[\text{mm}]$
$2b$	: Matriksin eni	$[\text{mm}]$
d_f	: Fiber çapı	$[\text{mm}]$
Z	: Fiber doğrultusu	
K_i	: Komple direngenlik matrisi	
σ_{ij}	: Genel gerilme ifadesi	$[\text{MPa}]$
u, v, w	: Yer değiştirmeler	
D	: Elastiklik matrisi	
t	: Kalınlık	$[\text{mm}]$
L	: Fiberin uzunluğu	$[\text{mm}]$
ϕ	: İnterpolasyon fonksiyonu	-

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte mevcut olan malzeme özelliklerinin dışında bir takım özelliklerin tümünü birden bünyesinde barındıran yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum kompozit malzemelerin ortaya çıkmasına ve hızla gelişmesine yol açmıştır. Kompozit malzeme alanında yapılan çalışmalarda istenilen şartlara uygun malzemelerin, hangi yöntemlerle imal edilebileceği konusu önemli olduğu gibi, imal edilecek malzemenin kullanılacağı yere uygun şartları taşıyıp taşımadığının önceden tespit edilebilmesi de oldukça önemlidir. Günümüzde uzay teknolojisinden savunma sanayisine kadar bir çok uygulama alanında değişik tür ve yapıda kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Dolayısıyla hızla gelişen teknoloji içerisinde önemli bir yer tutan kompozit malzemelerin özelliklerinin tespiti ile ilgili çalışmalar önem kazanmıştır.

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, kompozit malzemelerin ortaya çıktığı günden bu güne kadar en çok kullanılan ve bilinen bir kompozit malzeme türüdür. Matriks malzemesini takviye etmek için çeşitli şekil ve boyutlarda fiberler kullanılmaktadır. Matriks fibere göre mukavemeti daha düşük ve sünek bir malzeme türüdür. Matriksin içerisine fiber konulması ile elde edilen bu kompozit malzemenin mekanik özellikleri içerisinde bulunan fiberin boyutlarına, yerleştirilme açısına, şekline, mekanik özelliklerine ve bileşim yüzdesi gibi özelliklerine bağlı olarak değişmektedir [10].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli özelliklerden biride fiber – matriks arayüzeyinin özellikleridir. Fiber ile matriks arasında bir bağ görevi yapan arayüzey fiber ve matriks malzemelerinin türüne göre fiziksel, kimyasal yada mekanik bir bağ olabilir. Özellikle kimyasal bir bağ olması durumunda arayüzey fiber ve matriksin dışında üçüncü bir malzeme olarak ortaya çıkar ve diğer iki malzemeye benzemez. Fakat çok ince bir tabaka olduğu için diğer malzemelere uygulanan mekanik testleri uygulamak mümkün değildir. Ancak özel çözüm metotları ile arayüzey özelliklerinin tespiti mümkün olmaktadır. Güçlü bir arayüzeye sahip kompozit malzemelerin mukavemeti yüksek, sünekliliği düşüktür. Zayıf bir arayüzey yapısına sahip malzemelerin ise mukavemeti düşük kırılma direnci yüksektir. Benzer olarak arayüzey özelliklerine bağlı olarak kompozit malzemenin korozyon direnci ve su içerisindeki davranışları da değişiklik gösterir. Fiber ile matriks arasındaki bağ korozyondan etkilenmeyecek bir bağ türü ise (mekanik bağ) kompozitin korozyon direnci yüksektir. Farklı fiber ve matriks malzemelerinin bir araya gelmesi ile oluşan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri arayüzey özelliklerinin tespit edilmesiyle doğru olarak hesaplanabilir [15,23].

Fiber – matriks arayüzey özelliklerini tespit etmek için bazı fiziksel engellemelerden dolayı bilinen deneysel metotların kullanılması mümkün değildir. Bir kompozit tabaka yüklendiği zaman tüm yapının yükü taşıyabilmesi için takviye ile matriks malzemesi arasında bir gerilme transferi gerçekleşmektedir. Fibere uygulanan yük arayüzey yardımı ile matrikse iletilmektedir böylece kompozit tabakaya uygulanan yükün tüm kompozit tarafından taşınması mümkün olmaktadır. Fiber ile matriks arasındaki gerilme transfer mekanizmasının anlaşılması ve gerilmelerin doğru olarak tespit edilmesi ile fiber takviyeli kompozit malzemelerin tüm mekanik davranışlarını tespit etmek mümkündür. Ayrıca bu yolla kompozit bileşenlerinin seçimi isteğe bağlı olarak yapılabilir ve kompozit yapıların hasar hesabı yapılabilir[15]. Sonuç olarak fiber – matriks arayüzey özelliklerinin tespit edilmesi ile bir kompozit malzemenin, daha tasarım aşamasındayken mekanik özelliklerini tespit etmek ve uygunluğunu tartışmak mümkün olmaktadır.

Arayüzey özelliklerinin tespit edilebilmesi için çeşitli analiz metotları geliştirilmiştir. Deneysel, analitik ve sayısal tüm analiz yöntemleri bu problemin çözümünde kullanılabilir. Bu metotlar içerisinde maliyeti en düşük olan ve zamandan tasarruf sağlayan bir metot olması nedeniyle sayısal yaklaşımların kullanılması daha avantajlıdır. Bu amaçla bu çalışmada Sonlu Elemanlar Metodu kullanılmıştır. Bu metodu kullanarak çözüm yapan bir bilgisayar programı yardımı ile kısa bir süre içerisinde bir çok analiz yapmak mümkündür.

Bu çalışmada düzlem bir levhaya boydan boya yerleştirilmiş bir fiber ile matriks arasındaki gerilme transferi tespit edilmiştir. Çözüm sonlu elemanlar metodunun kullanılması ile yapılmış ve çözümde dört düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. Arayüzey bölgesi daha sık taranarak sonuçların hassasiyeti artırılmış ve netice olarak fiber – matriks arayüzeyinde çekme ve kayma gerilmelerinin değişimi tespit edilmiştir. Geometrik değişiklikler ve farklı malzeme özellikleri kullanılarak bu değişimlerin etkileri tartışılmıştır.

Çalışma şu bölümlerden oluşmuştur:

Birinci bölümde giriş ve literatür verilmiştir.

İkinci bölümde fiber – matriks arayüzeyinin özellikleri anlatılmıştır. Özellikle arayüzey farklı yapışma durumları için incelenmiştir.

Üçüncü bölümde düzlem gerilme analizinin sonlu elemanlar formülasyonu verilmiştir.

Dördüncü bölümde sonlu elemanlar metodunun probleme nasıl uygulanacağı ve sonlu eleman modelinin ağ yapısının nasıl oluşturulacağı anlatılmıştır.

Beşinci bölümde problemin tanımı ve bilgisayarda problemin nasıl çözüldüğü anlatılmıştır.

Altıncı bölümde farklı özellikteki modeller için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Yedinci bölümde sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir.

Sekizinci ve son bölümde tartışma ve öneriler verilmiştir.

Bir çok araştırmacı tarafından arayüzey ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Davis ; tek fiberli bir kompozit numunesinde fiber kırılması metodunun bir sonlu eleman modelini çalışmıştır. Fiber ve matriks kendi içinde bölmelendirilmiş , arayüzey bir yay tabaka olarak modellenmiştir [10].

Okabe ; tek fiberli kırılma testinin analitik bir modelini geliştirerek tek fiberli bir kompozitdeki gerilme dağılımını incelemiştir. Ayrıca Monte Carlo simülasyonu kullanarak yaptığı çözümü modellemiştir [23].

Yun Fu ; tek ve çok fiberli pull – out testlerinde gerilme transferinin mikro mekanik analizini çalışmıştır. Özellikle gerçek kompozitin fiber – matriks bileşim oranının aynı kompozit modelinde tek bir fiber ve matriksden oluşturarak kullanmıştır. Ayrıca komşu fiberlerin sıklıklarının ve boyutlarının gerilme transferine etkisini incelemiştir [37].

Marieta ; arayüzeydeki kimyasal reaksiyonların pull – out çalışmalarına etkisini incelemiştir. Reçine içindeki karbon fiberlerin yüzey özelliklerinin (oksidasyon gibi) pull – out testine etkilerini incelemiştir. Arayüzey adhezyonunu hem AFM (atomic force microscope) hemde kimyasal karakterizasyonunu FTIR (fourier transform infrared) metodu ile incelemiştir [21].

Xiaoyu ; sürtünme temas elemanı metodunu kullanarak bir kompozit malzeme içerisindeki fiber – matriks arayüzeyinin mikro mekanik özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili çalışmıştır. Pull – out testi esnasında elastik matriksden çıkarılan fiberle matriks arasındaki sürtünme durumunu modelleyerek, meydana gelen kayma gerilmelerini ve normal gerilmeleri tespit etmiştir [36].

Song ; termo plastik kompozitde mikro grid metodunu kullanarak fiber ve matriks arasındaki gerilme transferinin analizini yapmıştır. Bu çalışma ile termo plastik kompozitlerin arayüzey özelliklerinin geliştirilmesine çalışılmıştır [29].

Zhang ; fiber pull – out modelinin tanımlanması için teorik bir model geliştirmiştir. Önerdiği modeli sonlu eleman çözümü ile karşılaştırarak sunduğu modelin geçerliliğini savunmuştur. Karbon fiber ve epoksi matriks çiftinin tamamen yapıştığını kabul ederek boyu , malzeme özellikleri , termal artık gerilmeleri ve farklı fiber pull – out oranları için değişimleri incelemiştir [20].

Sun ; tek fiberli kompozit modelinin bir sonlu eleman modelini oluşturarak gerilme transferinin analizini yapmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman modelinden elde edilen değerler analitik çözüm ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır [27].

Kaman ; tek fiberli bir kompozit malzeme içerisinde fiberin çıkartılması problemini deneysel olarak çalışmıştır. Elde edilen sonuçlarla çizdiği pull – out grafikleri ile işlem sırasında yük ve yer değiştirmenin değişimini izah etmiştir [19].

Hull ; fiber – matriks arayüzünün geniş bir tanımını yaparak, moleküler düzeyde arayüzey yapışması , kimyasal ve fiziksel yapışma gibi konuları incelemiştir. Ayrıca fiberin sonunda gerilmenin nasıl değişeceğini göstermiştir [15].

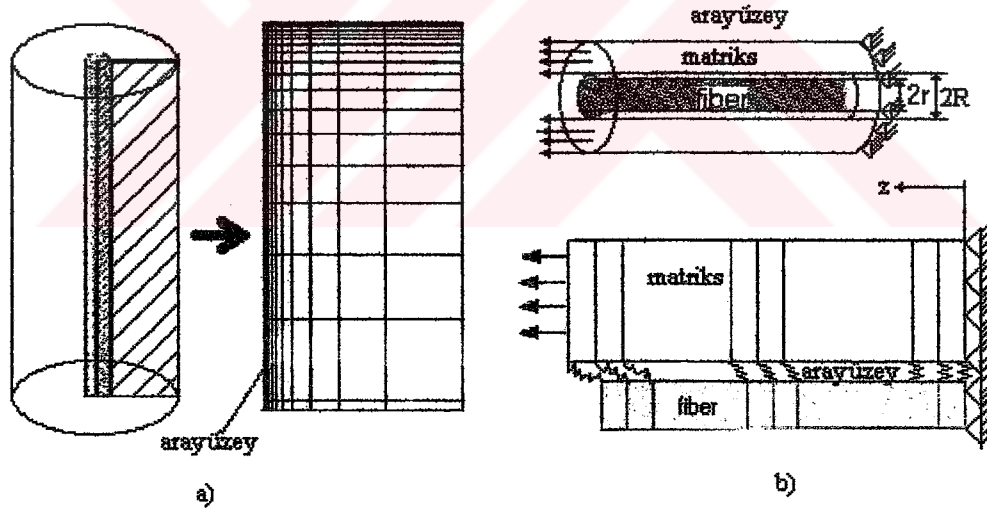
Tripathi ; süreksiz bir fiber kullanarak tek fiberli fiber kırılma metodunu plastik bölgede incelemiştir. Özellikle plastisite etkisi metodu ile probleme yaklaşarak çözümlerini sonlu eleman çözümleri ile desteklemiştir [34].

Tsai ; pull – out metodunun mikro mekaniğini geniş bir şekilde çalışmıştır. Farklı özelliklere sahip fiber ve matriks malzemelerinin pull –out testlerini fiberi matriksden değişik hız ve konumlarda çekerek yapmıştır. Fiberin sonunda meydana gelen kırılmanın kırılma tokluğu üzerine etkilerini araştırmıştır [30].

Meurs; tek fiberli kompozit malzemelerde arayüzey normal gerilmelerini deneysel olarak elde etmiştir. Deneyi değişik sınır şartları kullanarak SEM mikroskobu yardımı ile yapmıştır ve elde ettiği sonuçları sayısal yöntemler ile karşılaştırmıştır. Deneylerde özellikle yüzeyi işlenmiş karbon fiberlerin yüzey özelliklerinin değişimi ile arayüzey normal gerilmesinde meydana gelecek değişimleri incelemiştir [22].

2. FİBER MATRİKS ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ

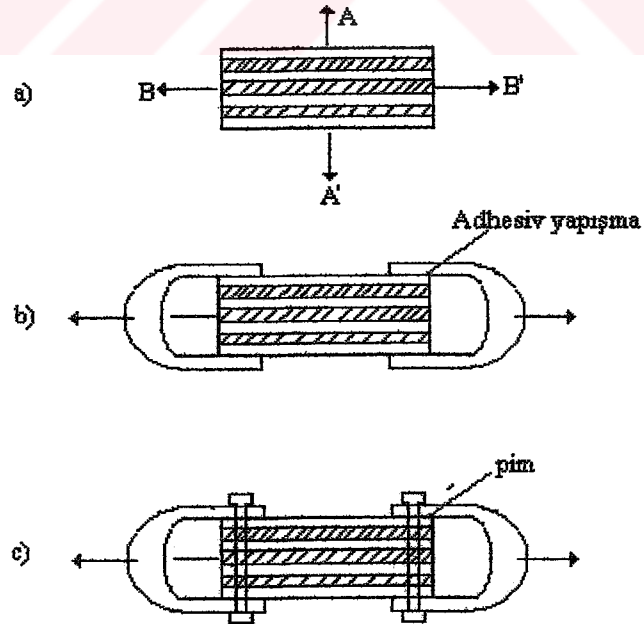
Fiber takviyeli kompozitler fiber ve fiberi saran matriks malzemesinden oluşurlar. Fiber ile matriksin bir bütün oluşturabilmesi için aralarında mekanik yada kimyasal bir bağ olması gerekir. Fiber – matriks arayüzeyi bu iki malzeme arasındaki bağı teşkil etmektedir [10]. Arayüzey bazı kompozitlerde matriks, fiber ve fiber kaplamasının reaksiyonundan elde edilen malzeme bileşenlerinin oluşturduğu bir tabakadır. Metal matriksli kompozitlerde arayüzey erimiş matriks ile fiberin kimyasal reaksiyonu sonucunda sıvı matriksin fiberin dış yüzeyinden difizyonu ile ortaya çıkan bir malzemedir. Bir çok mühendislik malzemeleri ile benzeşmediğinden arayüzey malzemesinin mekanik davranışları büyük oranda çalışılmaz. Arayüzey malzemesi arafaz bölgesinde fiber ve matriksin değişik bileşim oranlarında kompozit imalatının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Öyle ki bir monolitik malzeme olarak çalışılmaz ve çözülemez. Arayüzeyin temel davranışlarının tanımı için araştırmacılar ciddi modeller ortaya koymuşlardır. Modellerden birinde arayüzey, fiberle matriksi birleştiren çok ince bir tabaka olarak kabul edilmiştir [10 , 20].



Şekil 2.1. Farklı arayüzey modelleri (a- arayüzeyin çok ince bir yaprak tabaka olarak alındığı model , b- arayüzeyin yay olarak modellendiği durum)

Bazı kompozitlerde ise arayüzey fiberle matriksin kimyasal reaksiyonundan oluşan farklı bir malzeme olarak değil fiberle matriksi birleştiren mekanik bir bağ olarak davranmaktadır [27].

Arayüzey kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından farklı bir rol oynar. Özellikle matriks ve fiberlerin elastik özellikleri arasındaki büyük farklılıklar doğrudan arayüzey ile ilişkilendirilerek giderilmektedir, bir başka deyişle fiber üzerindeki gerilme etkisi arayüzey yardımı ile matrikse iletilmektedir. Fiberden matrikse yük transferinin etkileri fiber takviyeli kompozit malzemelerin mikro mekanik özelliklerinin tespitinde önemli rol oynar [36]. Kompozitin mekanik özelliklerini güçlendirmek için kullanılan takviye malzemesi ile matriks malzemesinin mukavemeti önemli oranda arttırılmaktadır. Arayüzey kompozitin mekanik özelliklerini arttırmak için kullanılan takviye malzemesi ile matriks malzemesini birbirine bağladığı için kompozitin mukavemetini de önemli oranda etkiler. Kompozit malzeme Şekil 2.2.a'da gösterildiği gibi farklı mekanik özelliğe sahip malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşur. Kompozit tabakalar arasında kimyasal , fiziksel yada mekanik bağların farklı olması ile birlikte tabaka düzlemin AA' doğrultusunda çekme mukavemeti yani zorlanması yoktur. BB' doğrultusundaki zorlanma şekillerinde paralel tabakalar basit bir yolla yapıştırılmışlardır. Eğer hiçbir yapışma olmasaydı ve basit bir yapışma dış tabakalar arasında olsaydı Şekil 2.2.b'de olduğu gibi yük uygulandığı zaman şekil değişikliği olurdu. Kompozitin mukavemeti dış tabakalar arasındaki mukavemet ile sınırlı olurdu. Öte yandan tabakalar bir tutucu ile bir arada tutulsaydı Şekil 2.2.c'de olduğu gibi tüm tabakalar yükü alırdı. Bu sayede kompozit daha mukavemetli ve rijit olurdu. Bu örneği takiben denebilir ki fiberin dayanıklılığı ve rijitliğinin yanında ayrıca matriks ile güçlü bir yapışma özelliğine sahip olması gerekir.



Şekil 2.2. Kompozit tabakaları arasındaki ilişki (a – yapışma olmadığı durum , b- yapışmanın sadece tabakalar arasında olduğu durum , c- toplam yapışma durumu)

Arayüzeyin gerçek özelliklerinin tespit edilmesi kompozit malzeme özelliklerinin anlaşılması için oldukça önemlidir. Böylece arayüzey, kompozit malzemelerin kırılma rijitliği özelliklerinde önemli bir faktördür, ayrıca su içinde çalışan kompozit malzemelerin davranışlarının doğru tahmini için bir cevap niteliğindedir. Zayıf bir arayüze sahip kompozit malzemeler bağıl olarak düşük bir mukavemete ve rijitliğe sahiptirler. Fakat güçlü bir arayüze sahip malzemelerin mukavemeti ve rijitliği yüksektir. Bu etkiler pull-out sırasında fiberin matriksden kolay ayrılabilmesi gibi özellikleri doğururlar. Bu çalışmada fiber – matriks arayüzeyinin gerilme analizi araştırılmıştır. Matriks içerisine birtakım fiber boydan boya yerleştirilmiş ve fibere çekme yükü uygulanmıştır. Bu sırada fiberden matrikse yük transferi olacaktır. Meydana gelen bu yük transferinin ölçülmesi ile fiber – matriks arayüzey özellikleri tespit edilecektir. Bu yük transferinin ölçülebilmesi ve problemin çözülmesi için bazı temel kabuller gerekmektedir:

- Arayüzey sonsuz küçük bir inceliktedir.
- Fiber – matriks arasındaki yapışma, arayüzey kesitinde herhangi bir şekil değiştirmeye müsaade etmeyen bir mükemmellikte olmalıdır.
- Fiberi kaplayan malzeme, fiberin esas kısmını oluşturan fiber malzemesi malzeme ile aynı malzeme özelliklerine sahip olmalıdır.
- Fiberler düzgün bir dizi yada tekrarlı bir dizilime sahip olmalıdırlar.
- Fiber ve matriks malzemesi elastik mükemmel plastik malzeme olarak kabul edilmektedir.

Bu kabuller matematik model için elde edilen çözümlerde gereklidirler. Sonuçta elde edilenlerin rehberliğinde gerçek kompozit sistemler için benzer olgular saptanabilir.

Fiber – matriks arayüzeyinde gerilme transferini etkileyen en önemli durumlar şunlardır:

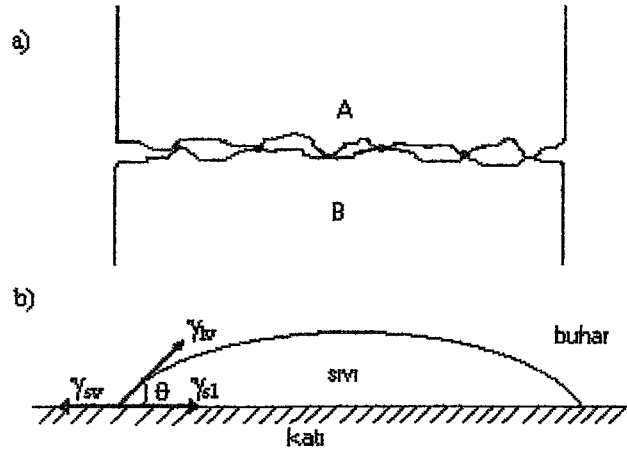
- Arayüzey yapışmasının kayma mukavemeti,
- Matriksin fibere yapışma yeterliliği ,
- Fiberin matrikse yapışma yeterliliği ,
- Matriksin kayma akma gerilmesinin değeri olarak sıralanabilir.

Fiber – matriks arayüzeyindeki yapışma; fiberin kimyasal özelliklerine ve atomik dizilimine bağlı olarak polimer matriksin kimyasal bileşimi ve moleküler uyumunu takiben arayüzey her bir fiber – matriks sistemi için incelenmelidir. Fiber – matriks arayüzeyindeki yapışma fiziksel ve kimyasal olarak fiber ve matriks malzemelerinin özelliklerine bağlı olarak

değişiklikler göstermektedir. Bu değişiklikler arayüzeyin mekanik özellikleri dolayısıyla kompozitin mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Bir arayüzeyde yapışma sistemi fiber ve matriks arasındaki adhezyon kuvvetlerinden dolayı meydana gelmektedir. Basit bir sistemde arayüzey bağı; matriks ve fiber arasındaki yapışma ile meydana gelir. Kararlı bir arayüzey faz oluşumu için ilk gereksinim ise matriksin fiberi ıslatmasıdır. Bu konuda gerek plastik gerekse metal alaşımlı kompozitler üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış ve bu çalışmalar yüzeyin tamamen ıslatılmasının çeşitli faktörlere bağlı olduğunu göstermiştir. Bağlayıcı matriksin düşük vizkozite de ve takviye elemanının kritik yüzey geriliminden daha düşük olması gerekmektedir. Ancak seramikler ve oksitli – nitrürlü takviye elemanları çok yüksek yüzey gerilimlerine sahiptirler. Organik polimerler ile inorganik takviye elemanlarını birbirine bağlamada SİLAN yüzey gerilimi ayarlayıcı rolünü oynar. Bu silanlar suda çözüldükten sonra reçine ile karıştırılır yada takviye elemanının yüzeyine sürülür. Bununla birlikte en yaygın uygulamalardan biride fiberin genellikle daha iyi bir yapışma sağlamak için bir malzeme ile kaplanmasıdır. Yapışma arayüzeyin izolasyonundan yada yapışma metodunun bir kombinasyonundan meydana gelmektedir. Metal esaslı kompozitlerde arayüzey tipleri reaktif olmayan çözünmez fazlar, çözünebilen fazlar veya reaksiyona girerek arayüzey bileşik fazları oluşturanlar olmak üzere gruplandırılabilirler. Yapışma beş ana mekanizma ile incelenebilir.

2.1.Adsorpsiyon ve Islanma

Islanma özelliği, fiber ve matriksin oluşturduğu serbest enerji değişimine bağlıdır. İki elektriksel yüzey (nötr durumdayken) birbirlerine yeterince yaklaştırıldıklarında fiziksel bir çekim kuvveti mevcut olur ki bu, katı bir yüzeyin sıvıyla ıslatılması halinde daha iyi anlaşılır. İki yüzey fiziksel temas halindeyken gerçek molekülse temas toplam yüzeyin sadece küçük bir kısmında meydana gelir. Bu çok hassas parlatılmış yüzeylerde bile atomik ölçekte kabadır. Ayrıca yüzeyler genelde kirlilik, oksit ve diğer artık maddelerde içerirler. Bu maddeler kaldırılrsa ve temas noktalarında kuvvetli yapışma olsa bile bütün yüzeye göre ortalama yapışma zayıf olmaktadır. Şekil 2.3.a'da gösterilen iki katı yüzey arasında birbirlerinin yüzeyi sert olduğu için zayıf bir adhezyon oluşur. Bu durumda iki katı yüzey genellikle yapıştırılır. Yapışma tamamen gerçekleşse bile çekim kuvvetleri zayıf olduğundan arayüzeyin mukavemeti sınırlı olur. Fiber yüzeyi üzerinde etkili bir yapışma olabilmesi için fiberin sıvı matriks içerisine gömülmesi fiber yüzeyinin ıslanmasını sağlayacağı için her zaman yararlıdır. Ancak bu şekilde sıvı matriks fiberin her tepe ve çukuruna ulaşabilir ve tam ıslanma sağlanabilir. Bu nedenle güçlü bir arayüzey ve iyi bir yapışma elde etmek için iyi bir ıslanma gerekli bir koşuldur.



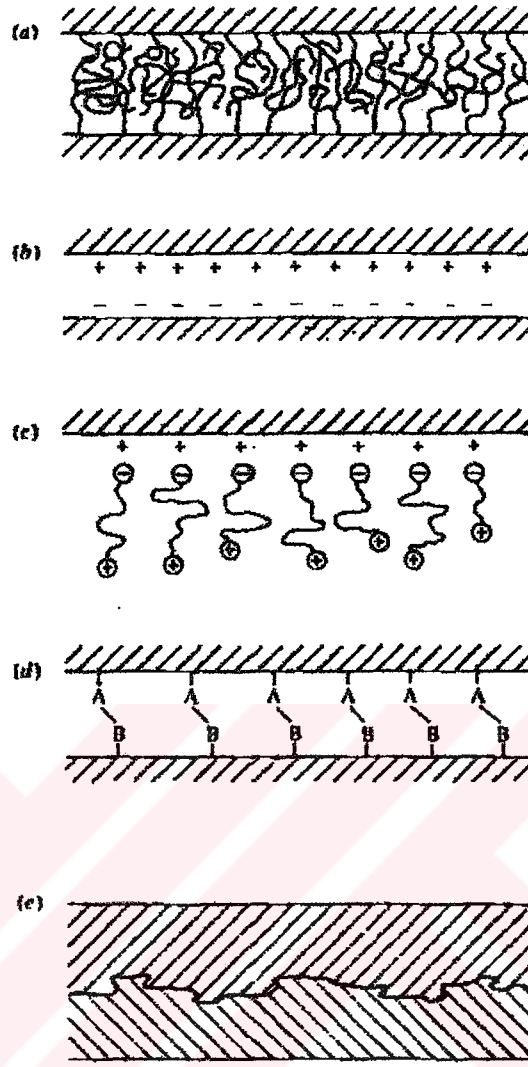
Şekil 2.3. Katı bir malzeme üzerine bir sıvı damlasının düşmesi ile oluşan yüzey gerilmeleri (γ), temas açısı (θ) ve ıslanabilirlik derecesinin şematik gösterimi. (a) iyi ıslanabilirlik, (b) kötü ıslanabilirlik.

2.2 Taneler Arası Difzyon

Şekil 2.4.a' da gösterildiği gibi bir yüzeyden diğer bir yüzeyin içerisine moleküler düzeyde polimer moleküllerinin difzyonuyla iki polimer yüzey üzerinde bir yapışma mümkündür. Yapışma mukavemeti katılan moleküllerin sayısına ve bir biri içerisine giren moleküllerin miktarına bağlı olacaktır. Birbirine karşı difzyon plastikleşmeyi kolaylaştıran çözücülerin ilavesi ile mümkün olmaktadır. Bu difzyon miktarı :

- a) Molekül yayınına ,
- b) Gerekli bileşenlere,
- c) Moleküler hareketin kolaylık derecesi gibi etmenlere bağlıdır.

Taneler arası difzyon plastisite modülü ve çözeltinin hazırlanma şekline bağlı olarak artırılabilir. Difzyon miktarı molekül şartlarının, katılan elemanların ve moleküllerin özelliklerine bağlı olacaktır. Taneler arası difüzyonu arttırmak için fiberler polimer matriks içerisine katılmadan önce polimerle kaplanırlar. Böylece istenilen yapışma miktarı sağlanabilir. Taneler arası difüzyon fenomeni yapışma bağtırlarında "otomatik yapışma" olarak da adlandırılır.



Şekil 2.4. a- Taneler arası difizyon , b- Elektrostatik çekimden meydana gelen yapışma, c- Polimer yüzeyindeki katyonik gurupların oluşturduğu yapışma , d- A ve B gurubu arası kimyasal yapışma , e- Mekanik yapışma.

2.3. Elektrostatik Çekim

Çekim kuvvetleri Şekil 2.4.b’de gösterildiği gibi bir yüzey negatif ve diğer yüzey pozitif elektrik ile yüklü olduğunda iki yüzey arasında meydana gelir.

Asit temelli olan bu reaksiyon tabakalar arası bir durumdur ve iyonik bir yapışmadır. Arayüzeyin mukavemeti yükün yoğunluğuna bağlı olacaktır. Elektrostatik çekim kuvvetleri kompozitlerin yapışma mukavemetinin hesabında büyük bir rol oynamasına rağmen cam fiberlerin yüzeyin üzerinde azalan elektrik yükleri daha önemli bir rol oynayacaktır. Bu yüzden eğer pozitif silanlar kullanılıyorsa bir anyon yüzeyi yani negatif yük taşıyan yüzey üzerinde

pozitif yük gruplarının etkisi olacağı umulur ve bu durum Şekil 2.4.c’de gösterilmiştir. Silan moleküllerinde pH değerinin kontrol edilmesini takiben elektrostatik çekim kuvvetleri su içerisinde direnç göstermediği için cam yüzeyi üzerinde kimyasal bir yapışmanın optimum çiftin etkileri ile meydana geleceği kesindir.

2.4. Kimyasal Yapışma

Bu yapışma şekli fiber takviyeli kompozit malzemeler için çok önemlidir. Fiber ve matriks arasında tam bir kimyasal bağın olduğu fiber glaslara kullanımı için geniş bir açıklama kimyasal bağlar yardımı ile yapılabilir. Polimer matriks ile yapışma, fiber yüzeyi üzerindeki kimyasal bir grup ve matriks içerisindeki bu reaksiyonu tamamlayıcı kimyasal bir diğer grup arasında şekillenir (Şekil 2.4.d). Yapışma mukavemeti kimyasal bileşenlerin tipine ve kimyasal bağların kuvvetine bağlıdır. Arayüzeyin hasarı moleküller arasındaki sınır bağların kırılmasıyla başlamaktadır. Yapışma şekli ve kırılmanın metodu termal dinamik eşitliklerle şekillenmektedir.

2.5. Mekanik Yapışma

Mekanik bağ, iki yüzeyin birbirine mekaniksel olarak tutunması veya kilitlenmesi ile oluşan bağ türü olup Şekil 2.4.e’de gösterilmiştir. Fiber yüzeyini tamamen ıslatan bir reçine bu yüzeyin tüm detaylarına bulaştırılmalıdır. Fiber üzerinde tekrarlanan sivri uçlu ve keskin köşeli çentikler oluşmuşsa çekmede zayıf bir arayüzey mukavemetine sahip olacaktır. Kaymada ise dayanım daha belirgin olabilmekte ve pürüzlülük derecesi ile artmaktadır. Arayüzeydeki çekme mukavemeti, eğer fiber doğrultusu büyük bir açı yapmıyorsa çok büyük olmayacaktır. Kayma mukavemeti rijitliğin derecesine bağlıdır. Fiber yüzeyinin rijitlik durumuna bağlı olan bu faktör yapışma mukavemetinin artması için bir potansiyeldir. Örneğin: Büyük yüzey alanları birbirine temas eden iki yüzey arasındaki etkileşimi arttırdığından dolayı kimyasal yapışma önemlidir. Mekanik yapışmanın geometrik bileşenlerini tespit etmek için kompozit malzeme içerisinde imalat sırasında ortaya çıkan bir çok arayüzey gerilmesi ve mekanik test esnasında ortaya çıkan yapışma mukavemeti tespit edilmelidir. Fiber ve matriksin farklı termal genleşme özelliklerinden dolayı polimerin ısıtılması sırasında reçinenin büzülmesi, arayüzeyde fiber ve bileşenlerinin geometrisine bağlı olarak arayüzeyde artık çekme basma ve kayma gerilmeleri oluşturabilir [15].

3. PROBLEMİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sayısal metotlar mühendislik problemlerinde sık sık kullanılmaktadır. Bu metotlar karmaşık problemlerin çözümünde kolaylık sağlar. Mühendislik problemleri çeşitli yöntemlerle ele alınıp analiz edilebilir. Genel olarak, çalışma şartları, yükleme durumu ve yapısal özelliklerin modellenmesinde analiz yöntemine bağlı olarak yaklaşımlar kabul edilir. Bu nedenle çoğu zaman düzeltme parametreleri kullanılarak, yapılan hataların telafi edilmesi yönüne gidilir. Yüksek sıcaklık ve yük altında çalışan mühendislik sistemlerinin verim ve emniyet güvenilirliği için, sistemin çalışma esnasında maruz kaldığı gerilmelerin doğru tahmini çok önemlidir. Gerilme analizi üzerinde yapılan çalışmalarda problem basit olarak kirişler, silindirler, küreler, dairesel plakalar ve buna benzer şekildeki elemanlarla sınırlıdır. Zaten kompleks yapılar bu söz konusu elemanların kombinasyonundan ibarettir. Genellikle deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla büyük uygunluk gösteren değerlerin elde edilebildiği yaklaşık çözümleme teknikleri; kolaylık, ucuzluk gibi özellikleri sebebiyle tercih edilir olmuşlardır. Bunu çok hızlı işlem yapan bilgisayarların da etkilediği açıktır. Sayısal analiz metotlarından biri olan “Sonlu Elemanlar Metodu” özellikle son yıllarda büyük gelişmeler göstererek kesin çözüme yakın neticeler veren bir metot olmuştur. Bu metotla bir çok bilim dalında değişik problemler ele alınıp çözülmektedir.

Bu yöntemde ilk olarak, çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etmeleri oranında elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır. Problemin özelliğine göre çözüm bölgesinin tamamının veya belirli bir kısmının sonlu elemanlara bölünmesi gerekebilir. Bu, şeklin geometrisine, dış kuvvetleri simetrik olup olmamasına ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Eleman rijitliğinin bulunması, elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında bir ilişki kurmak anlamına gelmektedir. Örneğin, bir elastisite probleminde elemana etki eden dış kuvvet ile yer değiştirmeler arasındaki ilişki bir lineer denklem takımı ile karakterize edilir. Elde edilen bu lineer ilişki vasıtasıyla elemanda meydana gelen gerilmeler daha önce verilen formülasyon vasıtasıyla hesaplanır.

Sayısal çözüm metotlarının popüler tekniklerinden olan sonlu elemanlar metodu karmaşık geometrik yapıya sahip elemanlarda kolaylık sağladığı için özellikle bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu metodun en önemli özelliği tüm problemi temsil etmek üzere elemanları bir araya koymadan önce her bir elemanın ayrı ayrı formüle edilebilmesidir. Gerilme analizi problemlerinde her bir elemana etki eden dış kuvvetler ve elemanın düğüm noktalarının yer değiştirme bağıntıları bulunursa tüm sistem çözülmüş olur. Bu şekilde kompleks bir geometriye sahip olan problem basit bir probleme dönüşmüş olur.

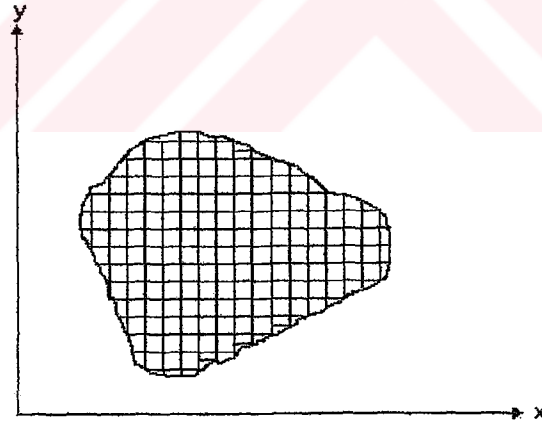
Farklı yapışma özelliklerine sahip arayüzeylerde tek fiberli pull out için sayısal analizler Faber [40] tarafından ve mükemmel bir arayüzey yapışması için Grande [25] tarafından aktarılmıştır. Sonlu elemanlar analizi Yun Fu [37] tarafından farklı arayüzey şartlarında Pull-out mekanizması ve Zhang [20] tarafından arayüzey gerilme transfer mekanizmasının gösterimi, reçine içerisindeki fiber uzunluğu boyunca kayma gerilmesinin dağılımı , arayüzeyin düzlemsel olarak çalışılmasının etkileri sunuldu. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak tek fiberli pull-out çalışmasının modellenmesi Sun [27] tarafından bir bilgisayar programı yardımı ile yapıldı.

Bu çalışmada izoparametrik sonlu elemanlar kullanılarak çözüm yapılmıştır. Matrix içerisindeki bir fibere aksenal çekme kuvveti uygulanarak fiber – matriks arayüzeyinde gerilme analizi yapılmıştır. Fiber ve matriksin mükemmel yapıştığı ve fiberin matriks içerisinde tamamen düz yerleştirildiği kabul edildi.

3.1. Problemin Sonlu Eleman Analizinde İzlenen Yol

Sonlu elemanlar metodu elastik sürekli ortamlara aşağıdaki adımlar izlenerek uygulanır.

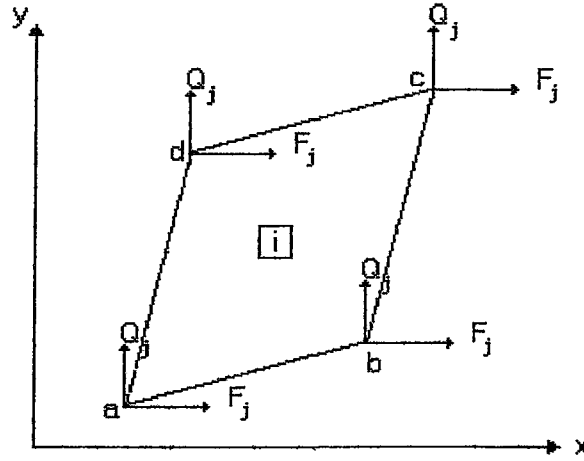
- a) Sürekli ortam, belli şekil ve sayıda sonlu elemana bölünür. Aşağıdaki şekilde sistem dörtgen elemanlara bölünmüştür (Şekil 3.1).



Şekil3.1. Gelişigüzel bir şeklin dikdörtgen elemanlara bölünmesi.

- b) Sonlu elemanlar, birbirine ve sürekli ortama belli sayıda düğüm noktaları ile bağlıdır. Bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri (düğüm deplasmanları) problemin bilinmeyenleridir. Şekil 3.2’de dörtgen elemanların a,b,c,d köşeleri düğüm noktalarıdır. Bu düğümlerden her biri , iki doğrultuda hareket edebilir. Yani iki serbestlik derecesine sahiptir. Bu nedenle

dörtgen elemanlarla çözümde, bilinmeyen sayısı her dörtgen için sekizdir. Bunlara “düğüm deplasmanları” denir.



Şekil 3.2. Bir i dikdörtgen elemanında düğüm noktalarındaki kuvvetler.

- c) Sonlu elemanın deformasyon hali kullanılarak, gerilme hali, gerilme şekil değiştirme bağıntıları yardımı ile düğüm deplasmanlarının eşitlikleri elde edilir.
- d) Sonlu elemana etki eden bütün iç ve dış yükler dengede olmalıdır. Bunun için virtüel işler prensibinden hareket edilir.
- e) Yukarıdaki takip edilen yol her sonlu elemana uygulanır. Aynı düğüm noktasına komşu elemanlardan gelen etkiler toplanır. Böylece sürekli ortamın çözüm bölgesi için bir denklem takımı elde edilir. Örnek olarak düzlem gerilme hali için düğüm sayısının iki katı kadar denklem elde edilir.
- f) Sürekli ortam için verilen sınır şartları kullanılır ve denklem takımı çözülür (sınır şartlarının işleme sokulması). Böylece düğüm deplasmanları bulunur.
- g) Düğüm deplasmanları yardımı ile elemanlardaki şekil değiştirmeler, gerilme bileşenleri ve istenirse asal gerilmeler hesaplanır [3].

3.2.Sonlu Eleman Formülasyonu

Bu bölümde izoparametrik sonlu elemanların formülasyonlarının hazırlanması ve gerekli tanımlamalar verilmektedir. Yaygın halde genelleştirilmiş koordinatlı sonlu eleman modellerinin türetilmesinde kartezyen koordinat takımının (x,y,z) yanı sıra lokal koordinat sistemleri de (r,s,t) kullanılmıştır. Genelleştirilmiş koordinatların, eleman düğüm noktalarına ait yer değiştirmelerinin lineer kombinasyonları oldukları elde edilmiştir.

3.3. Arayüzeyde Süreklilik

Sonlu eleman hesaplarında en önemli aşamalardan birisi interpolasyon fonksiyonlarının seçilmesidir. İnterpolasyon fonksiyonlarının seçilmesindeki zorluk, elemanların arayüzeydeki sürekliliğinin sağlanmasıdır.

Süreklilik için ortak eleman yüzeylerinde düğüm koordinatları ve yer değiştirmeleri aynı olmalıdır. Buda rijit cisim yer değiştirmelerinin ve sabit şekil değiştirmelerin olmasıyla sağlanmaktadır. Bu durum izoparametrik elemanlarda sağlanmaktadır. Böyle bir elemanda süreklilik otomatik olarak sağlanmaktadır.

Sonlu eleman tekniğinde genelleştirilmiş koordinatların kullanılmasıyla arayüzeyde süreklilik elde edilmektedir. Bunun için lokal koordinat sisteminde tarif edilen yer değiştirmeler izoparametrik formülasyonda da ihtiva edilmelidir. Bu nedenle interpolasyon fonksiyonları her düğümde "1" olacak şekilde ayarlanmalıdır.

3.4. Sürekli Elemanların Formülasyonu

Bir sürekli elemanın global serbestlik derecesine uyan eleman matrislerinin direk olarak hesaplanması sonlu eleman formülasyonunun en önemli kısımlarından biridir. Önce, elemanın lokal serbestlik derecesine uyan matrislerin formülasyonu verilecek, daha sonra bu değerler global koordinatlara transform edilecektir.

İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunda temel işlem, elemanın yer değiştirmelerinin ve koordinatlarının eleman tabii koordinat sistemi kullanılarak interpolasyon formunda ifade edilmesidir.

3.5. Tek Boyutlu Elemanlarda İnterpolasyon Kavramı ve Lagrange Polinomları

Sonlu eleman tekniğinde Lagrange ve Hermite polinomları kullanılmaktadır. Hermite polinomları özellikle ince plakların ve kabukların hesaplanmasında oldukça kullanışlıdır. Burada Lagrange polinomları kullanılmıştır. Bu tip polinomlar genellikle şu şekilde gösterilir:

$$L_k(r) = \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^n \frac{r - r_m}{r_k - r_m} = \frac{(r - r_0)(r - r_1) \dots (r - r_{k-1})(r - r_{k+1}) \dots (r - r_n)}{(r_k - r_0) \dots (r_k - r_{k-1})(r_k - r_{k+1}) \dots (r_k - r_n)} \quad [3.1]$$

burada $L_k(r)$,n lineer faktörlerin çarpımıdır. n polinomun derecesini göstermektedir. $r = r_k$ değerini aldığı anda $L_k(r_k)$ ' nin değeri birim değere eşittir. $r = r_m$ ve $m \neq k$ olduğunda L_k 'nin değeri sıfıra eşit olur. Bir $\Phi(r)$ fonksiyonu r_0, r_1, r_2, r_3 noktalarındaki değerleri ile verilmiş ise , bu Φ fonksiyonu üçüncü dereceden bir polinomla temsil edilebilir. $\Phi(r)$ fonksiyonu ;

$$\Phi(r) = \sum_{i=0}^3 \Phi_i L_i(r) = \Phi_0 L_0 + \Phi_1 L_1 + \Phi_2 L_2 + \Phi_3 L_3 \quad [3.2]$$

şeklinde gösterilir. Örnek olarak Φ_3 ' ün katsayısı;

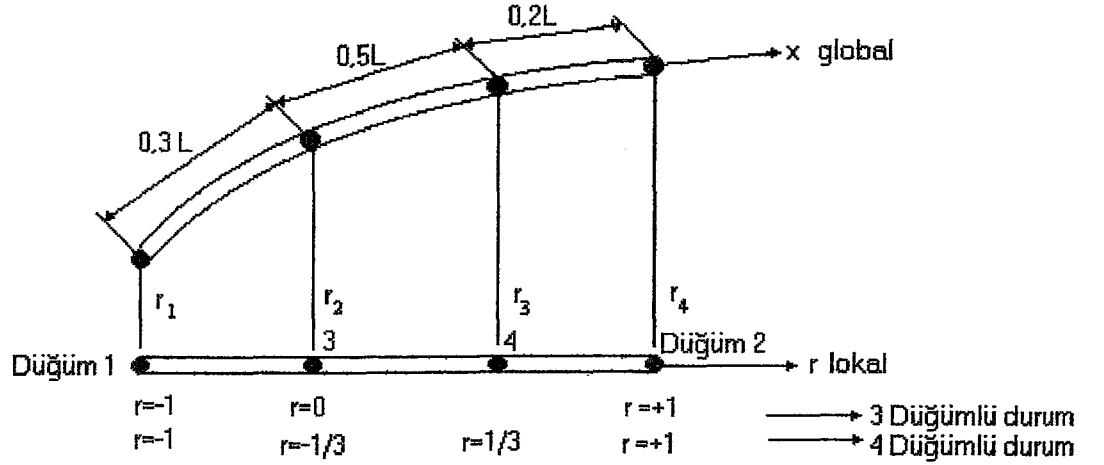
$$L_3(r) = \frac{(r - r_0)(r - r_1)(r - r_2)}{(r_3 - r_0)(r_3 - r_1)(r_3 - r_2)} \quad [3.3]$$

dir. Bu durumda interpolasyon fonksiyonu tek boyutlu bir eleman için;

$N_i(r) = L_i(r)$ yazılarak,

$$\Phi = \sum_{i=1}^n N_i r_i \quad [3.4]$$

şeklinde gösterilir. Örnek olarak aşağıdaki tek boyutlu elamanın interpolasyon fonksiyonlarının elde edilmesi incelenebilir.



Şekil 3.3. Bir boyutlu elemanda düğüm noktaları.

$N_i(r) = L_i(r)$ olarak bulunmuştur;

$$L_i = \prod_{\substack{m=0 \\ m \neq i}}^n \frac{r - r_n}{r_1 - r_m} \quad [3.5]$$

İfadelerinden hareket edilirse; üç düğümlü bir çubuk eleman olması durumunda:

1. Düğüm için:

$$L_1(r) = \frac{(r - r_2)(r - r_4)}{(r_1 - r_2)(r_1 - r_4)} = \frac{(r - 0)(r - 1)}{(-1 - 0)(-1 - 1)} = \frac{r(r - 1)}{2} = \frac{1}{2}(1 - r) - \frac{1}{2}(1 - r^2) \quad [3.6]$$

2. Düğüm için:

$$L_2(r) = \frac{(r - r_1)(r - r_2)}{(r_4 - r_1)(r_4 - r_2)} = \frac{(r + 1)(r - 0)}{(1 - 0)(1 + 1)} = \frac{r(r + 1)}{2} = \frac{1}{2}(1 + r) - \frac{1}{2}(1 - r^2) \quad [3.7]$$

3. Düğüm için:

$$L_3(r) = \frac{(r - r_1)(r - r_4)}{(r_2 - r_1)(r_2 - r_4)} = \frac{(r + 1)(r - 1)}{(0 + 1)(1 - 0)} = \frac{(r + 1)(r - 1)}{-1} = (1 - r^2) \quad [3.8]$$

Dört düğümlü bir çubuk eleman olsun, bir düğümlü için:

$$L_1(r) = \frac{(r-r_2)(r-r_3)(r-r_4)}{(r_1-r_2)(r_1-r_3)(r_1-r_4)} = \frac{(r+\frac{1}{3})(r-\frac{1}{3})(r-1)}{(-1+\frac{1}{3})(-1-\frac{1}{3})(-1-1)} = \frac{1}{16}(-9r^3 + r^2 + r - 1) \quad [3.9]$$

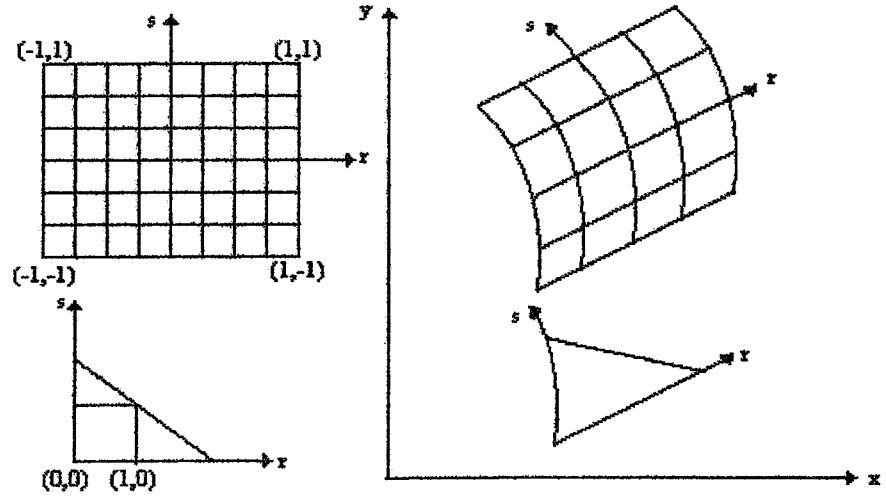
benzer yoldan $L_2(r)$, $L_3(r)$ ve $L_4(r)$ değerleri de hesaplanabilir. Bu ifadeler hesaplanıp tablo şeklinde aşağıda verilmiştir.

Tablo3.1. Eleman Düğümleri 2'den 4'e kadar değişebilen bir boyutlu elemana ait interpolasyon fonksiyonları.

	Sadece 3 nolu düğüm bulunduğunda dahil edilir	Sadece 3 ve 4 nolu düğüm bulunduğunda dahil edilir.
$L_1 = \frac{1}{2}(1-r)$	$-\frac{1}{2}(1-r^2)$	$\frac{1}{16}(-9r^3 + r^2 + 9r - 1)$
$L_2 = \frac{1}{2}(1+r)$	$-\frac{1}{2}(1-r^2)$	$\frac{1}{16}(-9r^3 + r^2 + 9r - 1)$
$L_3 = (1-r^2)$		$\frac{1}{16}(27r^3 + 7r^2 - 27r - 7)$
$L_4 = \frac{1}{16}(-27r^3 - 9r^2 + 27r + 9)$		

3.6. İki Boyutlu Elemanlarda Enterpolasyon Fonksiyonu

Kartezyen koordinatlarda verilen bazı iki boyutlu elemanların lokal koordinatlara transformasyonu Şekil 3.4'de görülmektedir. Burada lokal koordinatlardaki transformasyonu dikdörtgen veya üçgen olan, genel halde eğrisel çizgilerle çevrili iki boyutlu izoparametrik elemanlar görülmektedir. Lagrange polinomlarının ikişer ve üçer çarpımları ile sırası ile iki boyutlu ve üç boyutlu elemanların interpolasyon fonksiyonları bulunur.



Şekil 3.4. İki boyutlu elemanlarda dönüşüm .

Örnek olarak dört düğümlü bir dikdörtgen elemanın izoparametrik interpolasyon fonksiyonu;

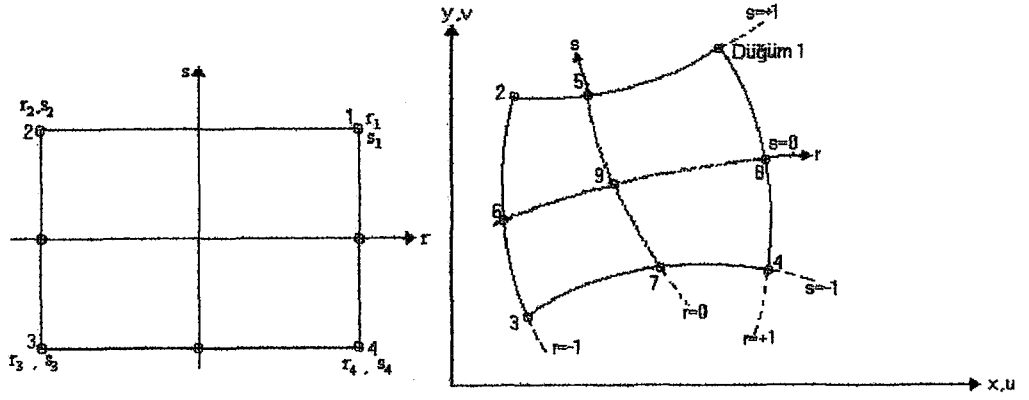
$$\phi(r,s) = N_1(r,s) \phi_1 + N_2(r,s) \phi_2 + N_3(r,s) \phi_3 + N_4(r,s) \phi_4 \quad [3.10]$$

şeklinde yazılır. Buradaki ifadeler aşağıda çıkartılmıştır.

$$N_1(r,s) = L_1(r) L_1(s) \quad [3.11]$$

$$N_2(r,s) = L_2(r) L_2(s)$$

Bu şekilde ayarlamakla her bir düğüm koordinatları o düğüm için değerleri yerine konulduğunda değeri 1 ve bu koordinatlar için diğer N kat sayıları sıfır olmaktadır. Bu sayede arayüzeylerde bire bir uygunluk sağlanmakta ve dolayısıyla süreklilik meydana gelmektedir. Aynı zamanda interpolasyon fonksiyonu her düğümdeki özellikleri sağlanmaktadır. İnterpolasyon fonksiyonunun dört düğümlü dikdörtgen eleman için elemanları Şekil 3.5’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.5. İki boyutlu dört düğümlü eleman.

3. Düğüm için:

$$N_3(r,s) = L_3(r)L_3(s) \quad [3.12]$$

$$L_3(r) = \frac{r - r_4}{r_3 - r_4} = \frac{r - 1}{-1 - 1} \quad [3.13]$$

$$L_3(s) = \frac{s - s_2}{s_3 - s_2} = \frac{s - 1}{-1 - 1} \quad [3.14]$$

$$N_3 = \frac{r - 1}{-2} \frac{s - 1}{-2} = \frac{1}{4}(1 - r)(1 - s) \quad [3.15]$$

4. Düğüm için:

$$N_4(r,s) = L_4(r) L_4(s) \quad [3.16]$$

$$L_4(r) = \frac{r - r_4}{r_3 - r_4} = \frac{r + 1}{1 + 1} \quad [3.17]$$

$$L_4 = \frac{s - s_1}{s_4 - s_1} = \frac{s - 1}{-1 - 1} \quad [3.18]$$

$$N_4 = \frac{r+1}{2} \frac{1-s}{2} = \frac{1}{4}(1+r)(1-s) \quad [3.19]$$

1. Düğüm için:

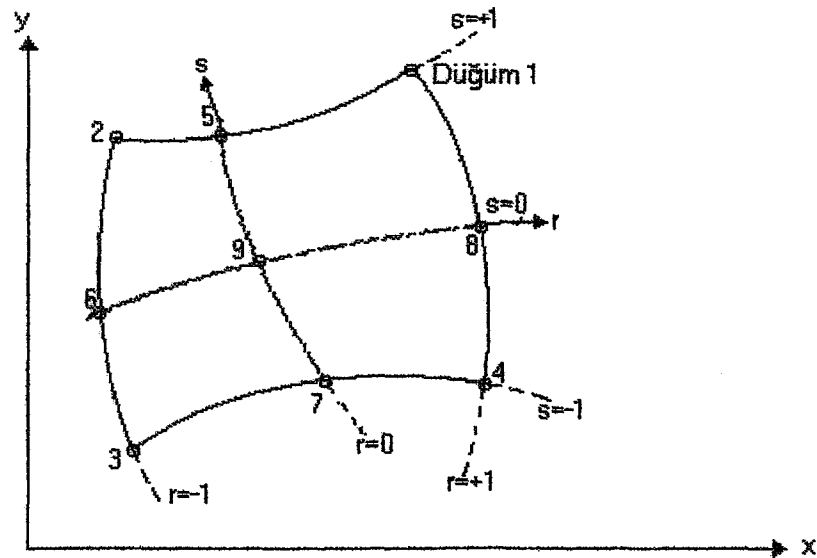
$$N_1(r,s) = L_2(r)L_2(s) \quad [3.20]$$

$$L_2(r) = \frac{r-r_1}{r_2-r_1} = \frac{r-1}{-1-1} \quad [3.21]$$

$$L_2(s) = \frac{s-s_3}{s_2-s_3} = \frac{s+1}{1+1} \quad [3.22]$$

$$N_2 = \frac{1-r}{2} \frac{1+s}{2} = \frac{1}{4}(1-r)(1+s) \quad [3.23]$$

4' ten daha fazla düğümlü izoparametrik elemanlara ait interpolasyon fonksiyonları benzer yollarla elde edilir. Bu interpolasyon fonksiyonları Tablo 3.2'de verilmiştir [5].



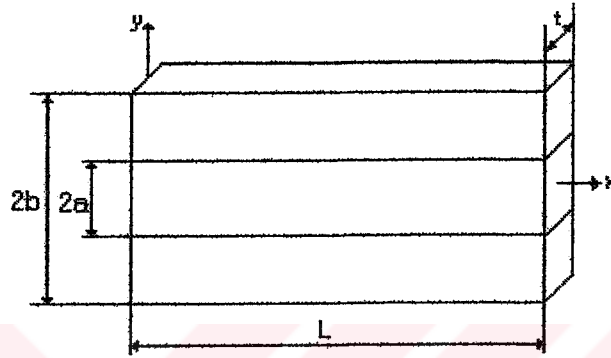
Şekil 3.6 Düğümleri 4' ten 9'a kadar değişebilen iki boyutlu eleman.

Tablo 3.2. Dügüm numaraları 4'ten 9' a kadar değışebilen iki boyutlu elemanların interpolasyon fonksiyonları.

	i= 5	i=6	i=7	i=8	i=9
$h_1 = \frac{1}{4}(1+r)(1+s)$	$-\frac{1}{2}h_5$			$-\frac{1}{2}h_8$	$-\frac{1}{4}h_9$
$h_2 = \frac{1}{4}(1-r)(1+s)$	$-\frac{1}{2}h_5$	$-\frac{1}{2}h_6$			$-\frac{1}{4}h_9$
$h_3 = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)$		$-\frac{1}{2}h_6$	$-\frac{1}{2}h_7$		$-\frac{1}{4}h_9$
$h_4 = \frac{1}{4}(1+r)(1-s)$			$-\frac{1}{2}h_7$	$-\frac{1}{2}h_8$	$-\frac{1}{4}h_9$
$h_5 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1+s)$					$-\frac{1}{2}h_9$
$h_6 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1-r)$					$-\frac{1}{2}h_9$
$h_7 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s)$					$-\frac{1}{2}h_9$
$h_8 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1+r)$					$-\frac{1}{2}h_9$
$h_9 = (1-r^2)(1-s^2)$					

4. SONLU ELEMAN FORMÜLASYONUNUN UYGULANMASI

Model olarak alınan elemanaşağıda görüldüğü gibi iki boyutlu bir cisimdir(Şekil 4.1). Problem düzlemsel olarak çözülecektir. Çözümde dört düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. Bu nedenle dört düğümlü elemana ait sonlu eleman formülasyonu incelenmektedir.



Şekil 4.1. Model olarak kullanılan iki boyutlu eleman.

İnterpolasyon kavramından hareketle Şekil3.6' da verilmiş olan dört düğümlü iki boyutlu bir izoparametrik elemana ait ifadeler kullanılarak, koordinat bağıntıları oluşturulmuştur.

$$x = \sum_{i=1}^n h_i x_i$$

[4.1]

$$y = \sum_{i=1}^n h_i y_i$$

[1] ifadelerinin açılması ile;

$$x = \frac{1}{4}(1+r)(1+s)x_1 + \frac{1}{4}(1-r)(1+s)x_2 + \frac{1}{4}(1-r)(1-s)x_3 + \frac{1}{4}(1+r)(1-s)x_4 \quad [4.2]$$

$$y = \frac{1}{4}(1+r)(1+s)y_1 + \frac{1}{4}(1-r)(1+s)y_2 + \frac{1}{4}(1-r)(1-s)y_3 + \frac{1}{4}(1+r)(1-s)y_4 \quad [4.3]$$

bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılar ise kısaca aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$x = h_1 x_1 + h_2 x_2 + h_3 x_3 + h_4 x_4 \quad [4.4]$$

$$y = h_1 y_1 + h_2 y_2 + h_3 y_3 + h_4 y_4$$

İnterpolasyon fonksiyonları elemanın her düğümünü sağlamalıdır. Örnek olarak 2 numaralı düğüm incelenebilir. İki numaralı düğümde $r=-1$, $s=1$

$$x = \frac{1}{4} 4 \cdot x_2 + 0 + 0 + 0 \dots \dots \dots x = x_2 \quad [4.5]$$

benzer biçimde $y=y_2$ olduğu görülebilir. Demek ki interpolasyon fonksiyonları doğru seçilmiştir. Yer değiştirmeler içinde benzer bir interpolasyon fonksiyonu yazılabilir.

$$u = h_1 u_1 + h_2 u_2 + h_3 u_3 + h_4 u_4 \quad [4.6]$$

$$v = h_1 v_1 + h_2 v_2 + h_3 v_3 + h_4 v_4$$

Dört düğümlü bir eleman için yer değiştirmeler [8]denklemini şeklinde ifade edilebilir.

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \quad [4.7]$$

$$v = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 xy$$

u ve v yer değiştirmeleri dört düğümlü için yazılarak, matris formuna getirilirse,

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4 & y_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_4 & y_4 & x_4 & y_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \end{Bmatrix} \quad [4.8]$$

Bu matris sembolik olarak,

$$\{\delta\} = [C] \cdot \{\delta\} \quad [4.9]$$

$$\{\alpha\} = [C]^{-1} \{\delta\} \quad [4.10]$$

şeklinde yazılabilir. Şekil değiştirme ise,

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad [4.11]$$

şeklinde olur. u ve v ifadelerinin [4.7] bağıntısına göre türevlerini almak oldukça kolaydır. Ancak interpolasyon fonksiyonlarıyla ifade edilen [4.6] bağıntılarından r ve s' i x ve y cinsinden çekip daha sonra türevlerini almak hemen hemen imkansızdır. Bunun yerine zincir kuralı kullanılarak, istenilen türevler elde edilir. Zincir kuralının bağıntısı [4.12]şeklindedir.

$$\frac{\partial}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \quad [4.12]$$

Benzer işlemler $\frac{\partial}{\partial s}$ içinde yapılır. Bu bağıntılar şu şekilde matris formunda yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad [4.13]$$

Bu ifade sembolik olarak ;

$$\frac{\partial}{\partial r} = J \frac{\partial}{\partial x} \quad [4.14]$$

şeklinde yazılabilir. Burada J , global koordinatlardaki türevleri lokal koordinatlara bağlayan “jakobiyen” operatörüdür. Buradan da global koordinatlardaki türev;

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{J}^{-1} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \quad [4.15]$$

olarak elde edilir. Jakobiyen bileşenleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{4} (1+s) \mathbf{x}_1 - \frac{1}{4} (1+s) \mathbf{x}_2 - \frac{1}{4} (1-s) \mathbf{x}_3 + \frac{1}{4} (1-s) \mathbf{x}_4 \quad [4.16]$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial s} = \frac{1}{4} (1+r) \mathbf{x}_1 + \frac{1}{4} (1-r) \mathbf{x}_2 - \frac{1}{4} (1-r) \mathbf{x}_3 - \frac{1}{4} (1+r) \mathbf{x}_4 \quad [4.17]$$

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{4} (1+s) \mathbf{y}_1 - \frac{1}{4} (1+s) \mathbf{y}_2 - \frac{1}{4} (1-s) \mathbf{y}_3 + \frac{1}{4} (1-s) \mathbf{y}_4 \quad [4.18]$$

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial s} = \frac{1}{4} (1+r) \mathbf{y}_1 - \frac{1}{4} (1+r) \mathbf{y}_2 - \frac{1}{4} (1+s) \mathbf{y}_3 - \frac{1}{4} (1+r) \mathbf{y}_4 \quad [4.19]$$

$-1 \leq r \leq +1$, $-1 \leq s \leq +1$ aralığında değişen her r ve s değeri için yukarıdaki $\partial \mathbf{x} / \partial \mathbf{r}$, $\partial \mathbf{x} / \partial s$, $\partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{r}$, $\partial \mathbf{y} / \partial s$ ifadelerinin kullanılmasıyla J jakobiyen operatörü teşkil edilmiş olur. J ifadesin , $r = r_i$ ve $s = s_i$ yani i,j noktalarında hesaplandığında dikkat edilmelidir. Benzer biçimde yukarıdaki türevler u ve v içinde oluşturulabilir.

En genel halde şekil değiştirme bağıntısı;

$$\{\epsilon\} = [\mathbf{N}].[C]^{-1}.\{\delta\} = [\mathbf{B}].\{\delta\} \quad [4.20]$$

şeklinde yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial u / \partial y \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} (1+s_j) & 0 & -(1+s_j) & -(1-s_j) & 0 & (1-s_j) & 0 \\ (1+r_i) & 0 & (1-r_i) & 0 & -(1-r_i) & -(1+r_i) & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad [4.21]$$

$$\begin{Bmatrix} \partial v / \partial x \\ \partial v / \partial y \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} J_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & (1+s_j) & 0 & -(1+s_j) & 0 & -(1-s_j) & 0 & (1-s_j) \\ 0 & (1+r_i) & 0 & (1-r_i) & 0 & -(1-r_i) & 0 & -(1+r_i) \end{bmatrix} u \quad [4.22]$$

Bu bağıntıdaki u vektörü,

$$u^T = \{u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4 \} \quad [4.23]$$

şeklindedir. r_i , s_j noktasında [4.21] ve [4.22] bağıntılarının değerlendirilmesi ile şekil değiştirme yer değiştirme transformasyon matrisi [B] elde edilir. Buradan şekil değiştirmeler için:

$$\epsilon_i = B_{ij} \cdot u_j \quad [4.24]$$

eşitliği yazılabilir. Buradan gerilmeler;

$$B_{ij} = \frac{1}{4} J_{ij}^{-1} \begin{bmatrix} (1+s_j) & 0 & -(1+s_j) & 0 & -(1-s_j) & 0 & (1-s_j) & 0 \\ 0 & (1+r_i) & 0 & (1-r_i) & 0 & -(1-r_i) & 0 & -(1+r_i) \\ (1+r_i) & (1+s_j) & (1-r_i) & -(1+s_j) & -(1-r_i) & -(1-s_j) & -(1+r_i) & (1-s_j) \end{bmatrix} \quad [4.25]$$

$$\sigma_{ij} = D \cdot \epsilon_{ij} \quad [4.26]$$

ifadesi ile elde edilir.

4.1. Direngenlik Matrisinin Teşkili

Sonlu elemanlar metodunda çözüm yapmak için çözümü yapılan sistemdeki tüm değişkenlerin yer aldığı direngenlik teşkil edilmesi gerekir. Enterpolasyon kavramından hareketle iki boyutlu bir izoparametrik elemanda koordinatlar şu şekilde yazılabilir;

$$x = \sum_{i=1}^n N_i x_i \quad [4.27]$$

$$y = \sum_{i=1}^n N_i y_i$$

ayrıca x ve y yönündeki yer değiştirmeler de aynı şekilde yazılabilir;

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i \quad [4.28]$$

$$v = \sum_{i=1}^n N_i v_i$$

En kolay varyasyon hesabı olan virtüel işler prensibi kullanılarak, bir elemana ait direngenlik matrisi teşkil edilir. Gerilmelerden doğan iç kuvvetlerin virtüel işi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\delta w = \iiint \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dv \quad [4.29]$$

Dış kuvvetlerin virtüel işi ise,

$$\delta w = \{\delta \bar{\delta}\}^T \{P\} \quad [4.30]$$

olur. Minimum potansiyel enerji prensibine göre [4.29] ve [4.30] eşitlikleri birbirine eşit olmalıdır.

$$\{\delta \bar{\delta}\}^T \{P\} = \iiint \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dv \quad [4.31]$$

σ için verilen $\sigma = D \cdot \varepsilon$, $\varepsilon = D \cdot \delta$ ($\varepsilon = B \cdot U$) bağıntısı kullanılırsa,

$$\{\delta \bar{\delta}\}^T \cdot \{P\} = \int_V \{\delta \varepsilon\}^T |D| \{\varepsilon\} dv \quad [4.32]$$

$$\{\delta \bar{\delta}\}^T \cdot \{P\} = \int_V \{\delta \bar{\delta}\}^T |B|^T |D| \{\varepsilon\} dv \{\delta\}$$

$$\{\delta \bar{\delta}\}^T \cdot \{P\} = \{\delta \bar{\delta}\}^T \int_V |B|^T |D| |B| dv \{\delta\}$$

$$\{P\} = \int_v |B|^T |D| |B| dv \{\delta\} \quad [4.33]$$

$$|K_i| = \int_v |B|^T |D| |B| dv \{\delta\} \quad [4.34]$$

[4.34] ifadesi ile verilen $|K_i|$ matrisi i nolu elemanın direngenlik matrisidir.

Burada;

$|B|$: Şekil değıştirmeler ve yer değıştirmeler arasındaki transformasyon matrisidir.

$|D|$: Elastisite matrisidir.

$$\{P\} = |K_i| \{\delta\} \quad [4.35]$$

4.2. Nümerik İntegrasyon

İzoparametrik sonlu eleman çözümlerinde en önemli aşamalardan biriside nümerik integrasyondur. Her eleman için K direngenlik matrisini teşkil edip, integrasyon almak analitik yoldan neredeyse imkansızdır. Bunun yerine bilgisayardan yararlanarak, nümerik integrasyon alınır. Direngenlik matrisi ;

$$|K_i| = \int_v |B|^T |D| |B| dv$$

olarak elde edilmişti. İki boyutlu elemanlarda ;

$$dv = \det J. dr. ds \quad [4.36]$$

olur. İntegral içerisindeki işlemler F ile gösterilirse,

$$|K_i| = \int_v F. dr. ds \quad [4.37]$$

bağıntısı elde edilir. Burada F matrisi ;

$$F = B^T \cdot D \cdot B \cdot \det J \quad [4.38]$$

Şeklinde ifade edilir. Nümerik integrasyon alındığında iki boyutlu elemanlar için ;

$$K_i = \sum_{i,j} F \cdot dr \cdot ds \quad [4.39]$$

olarak bulunur. İfadede F_{ij} , r_i ve s_j noktalarında bulunan F matrisidir. t_{ij} kalınlık $\alpha_{ij} = \alpha_i \alpha_j$ değerlerine bağlı olarak bulunan sabitlerdir. F fonksiyonunun r_i, s_j modelleme noktaları ve α_{ij} ağırlık fonksiyonları integrasyon işleminde minimum hata verecek şekilde ayarlanır. Bunun için gerekli modelleme noktalarının sayısı artırılır. İki boyutlu dikdörtgen izoparametrik elemanlarda bu integrasyon şöyle açılır :

$$\int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} F(r,s) \cdot dr \cdot ds = \sum_{i,j} \alpha_i \cdot \alpha_j F(r_i, s_j) \quad [4.40]$$

Çeşitli nümerik integrasyon metotları vardır. Bunlar içinde özellikle en kullanışlıları şunlardır:

1- Newton – Cotes Formülleri

2- Gauss Formülleri

Gauss integrasyon metodunda modelleme noktaları yüzeyin iç taraflarındadır. Dönel elemanların çözümünde kutupsal ve silindirik koordinatlarda türev işlemlerinde R yarı çapına bağlı $1/R$ çarpanı işleme girdiğinden Gauss integrasyon metodunu kullanmak çok daha kullanışlı olmaktadır. Çünkü eksen üzerinde bulunan düğümlerde modelleme noktası aynı nokta olmadığından $1/R$ ifadesi belirsizliğe gitmektedir. [4.40] bağıntısında bulunan α_i , α_j , r_i , s_j değerleri Gauss Legendre nümerik integrasyonuna göre elde edilmiş tablolardan seçilebilir.

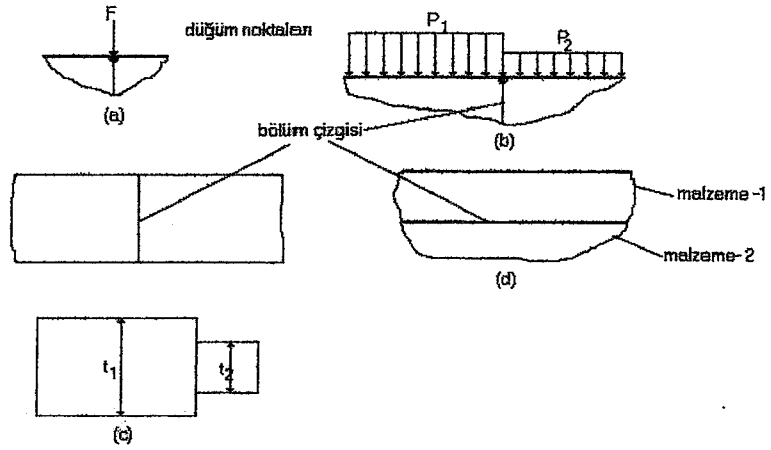
Tablo 4.1.Gauss Legendre nümerik integrasyonuna göre seçilen noktalar (r_i) ve ağırlık değerleri (α_i)

N	r_i	α_i
1	0.(15 basamak)	2. (15 basamak)
2	$\pm 0,577350269189626$	1,000000000000000
3	$\pm 0,774596669241483$ 0,000000000000000	0,555555555555556 0,888888888888889
4	$\pm 0,861136311594053$ $\pm 0,339981043584866$	0,347854845137454 0,652145154862546
5	$\pm 0,906179845938664$ $\pm 0,538469310105683$ 0,000000000000000	0,236926885056189 0,478628670499366 0,568888888888889
6	$\pm 0,932469514203152$ $\pm 0,661209386466265$ $\pm 0,238619186083197$	0,171324492379170 0,360761573048139 0,467913934572691

Tabloda bulunan n , izoparametrik sonlu elemanın bir doğrultusu üzerindeki düğüm sayısıdır. 4 düğümlü bir dikdörtgen izoparametrik eleman için n=2 alınır.

4.3. Sistemin Sonlu Elemanlara Bölünmesi:

Sonlu elemanların boyutu, sayısı, şekli ve büyüklüğü gerçek sisteme uygun olarak seçilmelidir. Burada esas gaye, doğru çözüme basit yer değişimi fonksiyonları ile yaklaşma imkanı verecek olan, yeteri kadar küçük sonlu elemanların seçilmesidir. Sonlu elemanların sayısı çok fazla olduğu takdirde bilgisayar kapasitesinin de o oranda artırılması gerekir. Sistem süreksizlik noktalarından, yani geometri, yükleme, malzeme vb. büyüklüklerin özelliklerinin ani değiştiği yerlerden bölünür. Şekil 4.2’de a,b yükleme, c geometri, d malzeme özelliklerinin değiştiği doğal sınırları göstermektedir. Çözüm bölgesi tamamı ile düzgün bir ağ ile bölünür veya gerilmelerin ani değişmesi beklenen bölgelerde daha küçük sonlu elemanlar kullanılabilir.



Şekil 4.2. Doğal sınırların değişimi.

Bu problemin analizinde örnek bir ağ yapısı oluşturularak bilgisayarda otomatik bölmeleme yapılmıştır. Bu ağ yapısı Şekil 4.3' de görüldüğü gibidir. Bu model aynı zamanda analizde kullanılan bir yapıya da örnektir.

4.4 Sonlu Elemanların Numaralandırılması:

Bilgisayar programı için sonlu elemanlar ve düğüm noktaları uygun biçimde numaralandırılır. Sonlu elemanların ve düğüm noktalarının numaralandırılması; bilgisayar programında, her sonlu elemanın numarasının ve bu elemana ait düğüm noktalarının numaralarının giriş bilgileri (dataloader) içerisinde ayrı ayrı verilmesi gerektiğinden önem taşır. Sistemin rijitlik matrisinin bant genişliği, sonlu elemanların numaralandırılması ile yakından ilgilidir.

$$b=s(n+1)$$

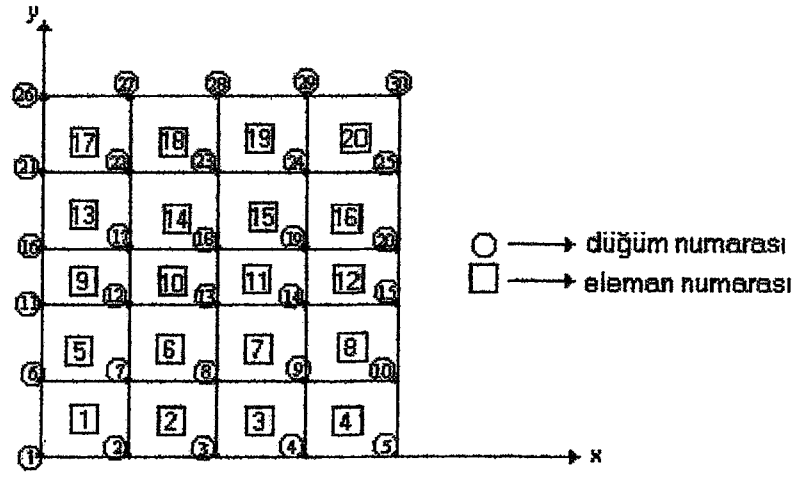
[4.41]

bağıntısı ile hesaplanır. Burada,

b: bant genişliği,

n: sistemdeki bütün elemanlar dikkate alınarak tespit edilmiş, herhangi bir elemandaki düğüm numaraları arasındaki en büyük fark,

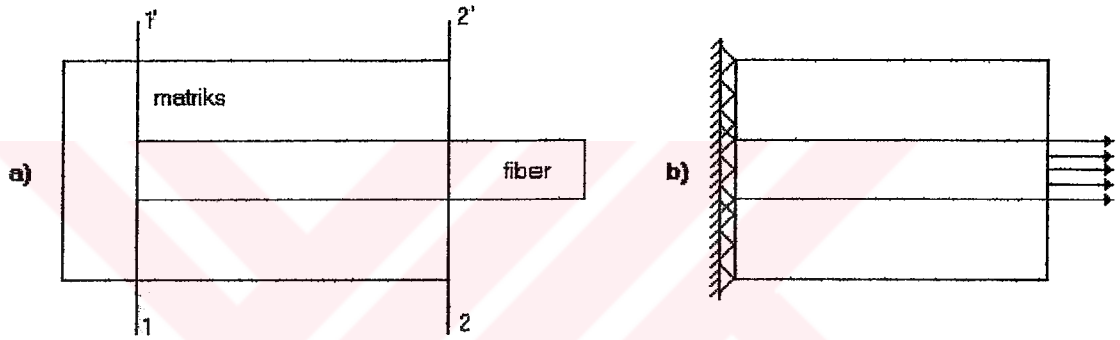
s: her düğüm noktasındaki serbestlik derecesidir [3].



4.3. Modelin eleman ve düğüm numaraları.

5. PROBLEMİN TANIMI

Fiber-matriks arayüzeyinin özelliklerini tespit etmek için araştırmacıların geliştirdiği bir çok model ve çözüm metotları vardır. Çözüme yaklaşım amacına göre farklılık gösteren bu yöntemlerde araştırmacıların ortak amacı fiber ile matriks arasında meydana gelen gerilme transfer mekanizmasını anlamaktır. Bu çalışmada matriks içerisine boydan boya yerleştirilmiş bir fibere aksenal çekme yükü uygulanarak fiber – matriks arayüzeyinde kayma ve çekme gerilmelerinin değişimi incelenmiştir. Çözüm için seçilen modele en yakın metot “Tek Fiberli Pull – out ” metodudur. Şekil 5.1-a’ de görülen model bu metoda aittir. Bu model 1-1’ ve 2-2’ doğruları ile kesilerek Şekil 5.1-b ‘ de görülen modele ulaşılmıştır.



Şekil 5.1 Model olarak kullanılan kompozitin görünüşü (a- Pull – out modeli, b- Problemin çözümünde kullanılan model).

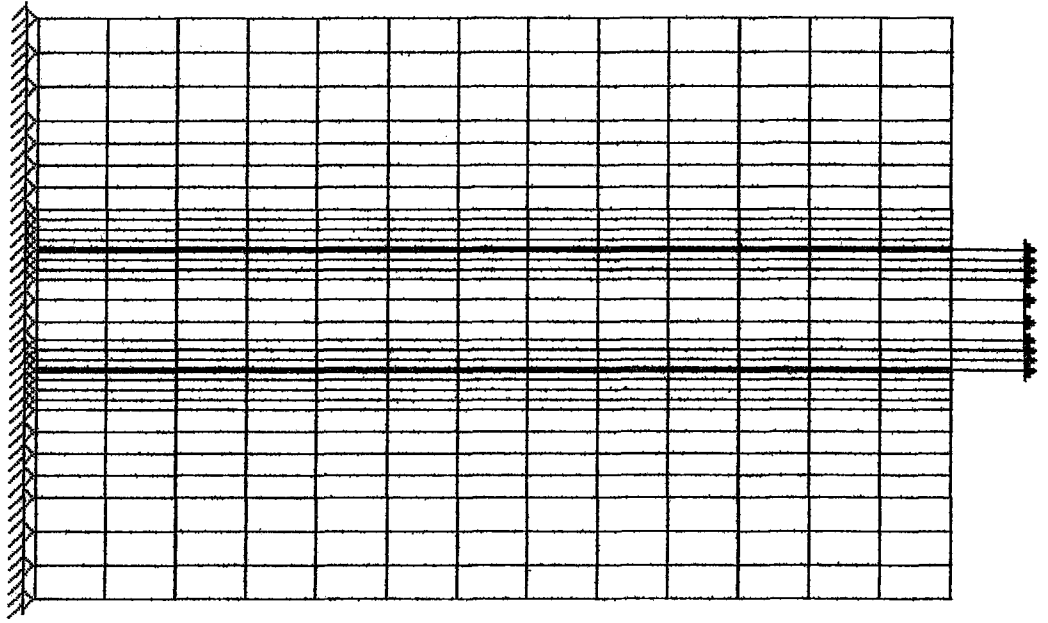
5.1. Problemin Çözümü ile İlgili Bilgiler

Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu ile düzlem gerilme analizi yapan bir program kullanılarak sayısal çözüm yapılmıştır. Her çeşit düzlem gerilme problemlerini sonlu elemanlar metoduyla çözen bir bilgisayar programı fortran programlama diline göre düzenlenmiştir. Ağ yapısı oluşturulacak model ile ilgili bilgileri içeren verilerin bilgisayara yüklenmesi ile ağ oluşturma işlemi otomatik olarak bir başka bilgisayar programı kullanılarak elde edilmiştir. Ağ yapısını oluşturmak için önce düğümlerin koordinatları okutturulmuş, daha sonra her eleman için en küçük düğüm noktasından başlayarak ve saat ibrelerinin tersi yönde hareket ederek, diğer bütün düğüm noktalarına numara verilmiştir. Ağ yapısını oluşturan ve sonuçları bulan programlar birbirinden ayrı çalışmaktadır. Her iki program da bilgisayara yüklendikten sonra, programı çalıştırmak için önce bilgisayara düğüm sayısı, eleman sayısı, poisson oranı, elastite

modülü, kalınlık, sıfır deplasman sayısı, bant genişliği, uygulanan kuvvet ve kuvvet sayısı, ayrıca kuvvetin uygulandığı düğüm sayısı ve kuvvetin uygulandığı düğüm numaraları gibi bilgiler programa girilir. Bu verilere bağlı olarak program her bir düğüm noktasındaki gerilme dağılımını hesaplayarak sonuçlar elde edilir. Sonuçların yer aldığı data dosyaları doğrudan grafiğe dönüştürülür. Bu programda sonlu eleman analizi için işlem sırasının akış şeması şu şekilde yazılabilir:

1. Problemin geometrik sınır şartlarının belirlenmesi,
2. Problemi oluşturan şeklin sonlu elemanlara bölünmesi,
3. Her elemanın ve düğümün numaralandırılması
4. Her düğümün koordinatlarının belirlenmesi
5. Üzerine yük gelen düğüm koordinatları ve yük miktarının belirlenmesi,
6. Mesnet bulunan düğüm numaraları ve koordinatları ile mesnet türünün belirlenmesi,
7. Problemin rijitlik matrisinin teşkil ettirilmesi,
8. Her bir düğüme gelen düğüm kuvvetlerinin tespit edilmesi,
9. Her bir düğümdeki gerilme ve şekil değiştirmelerin tespit edilmesi.

Bu çalışmada dört düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılarak problemin ağ yapısı oluşturulmuştur. Problemin geometrik boyutları bir bilgisayar programına okutularak otomatik bölmeleme işlemi yaptırılması ile 2,3,4 nolu maddeler bilgisayar yardımıyla yapıldı. Buna göre problemde 9143 düğüm , 8880 eleman , 223 mesnet kullanılarak 25 noktadan 1 GPa şiddetinde yayılı yük uygulanmıştır. Çözümü yapacak olan bilgisayar programı tüm bu verileri bir data dosyasından okuyarak çözüm yapar. Problemin ağ yapısı temsili olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Modelin Sonlu Elaman ağı.

Problemın ağı yapısında çok sayıda düğüm kullanıldı ve özellikle arayüzey bölgesi sık tarandı. Bunun nedeni arayüzey bölgesindeki gerilme dağılımının daha net anlaşılması ve elde edilecek verilerden çizilecek olan grafiklerin daha detaylı olmasıdır. Model iki boyutludur, fiber matriks içerisine boydan boya gömülmüş ve tam olarak yapışmanın sağlandığı kabul edilmiştir. Problemın geometrik sınır şartları ile ilgili kabuller 2. bölümde verilmiştir.

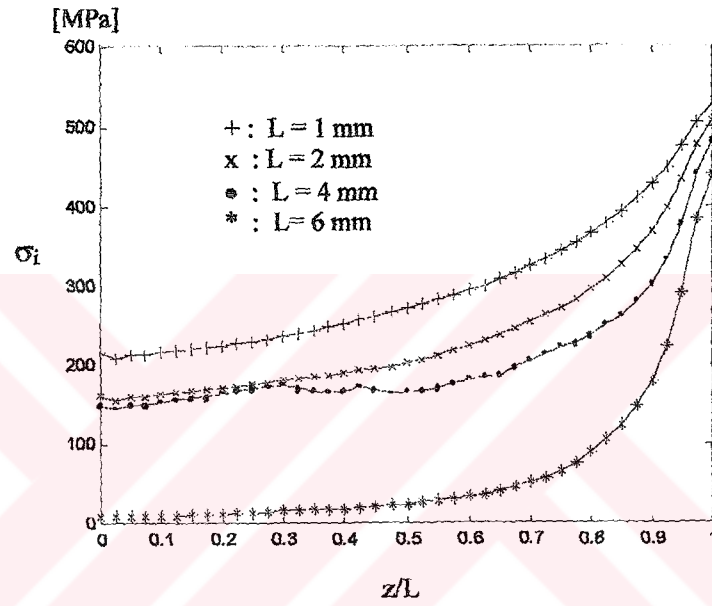
Tek fiberli pull – out problemlerinin sayısal olarak çalışılmasında karşılaşılan en büyük güçlük fiberin matriksden ayrılmaya başlaması ile meydana gelen durumun incelenmesidir. Fiber matriksden ayrılmaya başladığı zaman problem plastik şekil değiştirme analizi gerektirir. Fakat gerilme analizini sayısal olarak yapabilmek için arayüzeyin geometrik verilerine ihtiyaç vardır. Bu tespitler ancak deneysel yollarla yapılabilmektedir ve arayüzey için net bir fiziksel ifade kabul edilemeyeceğinden problemın çözümü ancak elastik sınırlar dahilinde yapılmıştır.

6. SONUÇLAR

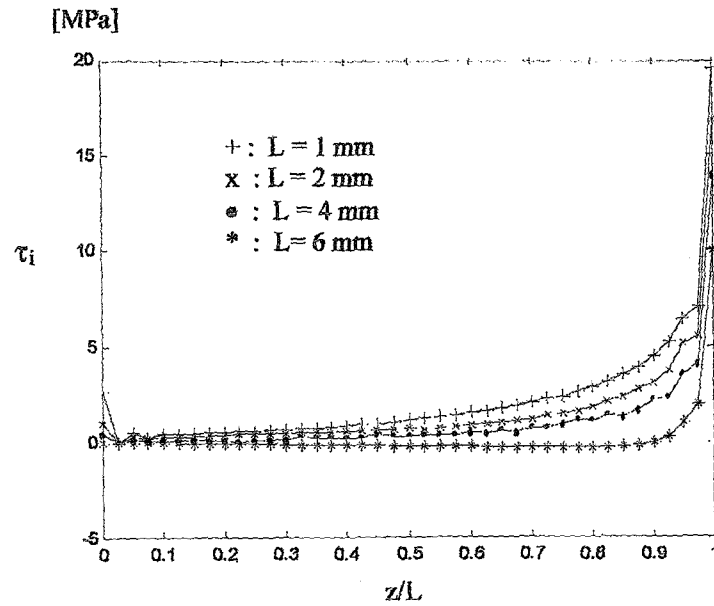
6.1. Aynı Fiber Çapına Karşılık Boy Değişiminin Gerilme Dağılımına Etkisi

Tablo 6.1. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve 6061 Al matris malzemelerinin özellikleri [10].

	Fiber	Matris
Malzeme Türü	SiC	6061 Aliminyum
Elastisite Modülü [MPa]	394.000	70.000
Poisson Oranı	0.25	0.33
Kayma Modülü [MPa]	26315,8	157600



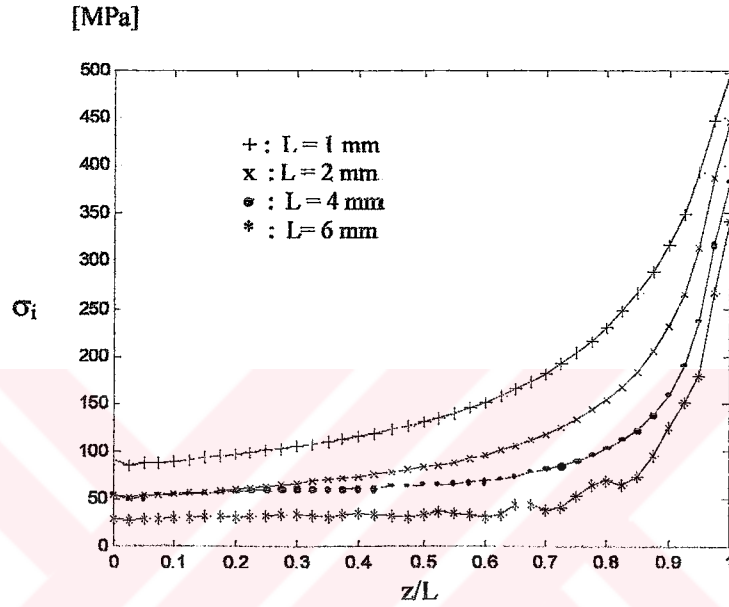
Şekil 6.1.1. Arayüzey Çekme gerilmelerinin boyla değişimi.



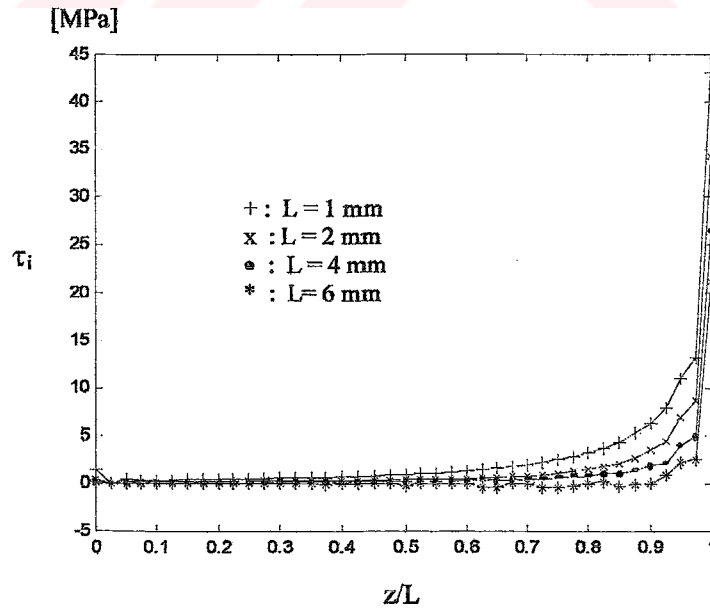
Şekil 6.1.2. Arayüzey Kayma gerilmelerinin boyla değişimi.

Tablo 6.1.2. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Polyester reçine matriks malzemelerinin özellikleri [19].

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Bakır	Polyester Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	117000	3500
Poisson Oranı	0,343	0,38
Kayma Modülü [MPa]	43769	1268



Şekil 6.1.3. Arayüzey Çekme gerilmelerinin boyyla değişimi

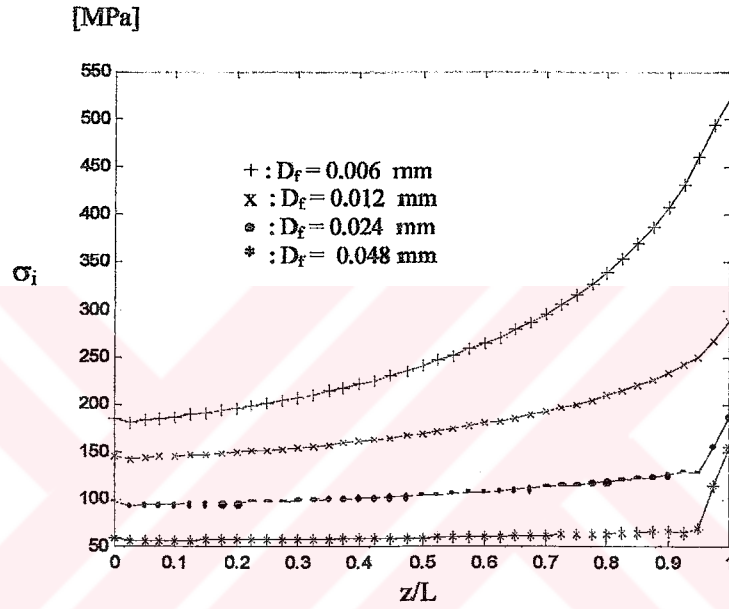


Şekil 6.1.4. Arayüzey Kayma gerilmelerinin boyyla değişimi

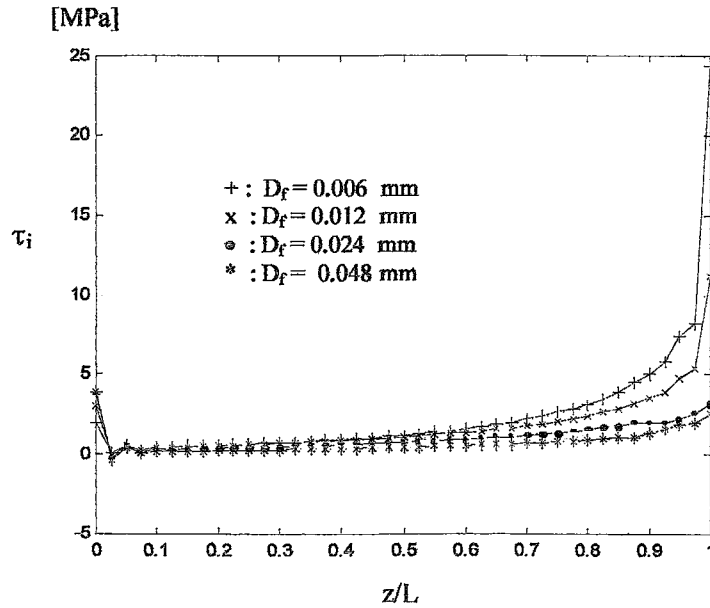
6.2. Aynı Boya Karşılık Fiber Çapı Değişiminin Gerilme Dağılımına Etkisi

Tablo 6.2.1. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri [20].

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	3000
Poisson Oranı	0,2	0,4
Kayma Modülü [MPa]	95840	1071



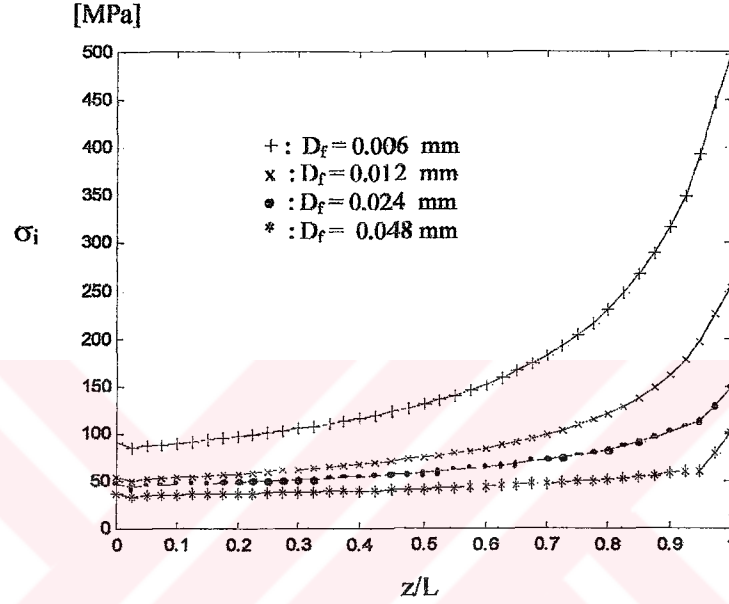
Şekil 6.2.1. Arayüzey Çekme gerilmelerinin çapla değişimi.



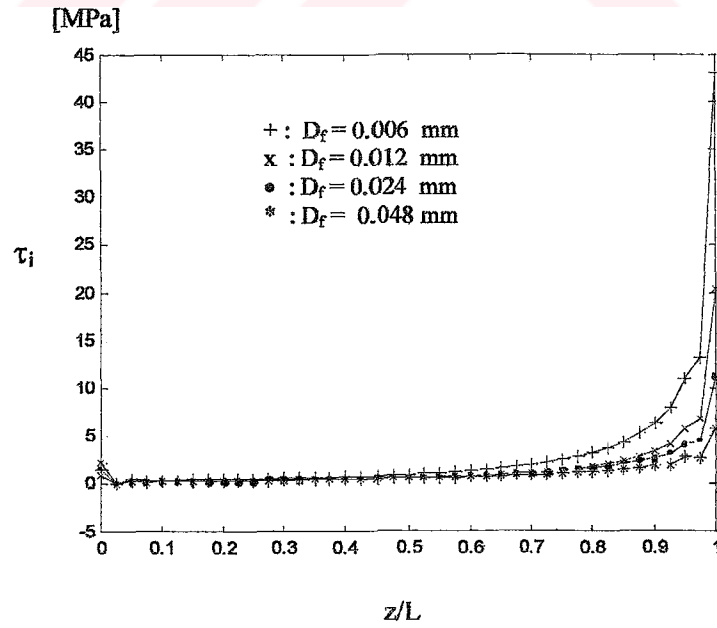
Şekil 6.2.2. Arayüzey Kayma gerilmelerinin çapla değişimi.

Tablo 6.2.2. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Polyester reçine matriks malzemelerinin özellikleri [19].

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Bakır	Polyester Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	117.000	3500
Poisson Oranı	0,343	0,38
Kayma Modülü [MPa]	43559	1268



Şekil 6.2.3. Arayüzey çekme gerilmelerinin çapla değişimi.

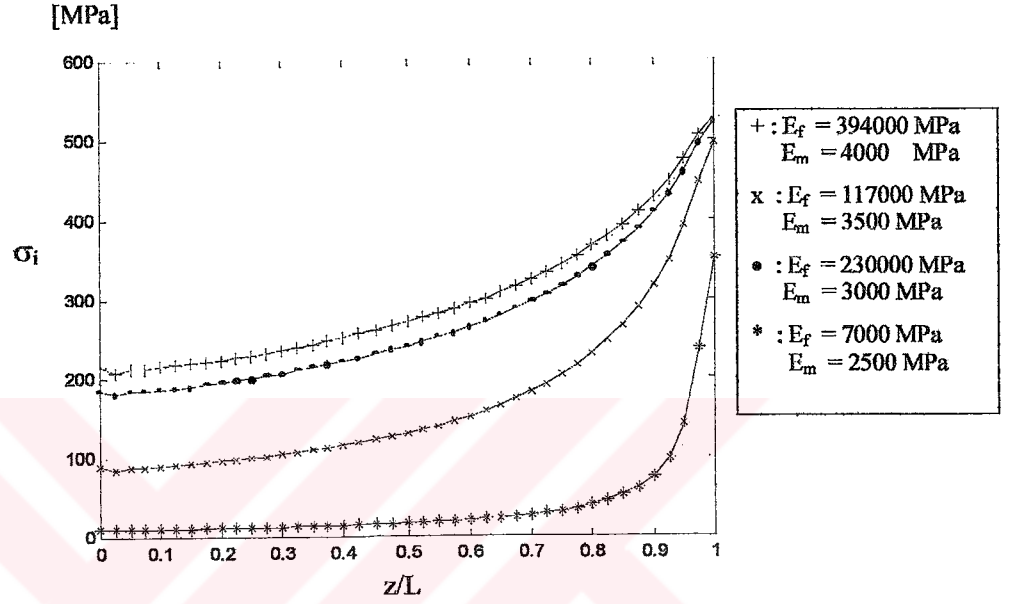


Şekil 6.2.4 Arayüzey Kayma gerilmelerinin çapla değişimi.

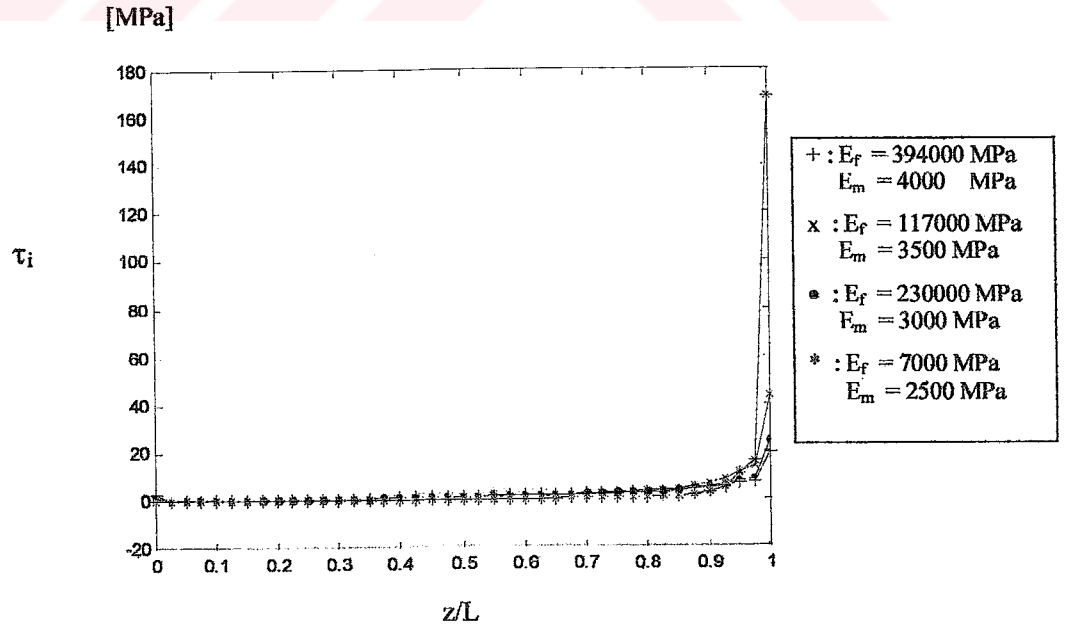
6.3. Aynı Geometrik Özelliklere Sahip Kompozitlerde Malzeme Değişiminin Gerilme Dağılımına Etkisi

Bu bölümde kullanılan kompozitlerin boyları ve çapları aynı fakat malzemeleri farklıdır. Bu durum da arayüzeyde meydana gelen gerilmelerin nasıl değişeceği gösterilmiştir.

$L = 1\text{mm}$ ve $d_f = 0.006\text{ mm}$ için değişik malzemelerde meydana gelen gerilme dağılımı.

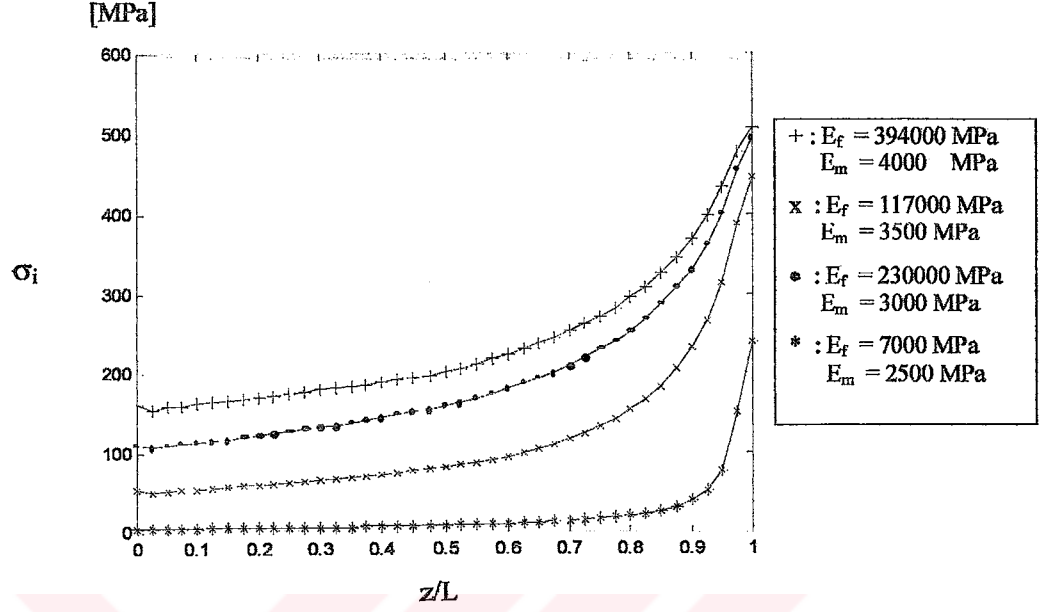


Şekil 6.3.1. Arayüzey çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi.

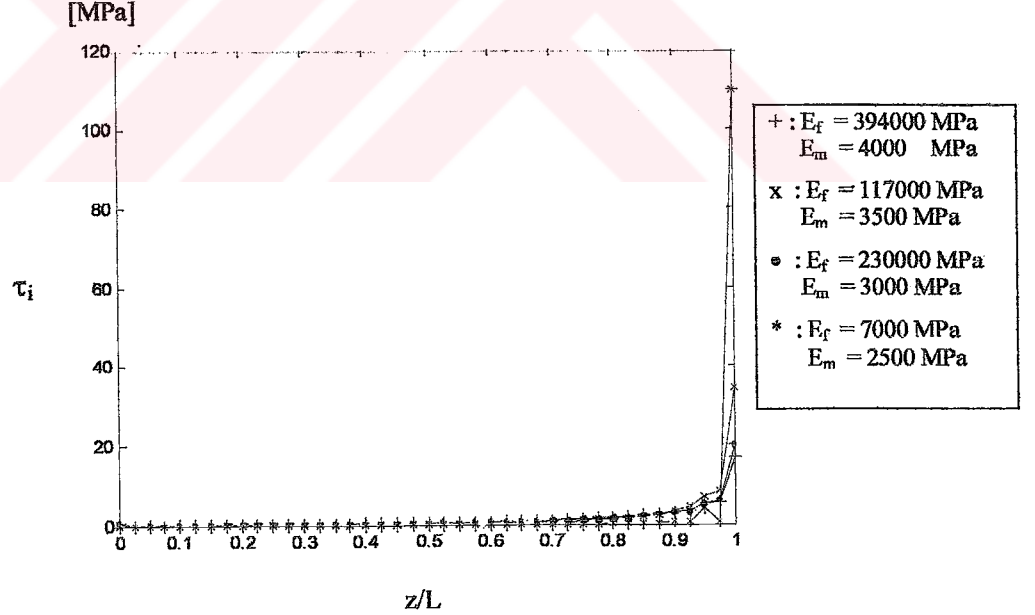


Şekil 6.3.2. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi

$L = 2 \text{ mm}$ ve $d_f = 0.006 \text{ mm}$ için değişik malzemelerde meydana gelen gerilme dağılımı.

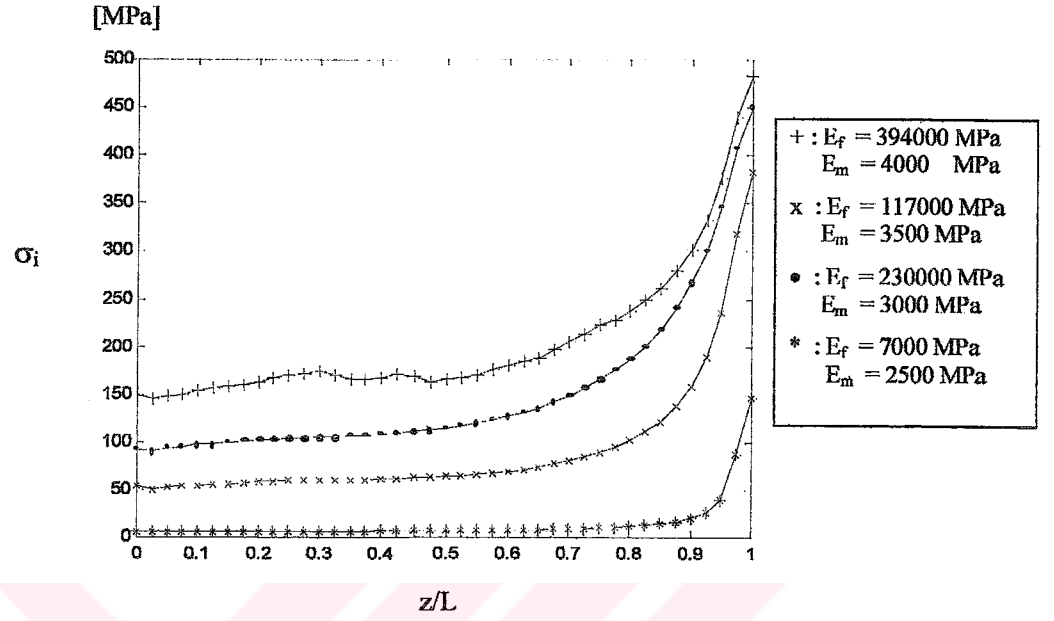


Şekil 6.3.3. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi.

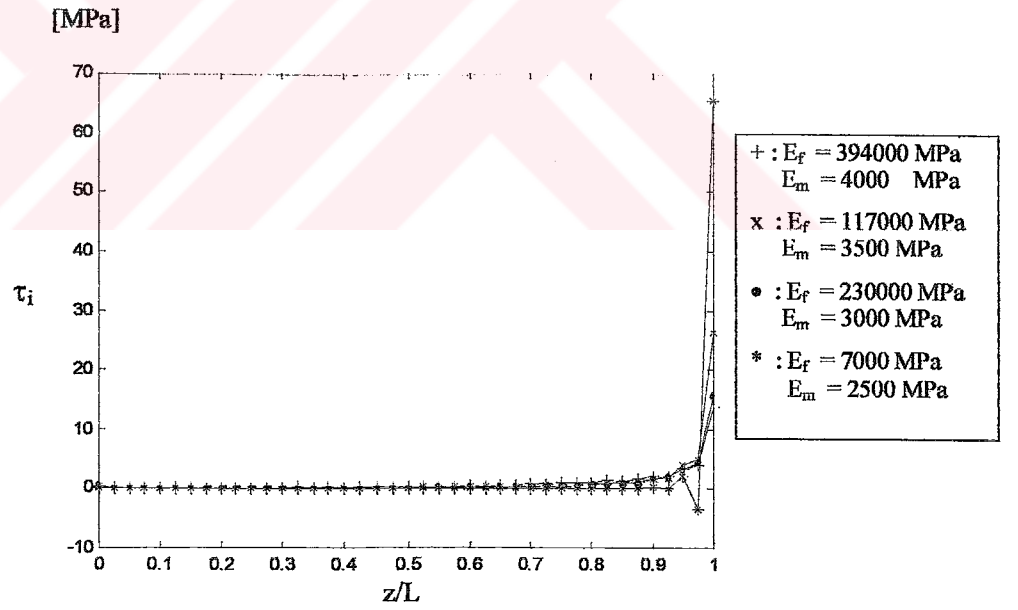


Şekil 6.3.4. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi.

$L = 4 \text{ mm}$ ve $d_f = 0.006 \text{ mm}$ için değişik malzemelerde meydana gelen gerilme dağılımı.

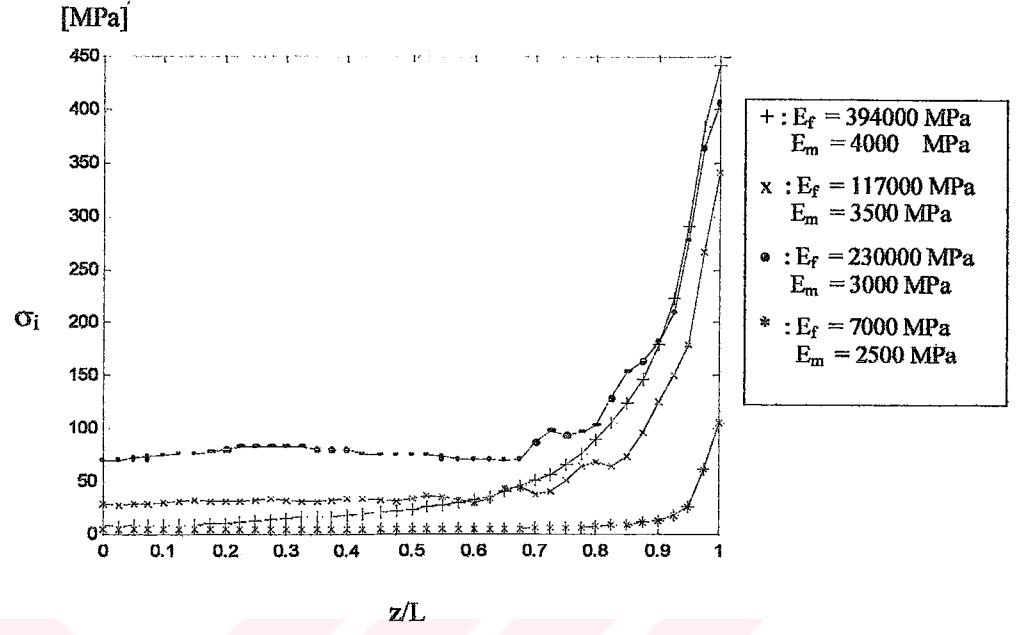


Şekil 6.3.5. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi.

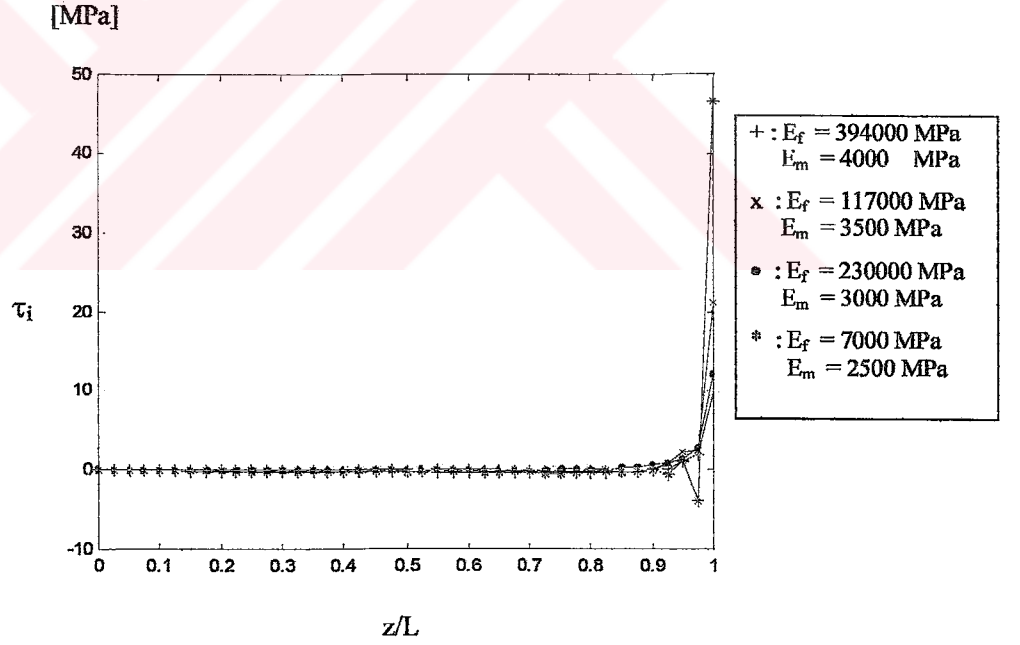


Şekil 6.3.6. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi.

$L = 6 \text{ mm}$ ve $d_f = 0.006 \text{ mm}$ için değişik malzemelerde meydana gelen gerilme dağılımı.



Şekil 6.3.7. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi.



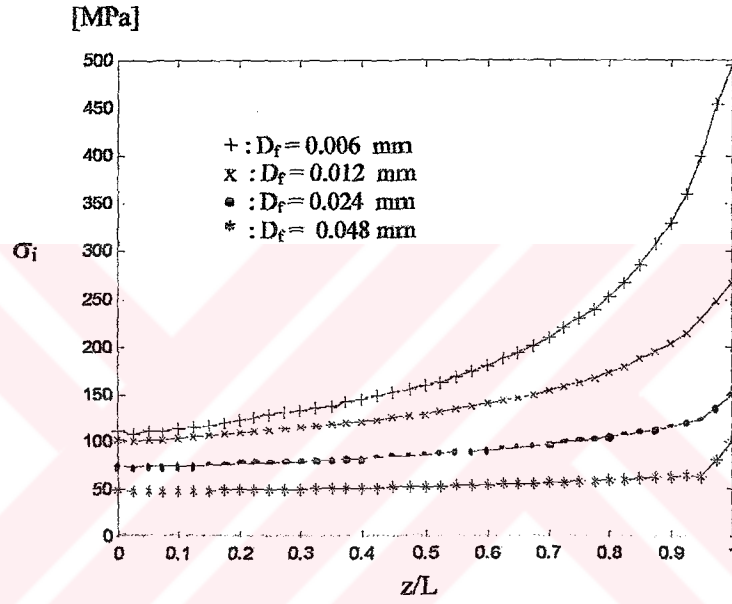
Şekil 6.3.8. Arayüzey kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi.

6.4. Aynı Matriks Malzemesi İle Farklı Fiber Malzemelerinin Kullanılması Durumunda Gerilme Dağılımının İncelenmesi

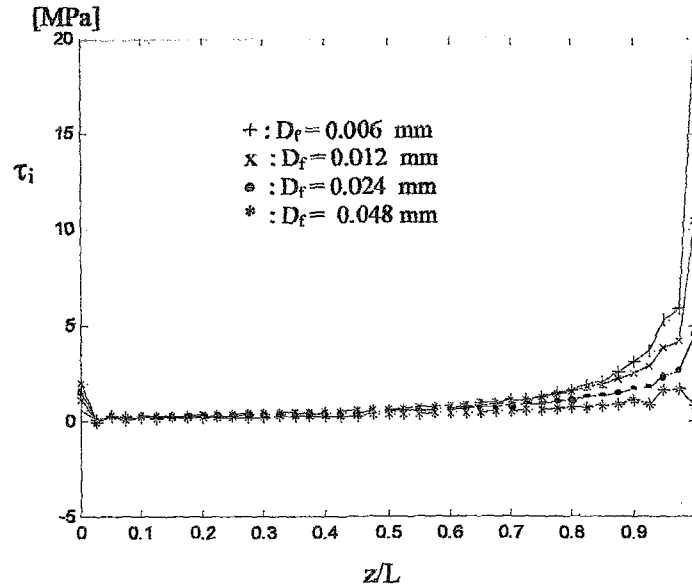
Sabit boy değişken fiber çapı olması durumunda meydana gelen değişimin incelenmesi.

Tablo 6.4.1. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri ($L=2\text{ mm}$).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	3000
Poisson Oranı	0.2	0.4
Kayma Modülü [MPa]	95840	1071



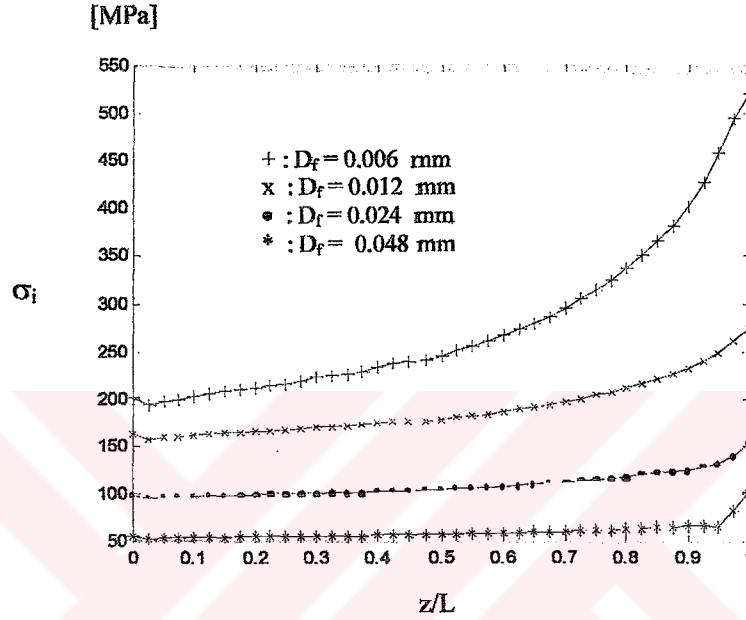
Şekil 6.4.1. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.



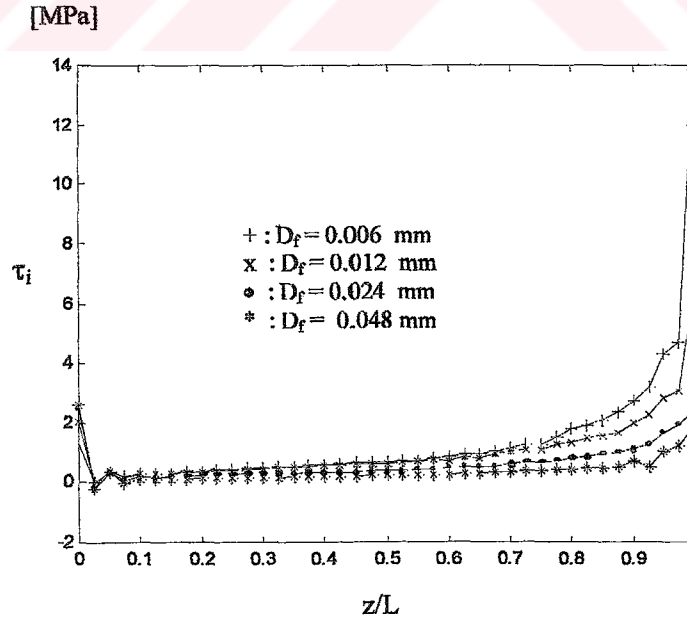
Şekil 6.4.2. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.

Tablo 6.4.2. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri (L = 2mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	SiC	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	394.000	3000
Poisson Oranı	0.25	0.4
Kayma Modülü [MPa]	26315,8	1071



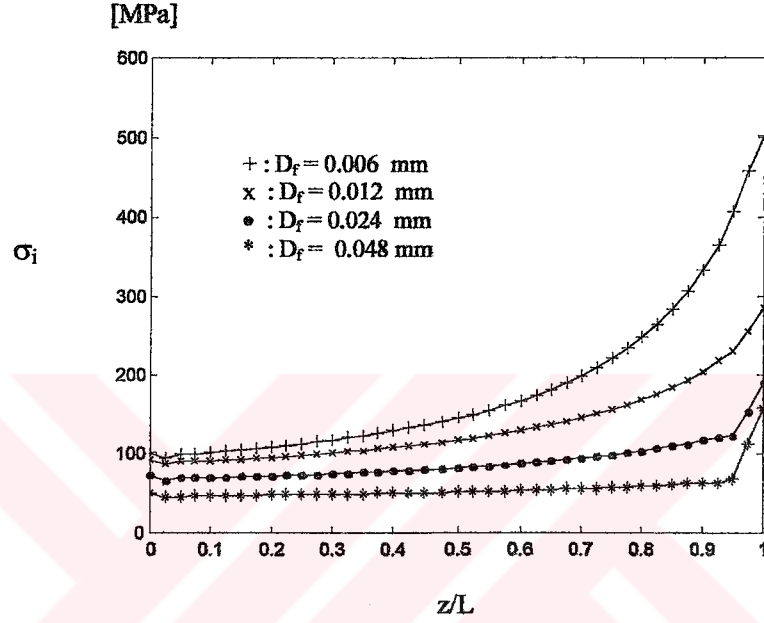
Şekil 6.4.3. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.



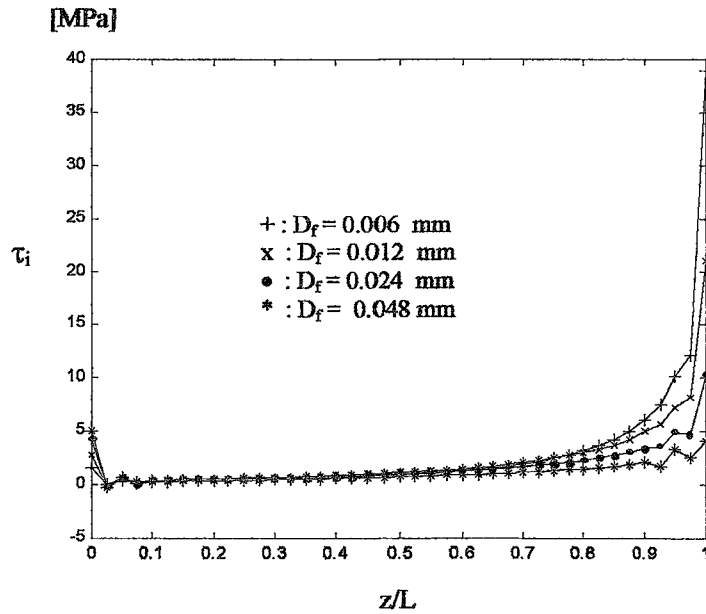
Şekil 6.4.4. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.

Tablo 6.4.3. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri (L = 1 mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	SiC	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	394.000	3000
Poisson Oranı	0.25	0.4
Kayma Modülü [MPa]	26315,8	1071



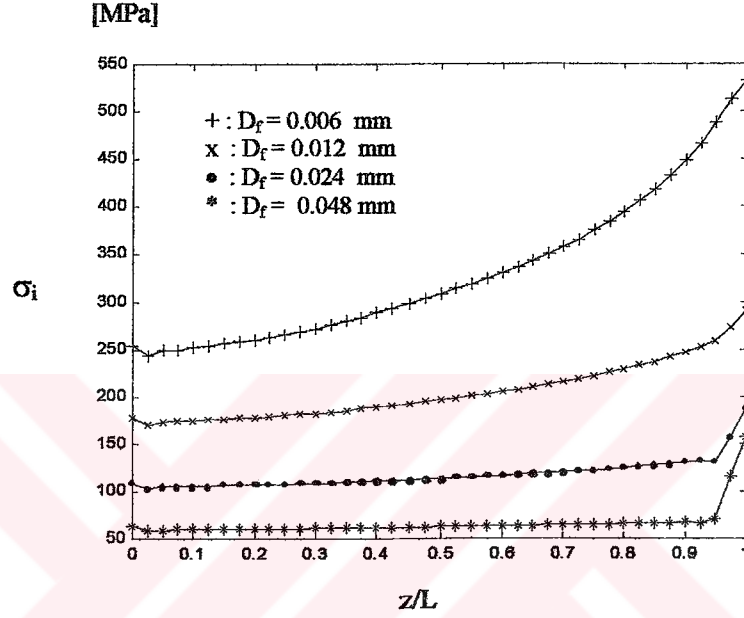
Şekil 6.4.5. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.



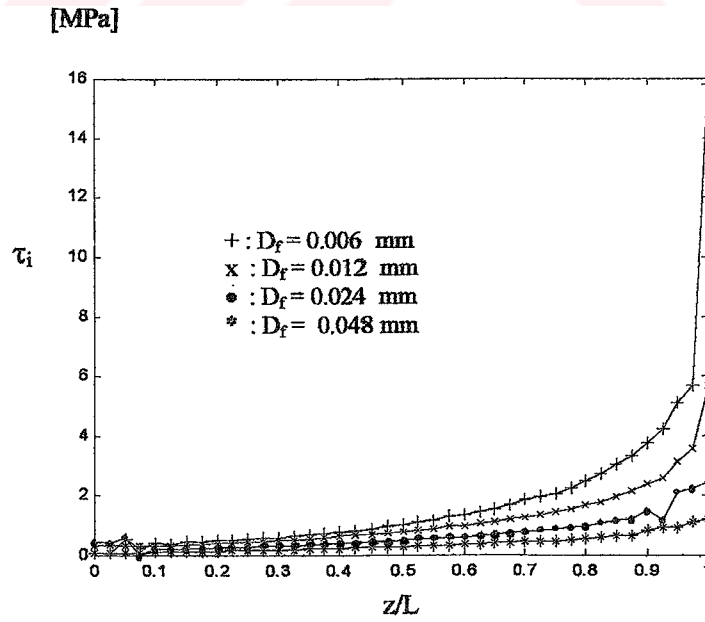
Şekil 6.4.6. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.

Tablo 6.4.4. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri ($L = 1\text{mm}$).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Bakır	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	117.000	3000
Poisson Oranı	0.343	0.4
Kayma Modülü [MPa]	43559	1071



Şekil 6.4.7. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.

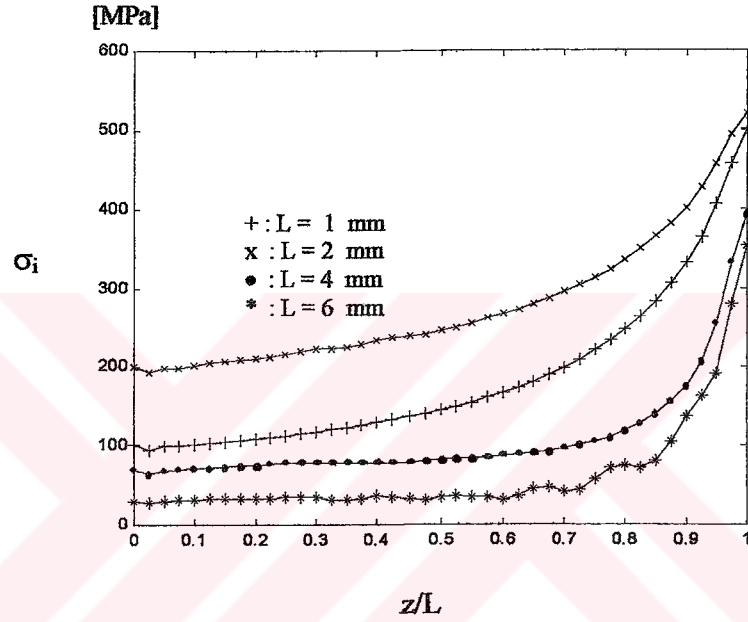


Şekil 6.4.8. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boy ve değişken fiber çapında dağılımı.

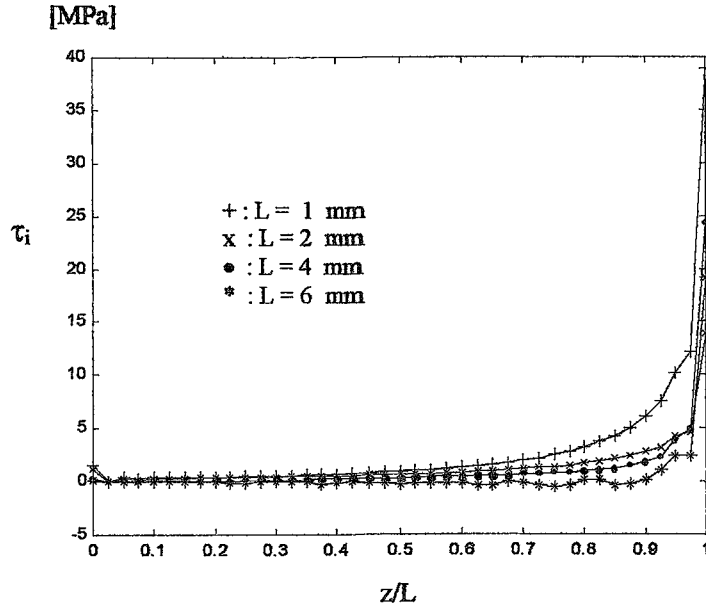
Sabit fiber çapı değişken boy olması durumunda meydana gelen değişimin incelenmesi.

Tablo 6.4.5. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.006$ mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	SiC	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	394.000	3000
Poisson Oranı	0.25	0.4
Kayma Modülü [MPa]	26315,8	1071



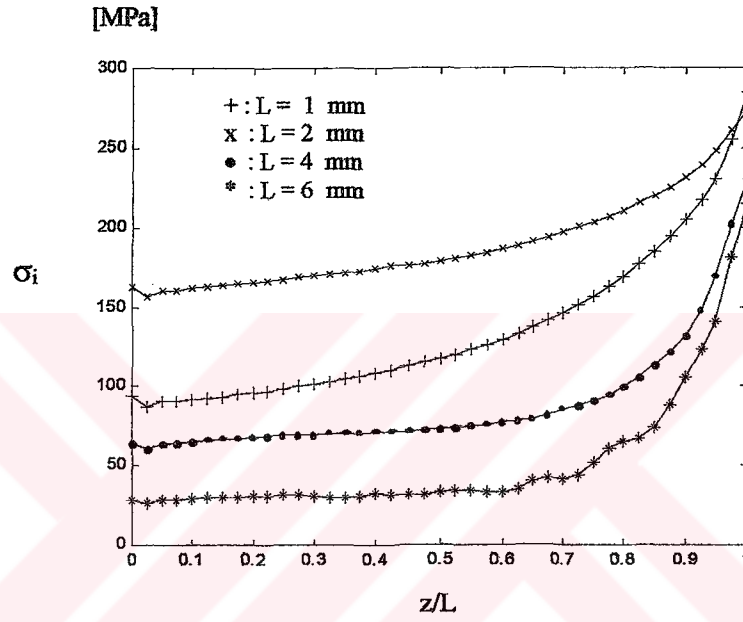
Şekil 6.4.9. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.



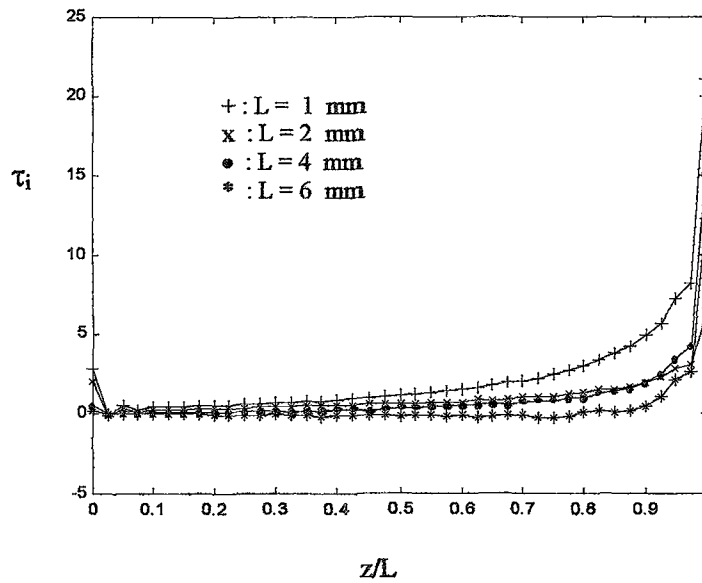
Şekil 6.4.10. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

Tablo 6.4.6. Kompozit bileşenleri SiC fiber ve Epoksi reçine matris malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.012$ mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	SiC	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	394.000	3000
Poisson Oranı	0.25	0.4
Kayma Modülü [MPa]	26315,8	1071



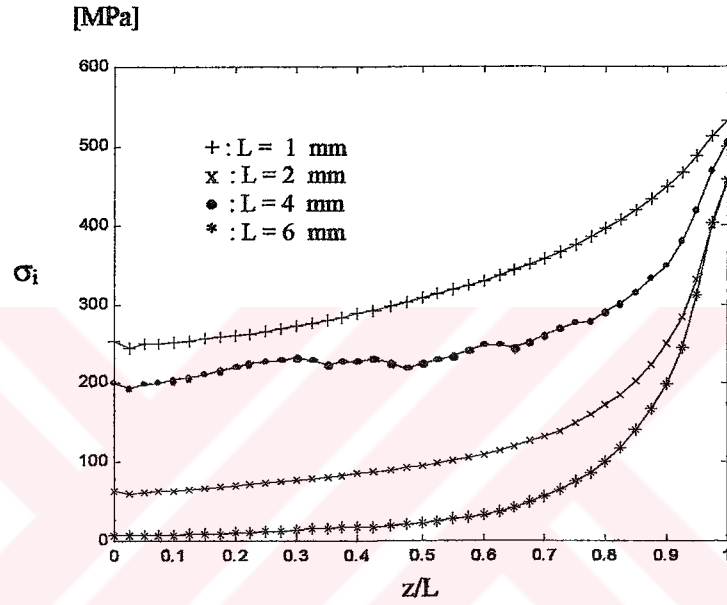
Şekil 6.4.11. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.



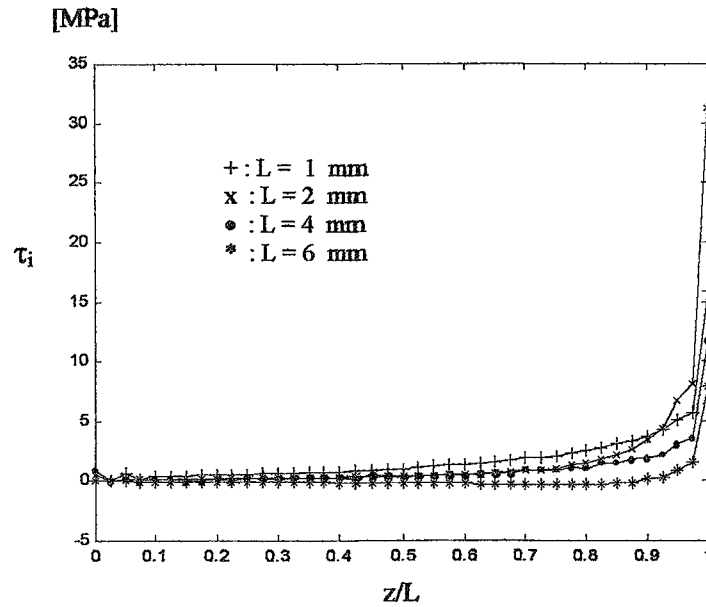
Şekil 6.4.12. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

Tablo 6.4.7. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.006$ mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Bakır	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	117.000	3000
Poisson Oranı	0.343	0.4
Kayma Modülü [MPa]	43559	1071



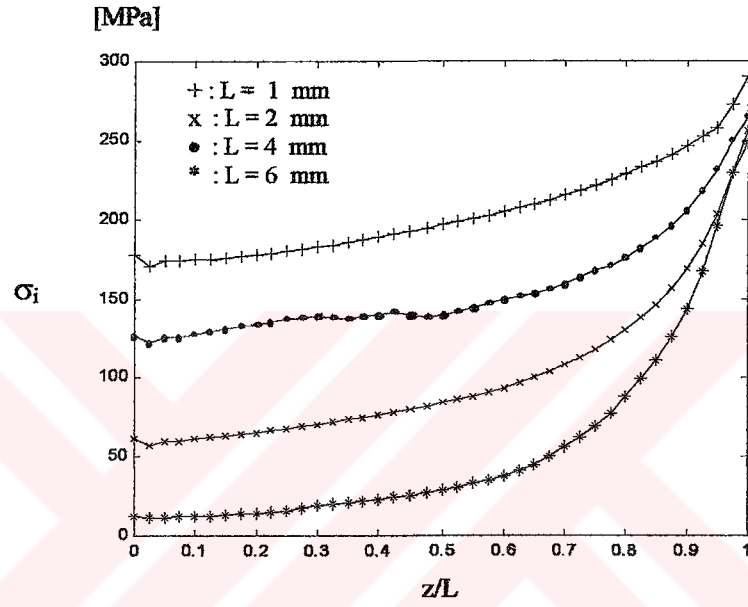
Şekil 6.4.13. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.



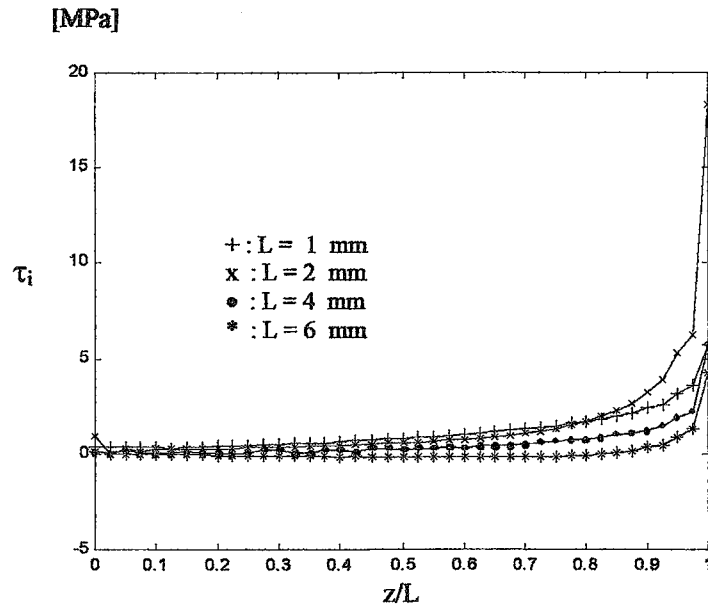
Şekil 6.4.14. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

Tablo 6.4.8. Kompozit bileşenleri Bakır fiber ve Epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.0012$ mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Bakır	Epoksi Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	117.000	3000
Poisson Oranı	0.343	0.4
Kayma Modülü [MPa]	43559	1071

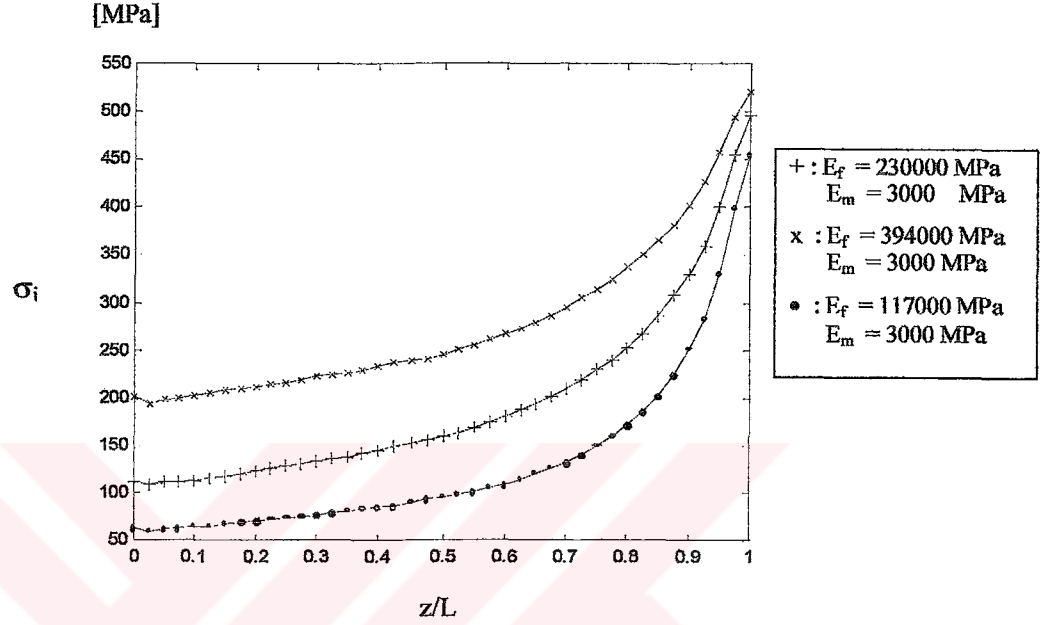


Şekil 6.4.15. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

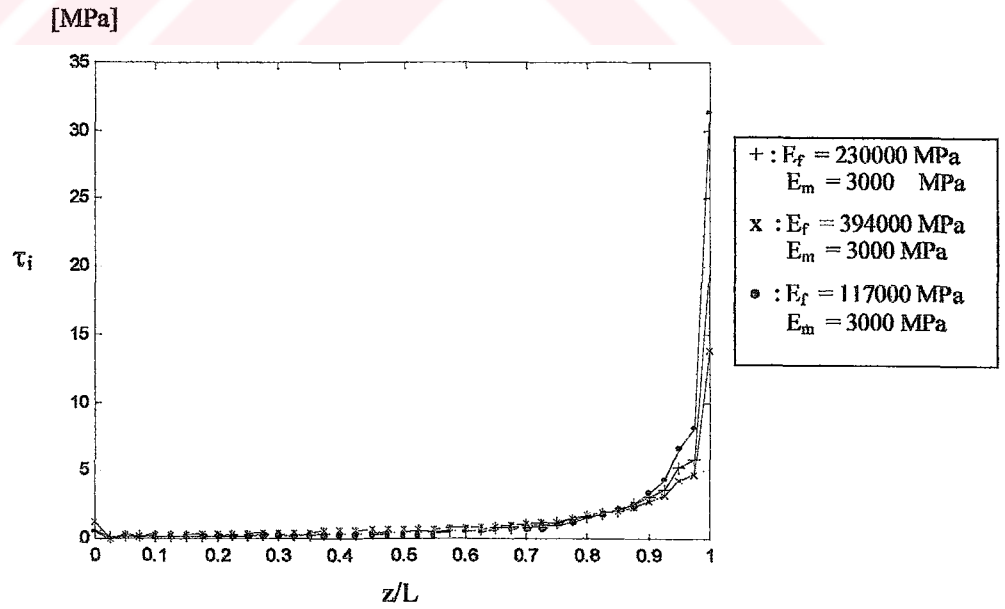


Şekil 6.4.16. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

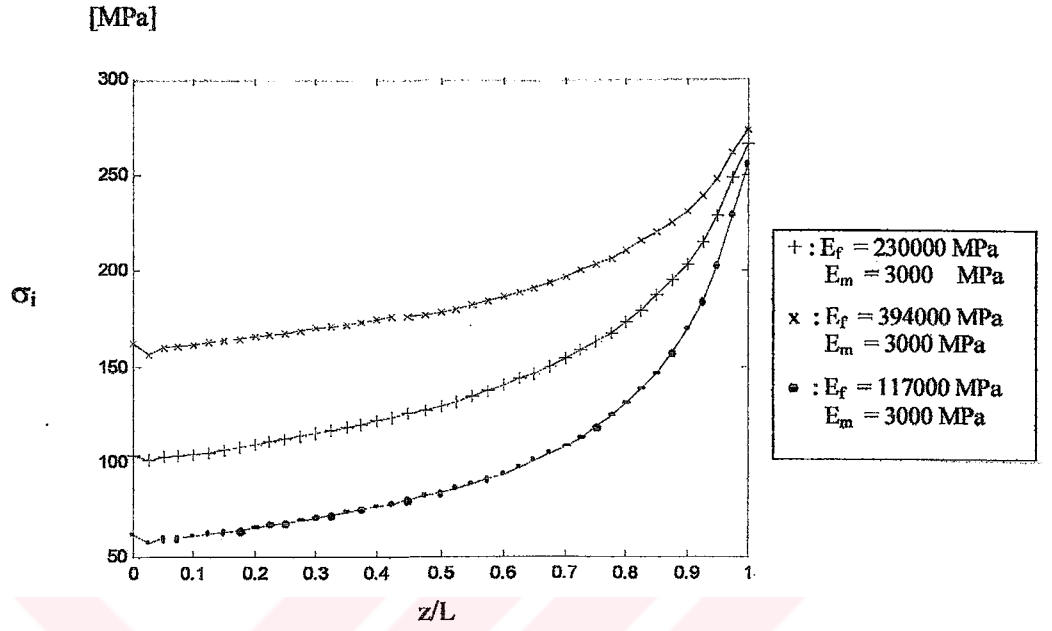
Fiber çapı ve boyunun sabit olmasına karşın malzeme değişiminin gerilme dağılımına etkisinin incelenmesi.



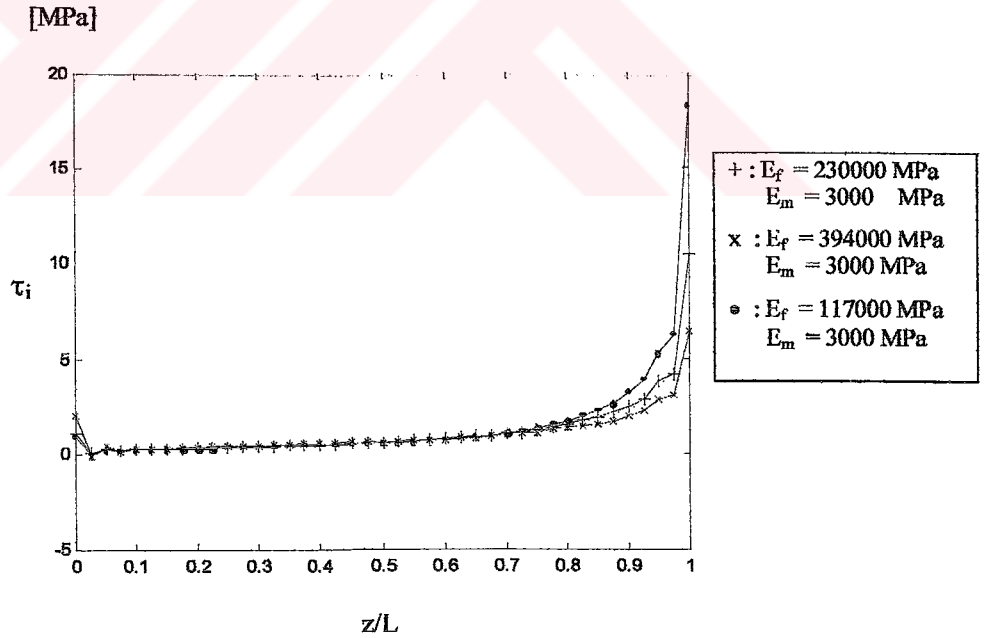
Şekil 6.4. 17. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



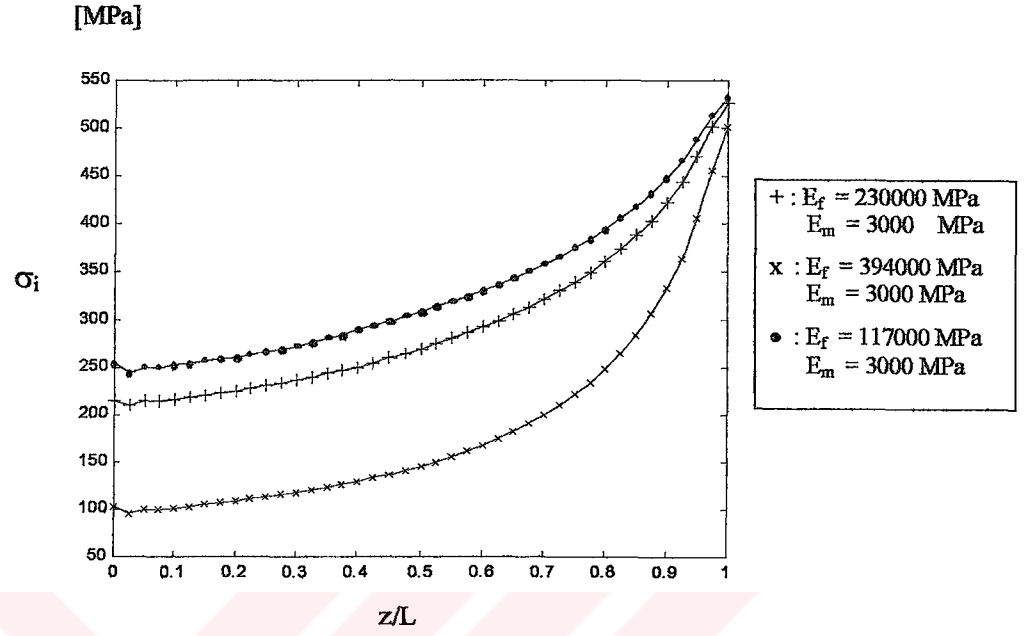
Şekil 6.4.18. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



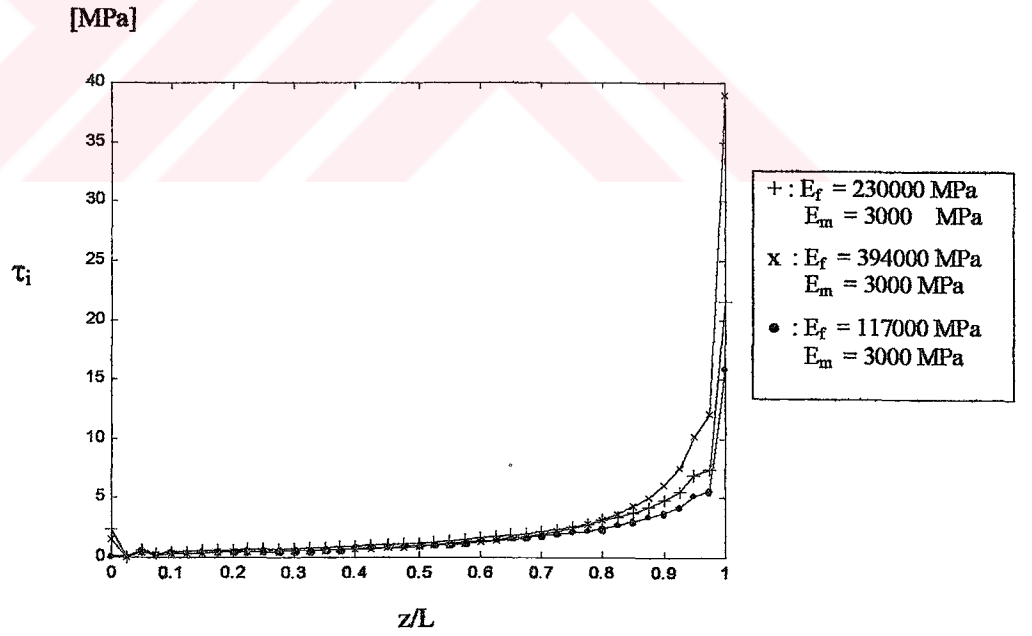
Şekil 6.4.19. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



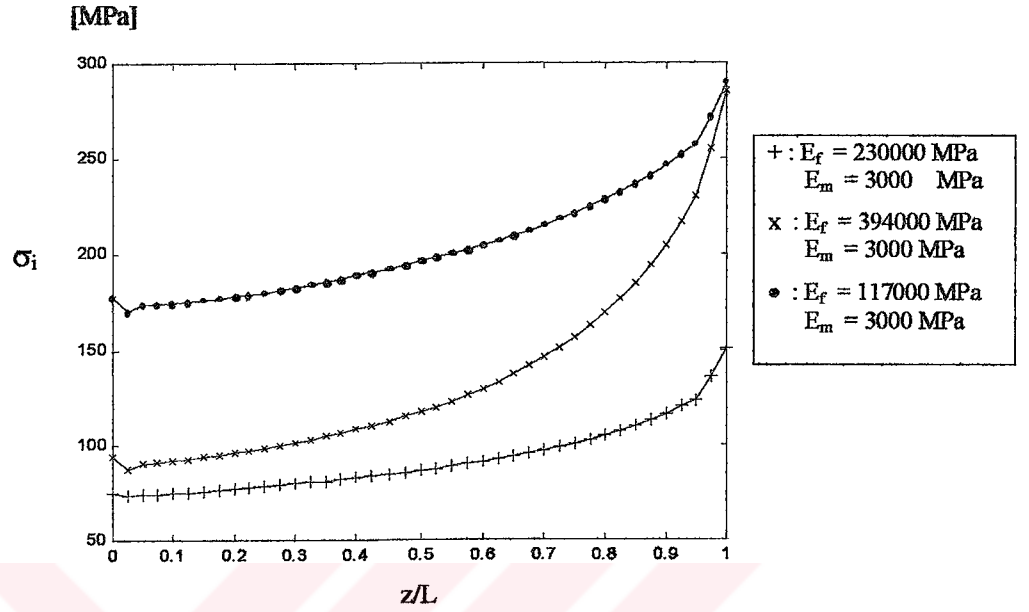
Şekil 6.4.20. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



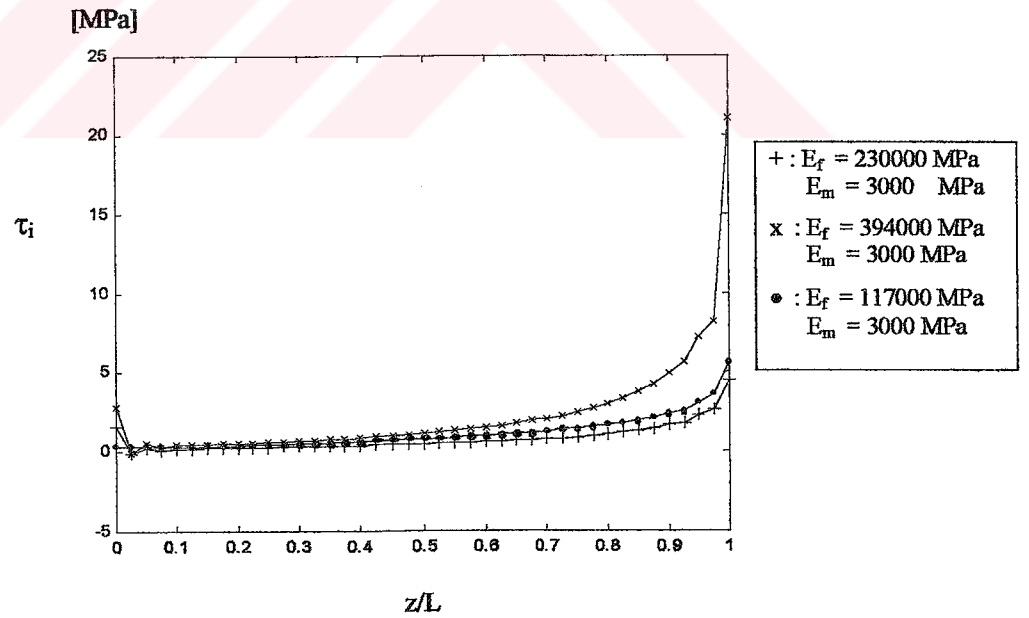
Şekil 6.4.21. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.012$ mm).



Şekil 6.4.22. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.012$ mm).



Şekil 6.4.23. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.012$ mm).



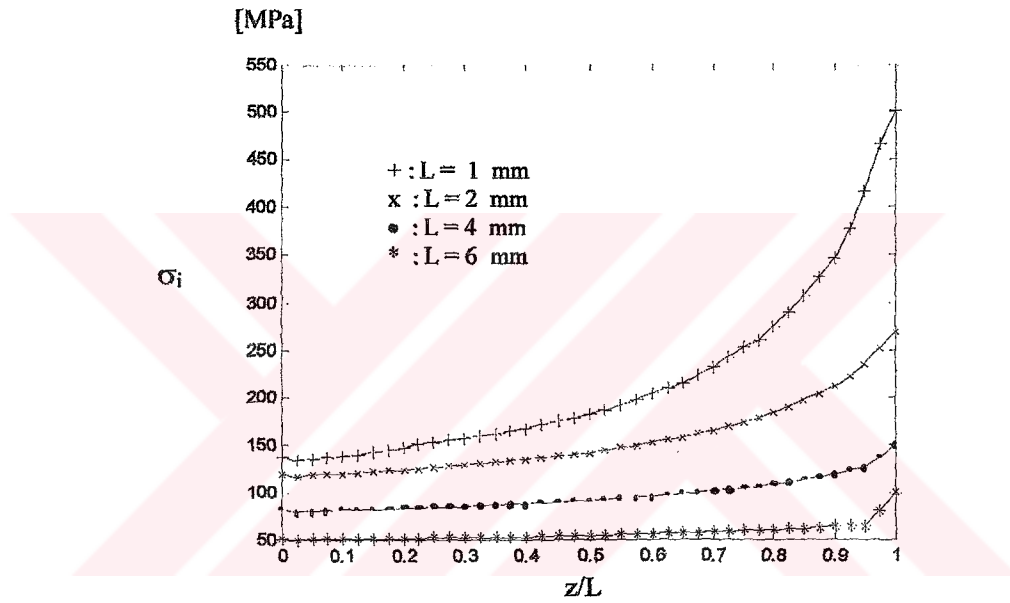
Şekil 6.4.24. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.012$ mm).

6.5. Aynı Fiber Malzemesi İle Farklı Matriks Malzemelerinin Kullanılması Durumunda Gerilme Dağılımının İncelenmesi

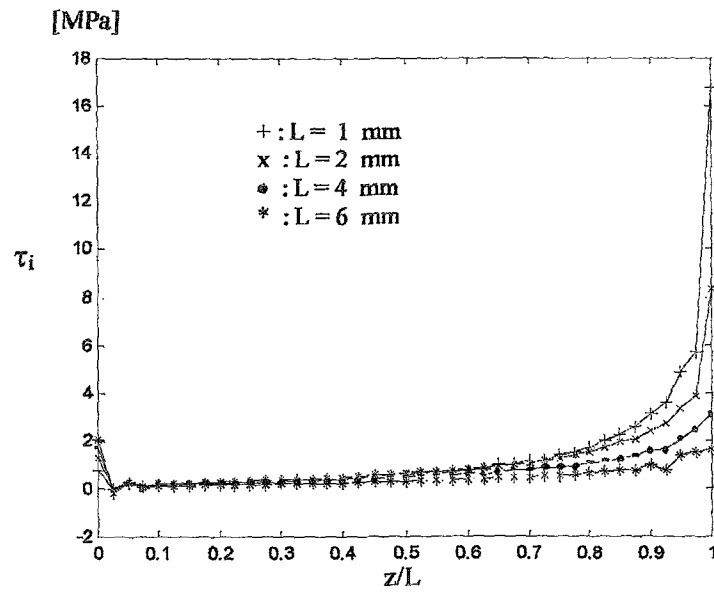
Sabit boy, değişken fiber çapı olması durumunda meydana gelen değişimin incelenmesi.

Tablo 6.5.1. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Naylon 6 matriks malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.006\text{mm}$).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Naylon 6
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	2500
Poisson Oranı	0.2	0.3
Kayma Modülü [MPa]	95840	0.3



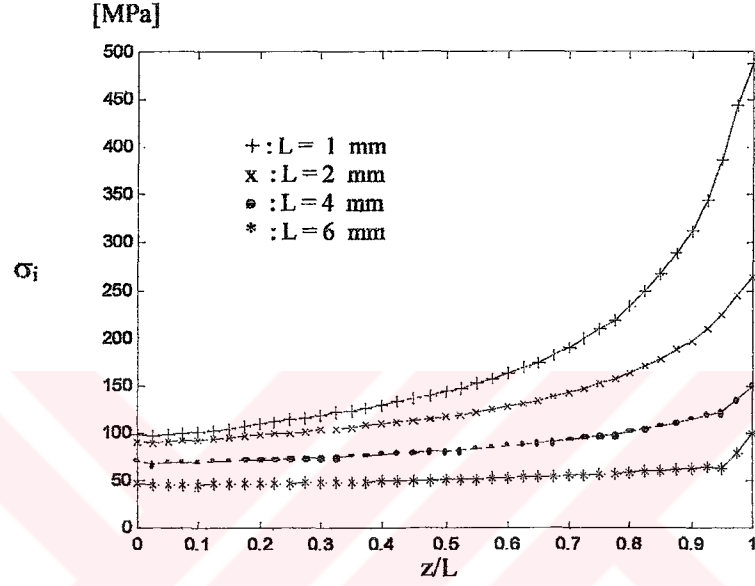
Şekil 6.5.1. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.



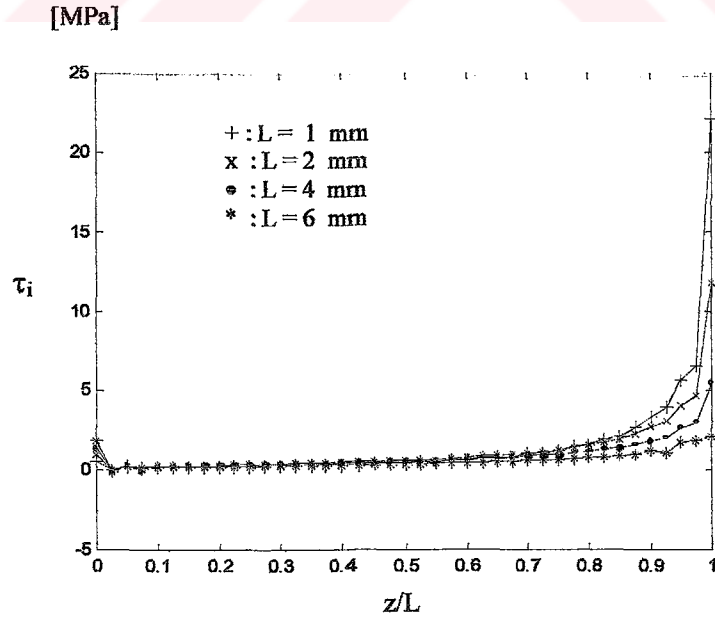
Şekil 6.5.2. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

Tablo 6.5.2. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.012$ mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Polyester Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	3500
Poisson Oranı	0.2	0.38
Kayma Modülü [MPa]	95840	1268



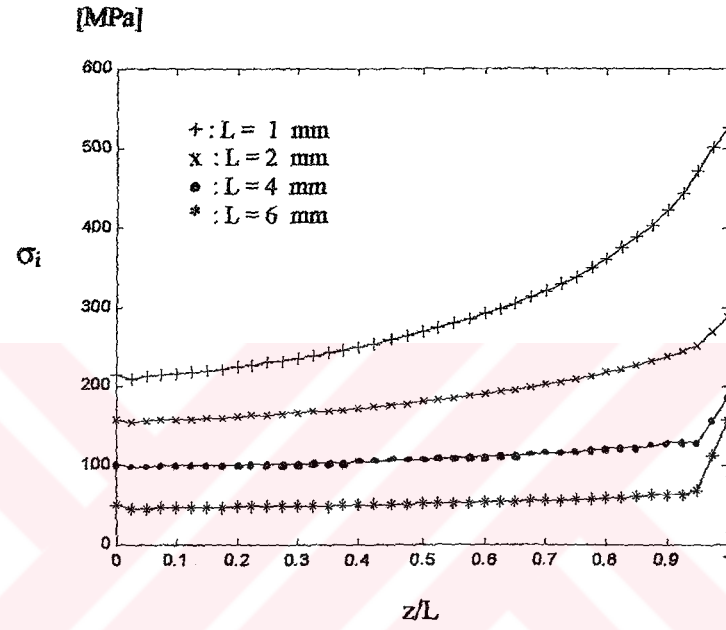
Şekil 6.5.3. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.



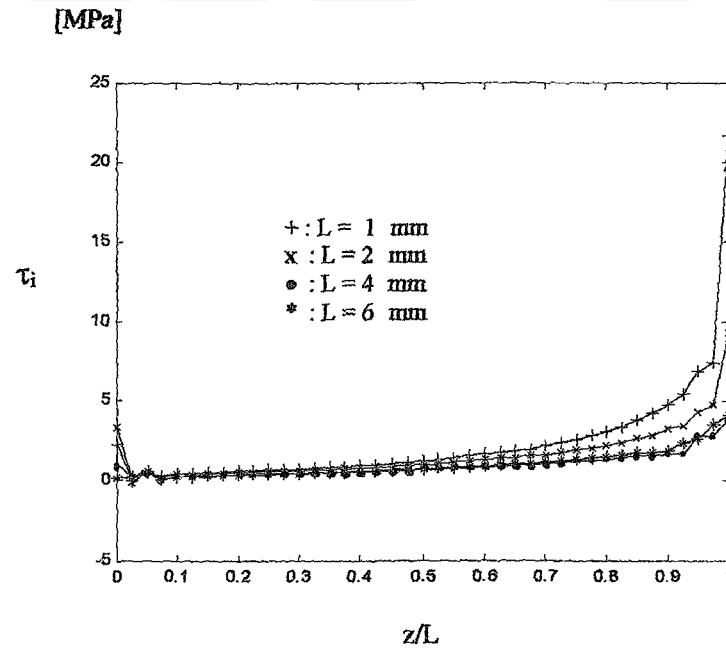
Şekil 6.5.4. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

Table 6.5.3. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Naylon 6 matris malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.006 \text{ mm}$).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Naylon 6
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	2500
Poisson Oranı	0.2	0.3
Kayma Modülü [MPa]	95840	961.5



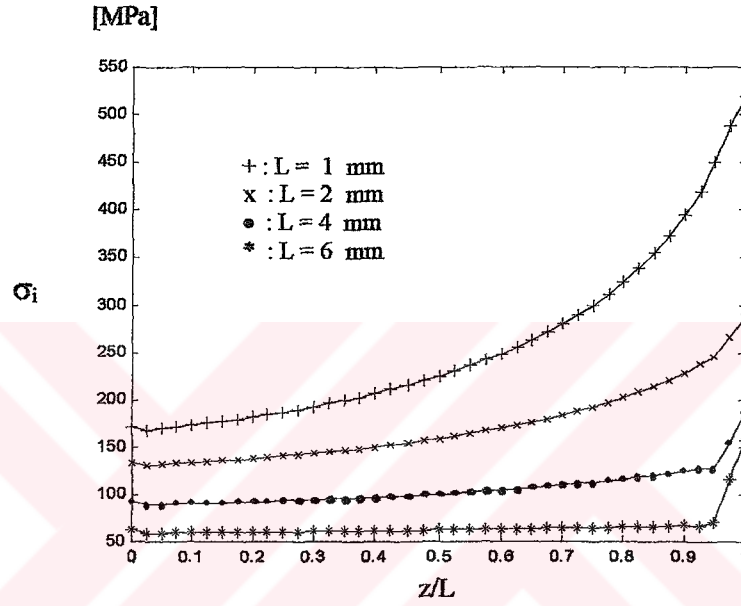
Şekil 6. 5. 5. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.



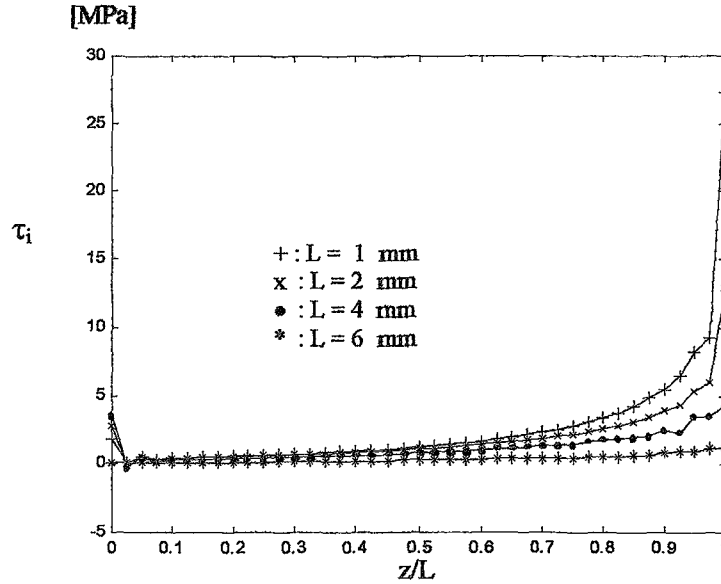
Şekil 6.5.6. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

Tablo 6.5.4 . Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matris malzemelerinin özellikleri ($d_f = 0.012 \text{ mm}$).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Polyester Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	3500
Poisson Oranı	0.2	0.38
Kayma Modülü [MPa]	95840	1268



Şekil 6.5.7. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

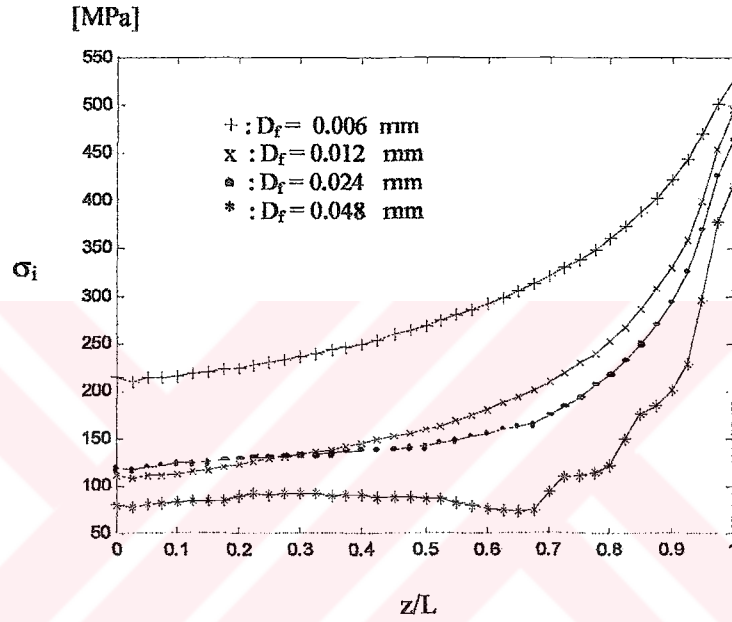


Şekil 6.5.8. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit fiber çapında ve değişken boyda dağılımı.

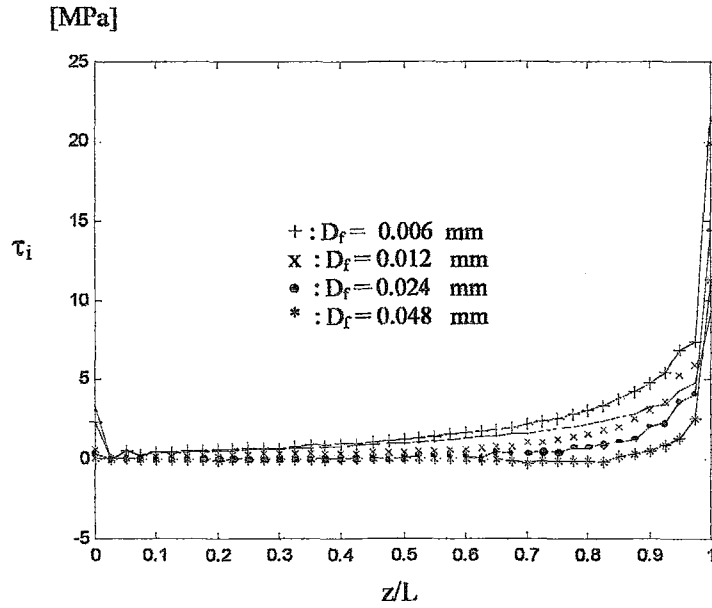
Sabit boy değişken fiber çapı olması durumunda meydana gelen değişimin incelenmesi.

Tablo 6.5. 5. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Nylon 6 matriks malzemelerinin özellikleri (L=2 mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Nylon 6
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	2500
Poisson Oranı	0,2	0,3
Kayma Modülü [MPa]	95840	961,5



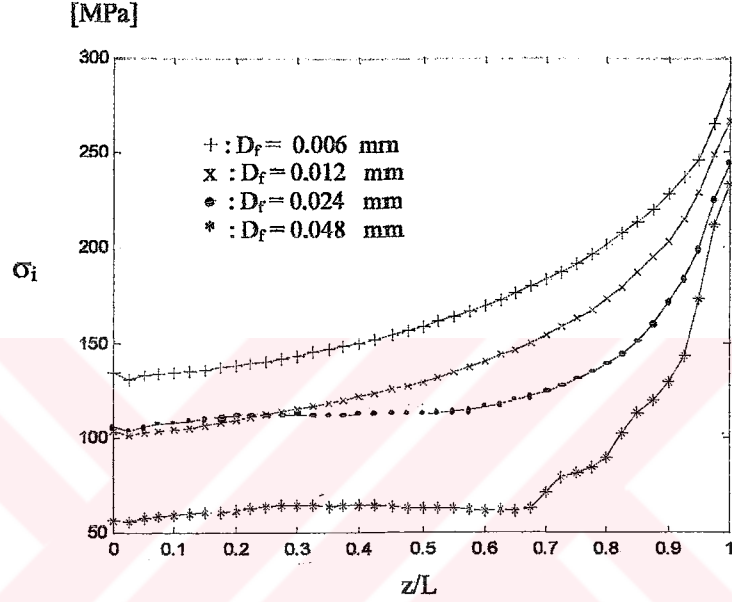
Şekil 6. 5. 9. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber apıda dağılımı.



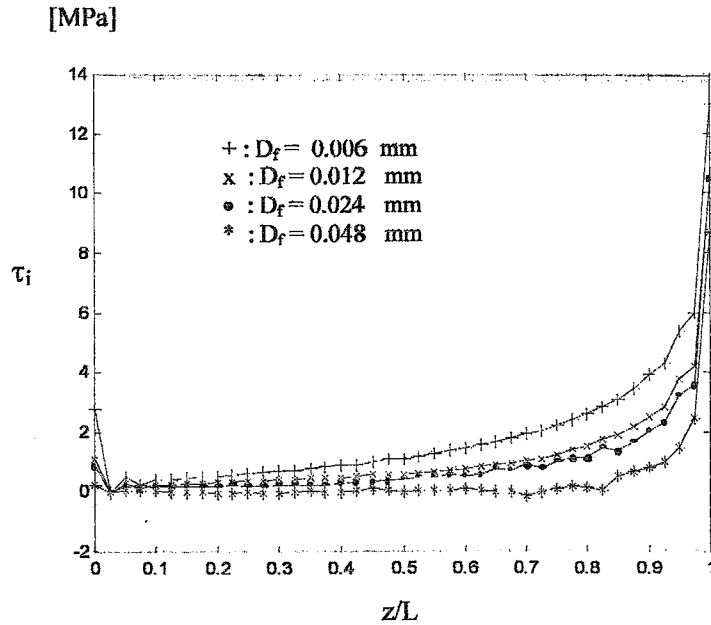
Şekil 6.5.10. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber apıda dağılımı.

Tablo 6.5. 6. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Nylon 6 matriks malzemelerinin özellikleri (L = 2 mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Nylon 6
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	2500
Poisson Oranı	0,2	0,3
Kayma Modülü [MPa]	95840	961,5



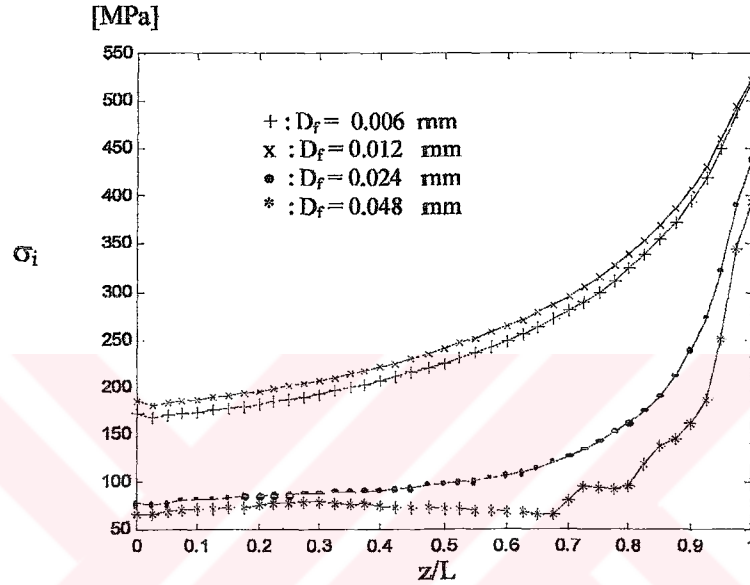
Şekil 6.5.11. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.



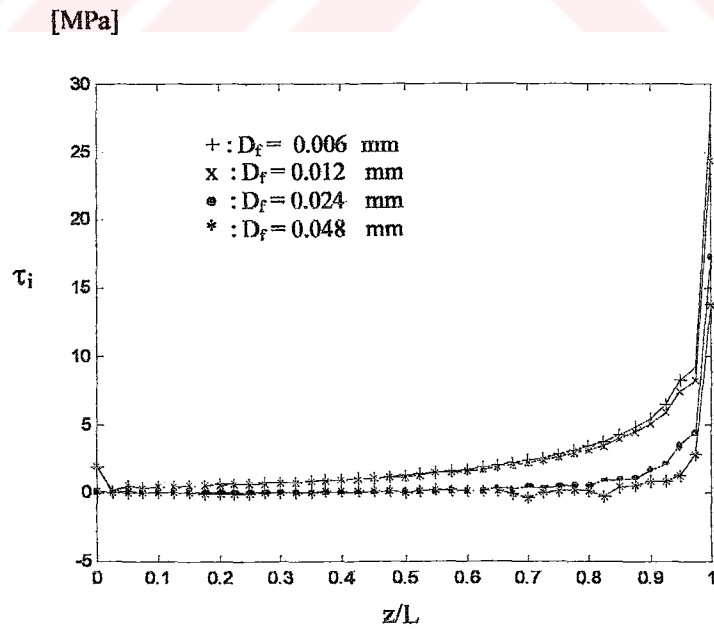
Şekil 6.5.12. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.

Tablo 6.5. 7. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri (L = 1 mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Polyester Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	3500
Poisson Oranı	0,2	0,38
Kayma Modülü [MPa]	95840	1268



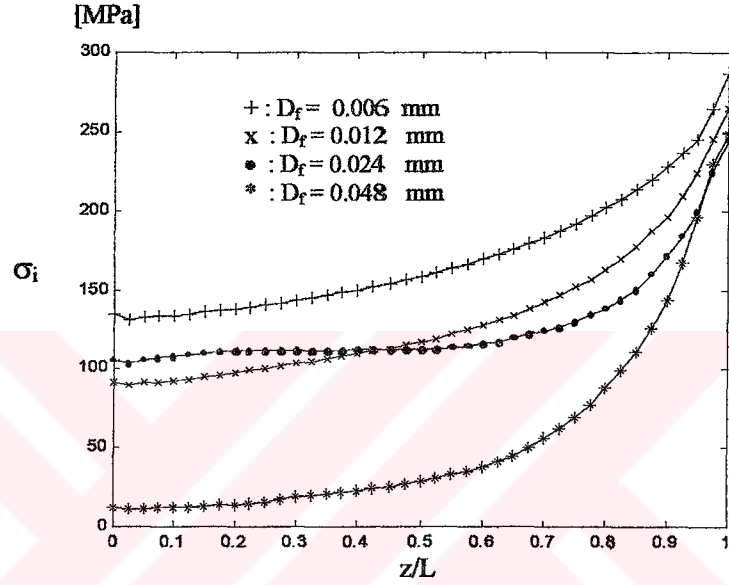
Şekil 6.5.13. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.



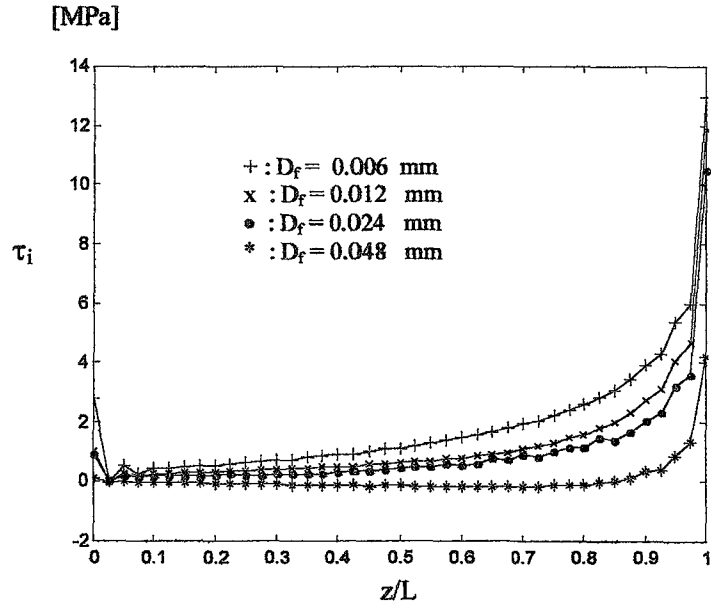
Şekil 6.5.14. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.

Tablo 6.5. 8. Kompozit bileşenleri Karbon fiber ve Polyester Reçine matriks malzemelerinin özellikleri (L = 1 mm).

	Fiber	Matriks
Malzeme Türü	Karbon	Polyester Reçine
Elastisite Modülü [MPa]	230.000	3500
Poisson Oranı	0,2	0,38
Kayma Modülü [MPa]	95840	1268

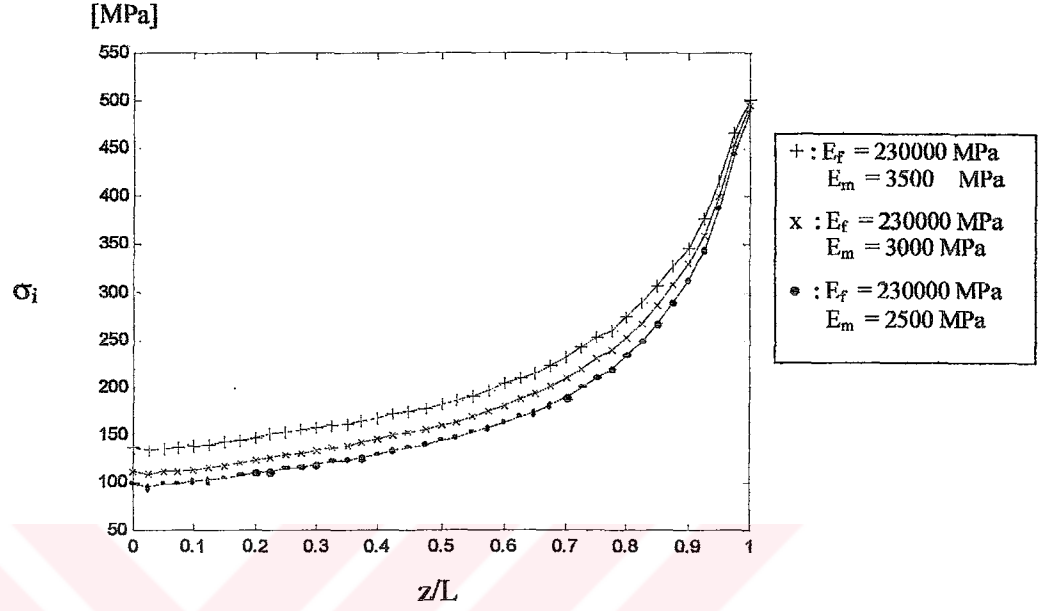


Şekil 6.5.15. Arayüzey Çekme gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.

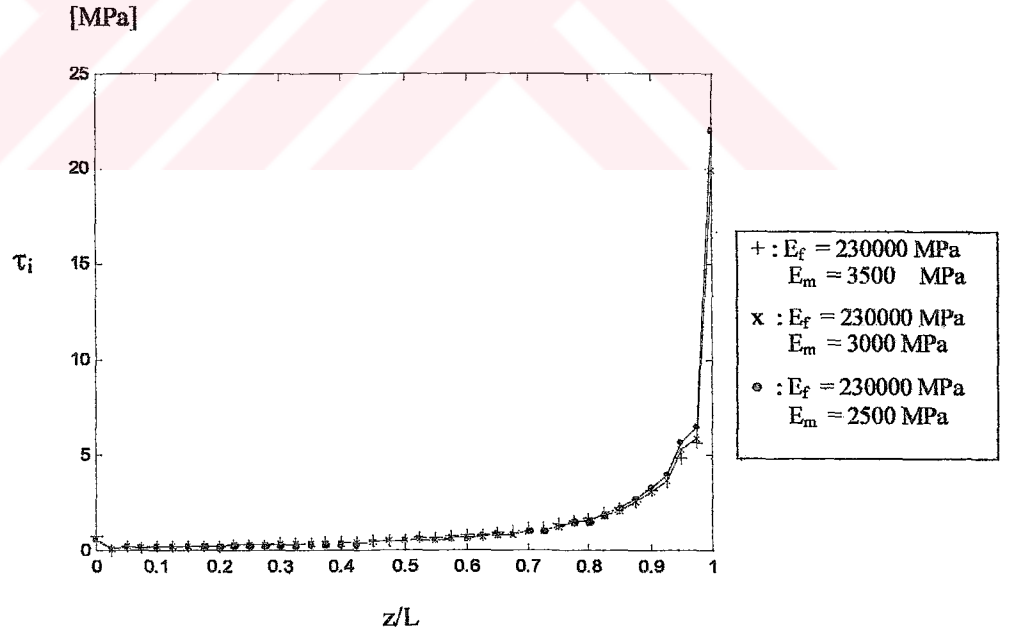


Şekil 6.5.16. Arayüzey Kayma gerilmelerinin sabit boyda ve değişken fiber çapında dağılımı.

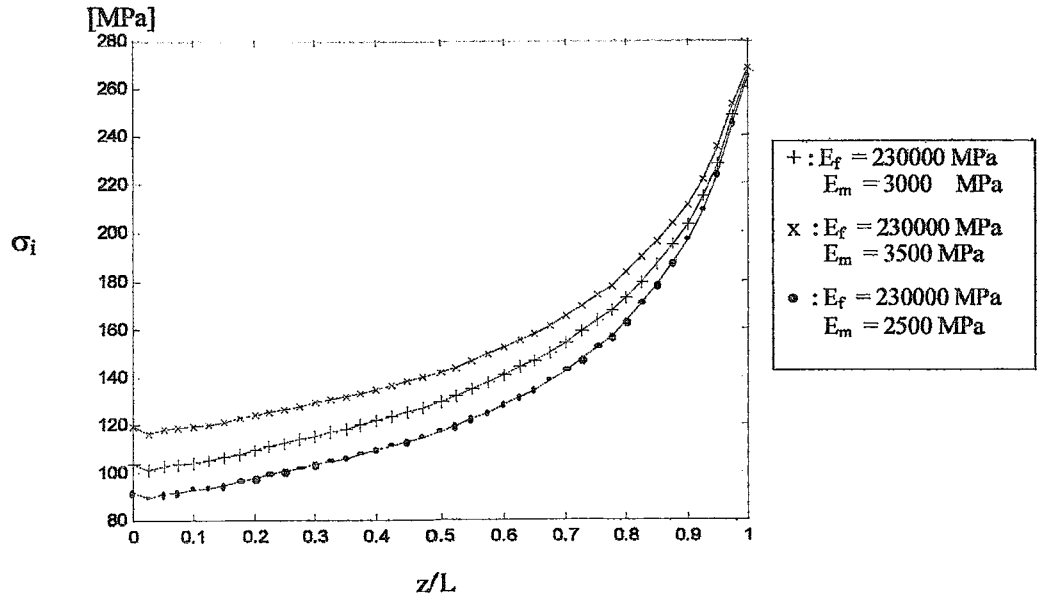
Sabit boy ve fiber çapına karşılık matriks malzemesinin değişiminin gerilme dağılımına etkisi.



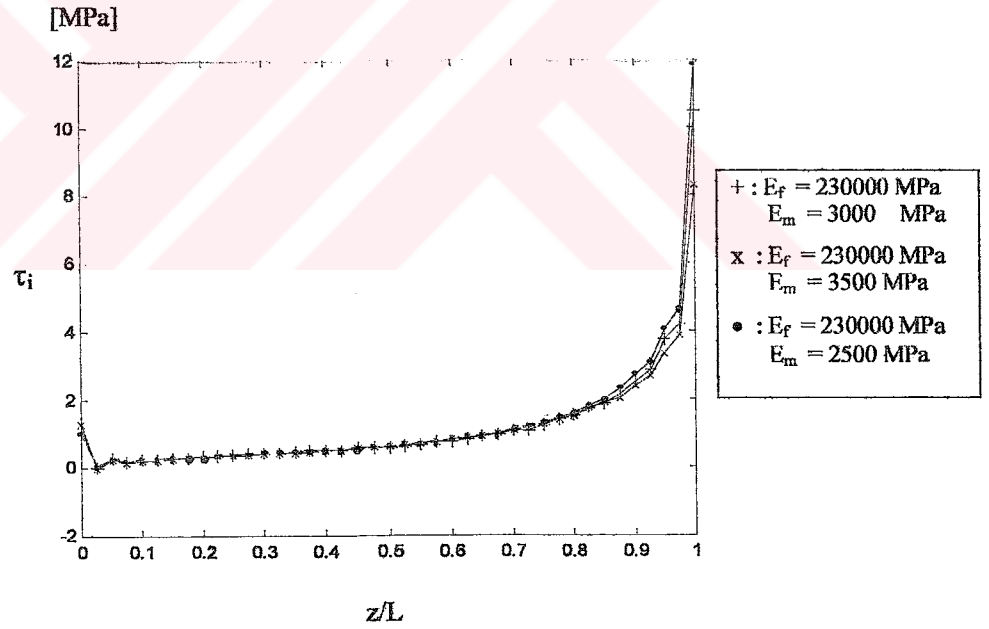
şekil 6.5.17. Arayüzey ekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



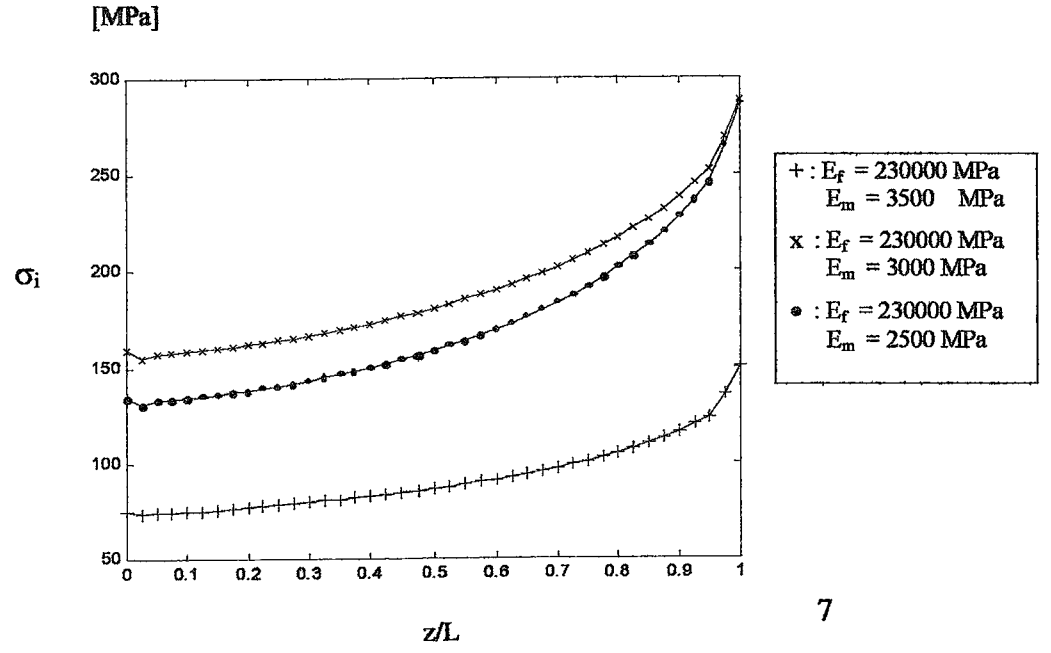
şekil 6.5.18. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



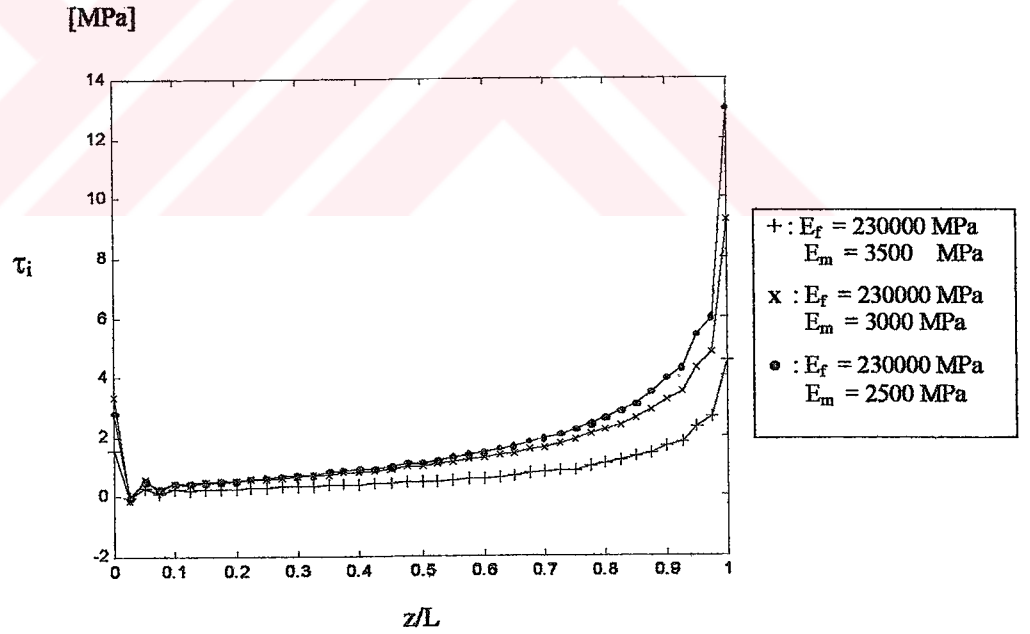
Şekil 6.5.19. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



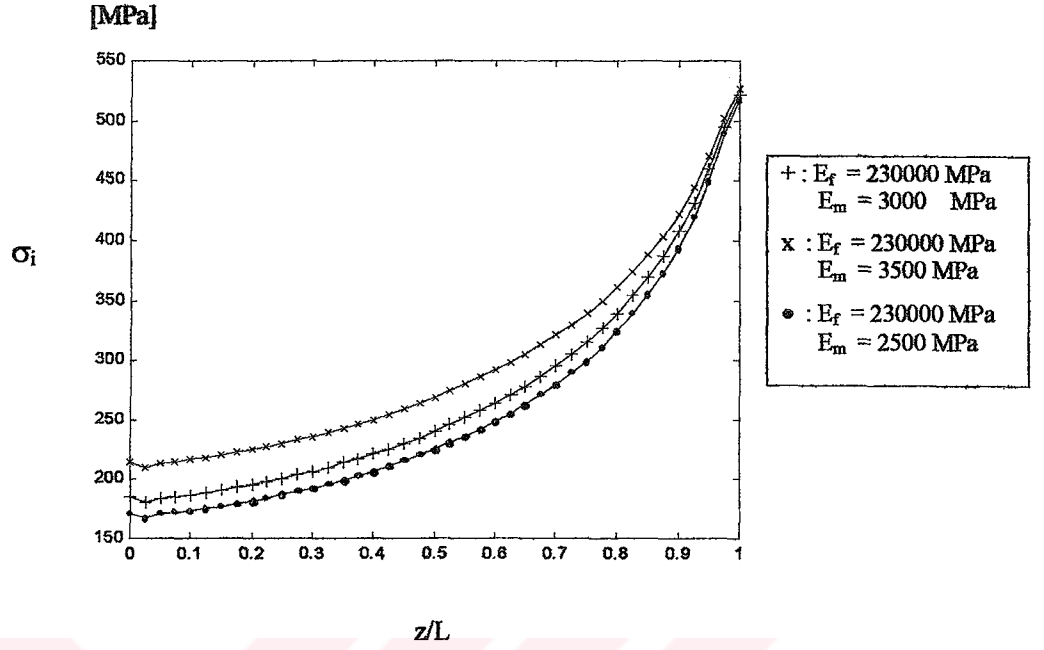
Şekil 6.5.20. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.006$ mm).



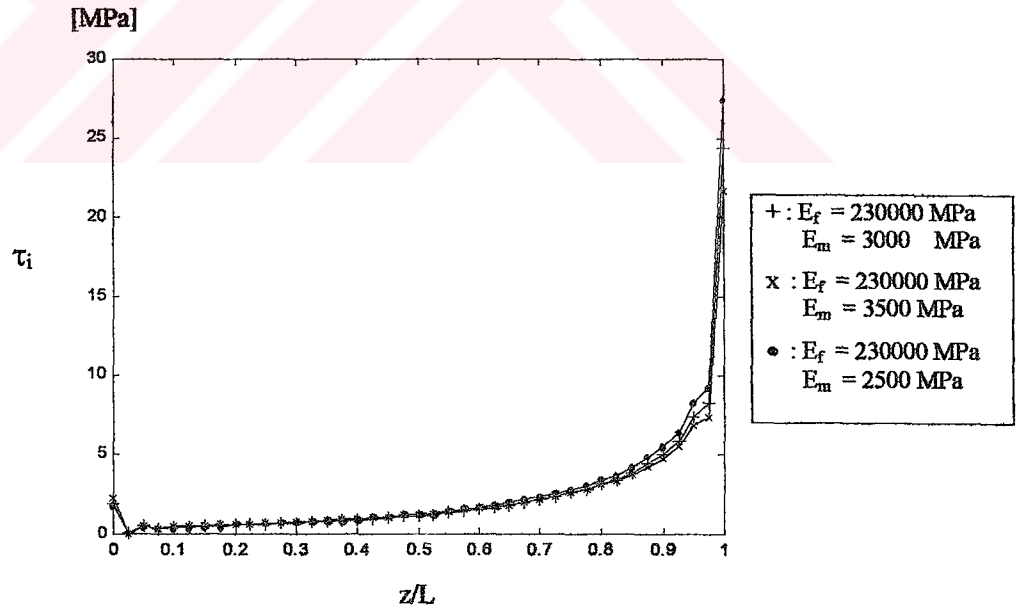
Şekil 6.5.21. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.012$ mm).



Şekil 6.5.22. Arayüzey Kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 1$ mm , $d_f = 0.012$ mm).



Şekil 6.5.23. Arayüzey Çekme gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.012$ mm).



Şekil 6.5.24. Arayüzey kayma gerilmelerinin malzeme ile değişimi ($L = 2$ mm , $d_f = 0.012$ mm).

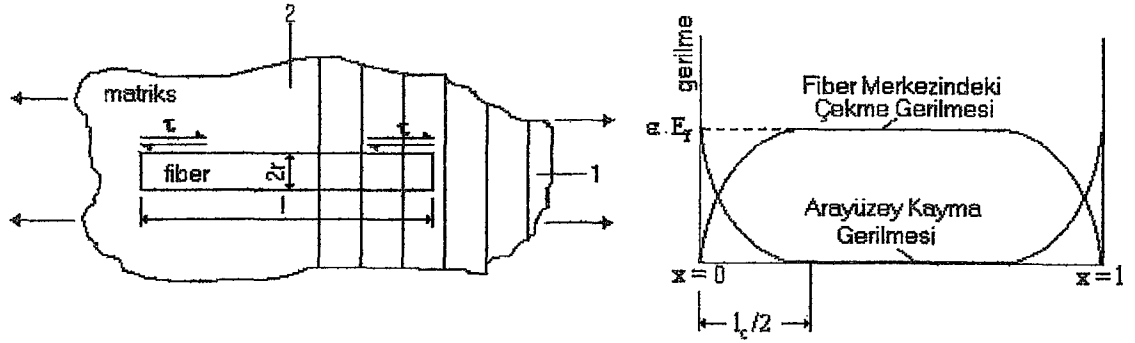
7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu bölümde önceki bölümde verilmiş olan grafiklerin sonuçlarının değerlendirilmesi yapılacaktır. Sonuçlar genel hatları ile aşağıdaki sıralamaya göre elde edilmiştir:

- a) Model boyunun değişiminin gerilme dağılımına etkisi,
- b) Fiber çapının değişiminin gerilme dağılımına etkisi,
- c) Aynı geometrik özelliklere sahip modellerin farklı malzemelerden meydana geldiği durumda gerilme dağılımındaki değişim,
- d) Fiber malzemesi değişiminin gerilme dağılımına etkisi,
 - i- Fiber çapının değişmesi durumunda,
 - ii- Model boyunun değişmesi durumunda,
 - iii- Aynı geometrik özelliklere sahip modellerin fiber malzemelerinin değişmesi durumunda,
- e) Matriks malzemesinin değişiminin gerilme dağılımına etkisi,
 - i- Fiber çapının değişmesi durumunda,
 - ii- Model boyunun değişmesi durumunda,
 - iii- Aynı geometrik özelliklere sahip modellerin fiber malzemelerinin değişmesi durumunda,

Bu değişimlerin kullanılması ile yapılan analizler açıklanarak fiber – matriks arayüzeyinin genel karakteri ve hangi değişkenlerle nasıl etkilendiğinin analizi yapılmıştır.

Bütün grafikler genel olarak incelendiğinde önemli bir nokta dikkat çekmektedir. Buna göre tüm grafiklerde fiberin sonunda maksimum olan kayma gerilmeleri fiberin ortalarına doğru azalmakta ve yaklaşık “0” değerini alarak yine aynı değere paralel olarak gitmektedir. Fiberin sonunda çekme yükünü tam olarak taşımayan bir bölge vardır. Bu nedenle fiberin sonundaki gerilme transferi büyük oranda kayma gerilmesi şeklinde olmaktadır. Fiberin sonunda maksimum değere sahip olan kayma gerilmeleri fiberin ortalarına doğru azalmakta ve yaklaşık olarak “0” değerine ulaşmaktadır. Ortalama fiber uzunluğunun artması ile takviye etkisi azalır, bunun nedeni toplam fiber uzunluğunun büyük bir kısmının yükü tamamen taşınamamasıdır. Maksimum gerilme değerlerinin elde edilebilmesi için fiber uzunluğu kritik uzunluk olan l_c değerinden büyük olmak zorundadır. Buna göre fiber uzunluğunun değişimi ile elde edilen grafikler değişmektedir. Bu sonuçlar gösteriyor ki fiberin sonunda yükü taşımayan bir bölge vardır ve bu bölgede fiber aynı yük değeri ile yüklenmiş sürekli bir fibere göre daha az yük taşımaktadır[15].



Şekil 7.1. Fiber – matriks arayüzeyinde meydana gelen gerilme dağılımı [15].

Şekil 6.1.1 ve 6.1.3 arayüzey çekme gerilmelerinin model boyu ile değişimini göstermektedir. Fibere uygulanan çekme yükü fiberin sonunda maksimum 0'a doğru azalmaktadır. Tam olarak modelin mesnetli kısımlarına yakın yerlerde gerilme değerinin 0 olmamasının sebebi mesnet tepkilerinden dolayı meydana gelen gerilmelerin çekme gerilmesi şeklinde olmasından kaynaklanmaktadır. Eğer fiber – matriks arayüzeyinden bir gerilme transferi olmasaydı $z/L=1$ değerine karşılık gelen çekme gerilmesi değeri fiberin $z/L = 0$ değerine karşılık gelen çekme gerilmesi değeri ile aynı kalırdı. Fakat arayüzeyde meydana gelen gerilme transferinden dolayı çekme gerilmesinin değeri giderek azalmaktadır. Boy arttıkça çekme gerilmesi ters orantılı olarak düşmektedir. Bu nedenle boyun maksimum değerine karşılık gelen çekme gerilmesi grafiğinde gerilme değerleri diğer boylara göre minimum olduğu görülmüştür.

Şekil 6.1.2 ve 6.1.4 arayüzey kayma gerilmelerinin model boyunun değişimi ile grafiğini göstermektedir. Kayma gerilmesi de çekme gerilmesinde olduğu gibi maksimum boy için minimum bir başlangıç değer almaktadır. Fiberin ortalarına doğru giderek azalarak 0 değerine ulaştığı görülmüştür. Arayüzey kayma gerilmeleri fiberin ortalarından itibaren 0'a paralel değerler almaktadır. Boy arttıkça arayüzey kayma gerilmesi değeri düşmektedir. Boyun artması takviye etkisini arttırmaktadır ve bu nedenle birim boya gelen gerilme değerinin azalmıştır. Bu nedenle fiber – matriks arayüzeyine daha az yük gelmekte ve gerilme değerlerinin düşük çıktığı görülmektedir.

Şekil 6.2.1 ve 6.2.3 arayüzey çekme gerilmelerinin fiber çapının değişimi ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Fiber çapının artması ile çekme gerilmesi değerlerinde büyük oranda bir düşme olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni yükün taşınacağı kesit alanının artmasıdır. Fiber ile matriksin tam olarak birbirine yapıştığı ve elastik – mükemmel plastik bir yapıda olduğu

kabul edildiği için takviyenin etkisi de maksimum olmaktadır. Uygulanan yük daha büyük bir kesit tarafından taşındığı için arayüzeyden çekme gerilmesi olarak transfer edilen gerilme miktarı da düşmüştür. Çekme yükü doğrudan fiber tarafından taşındığı için arayüzey zorlanmayacaktır.

Şekil 6.2.2 ve 6.2.4 arayüzey kayma gerilmelerinin fiber çapının değişimi ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Çekme gerilmesinde görüldüğü gibi kayma gerilmesi de çapın artmasıyla azalmaktadır. Arayüzeyde meydana gelen gerilme transferinde çekme gerilmesi ile kayma gerilmesi birbirine bağlı gerilme değerleridir.

Bölüm 6.3’de verilen grafiklerde aynı geometrik özelliklere sahip, farklı bileşenlerin oluşturduğu kompozit sistemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Kompozit bileşenlerinin mekanik özellikleri yükseldikçe arayüzey çekme gerilmesi değerleri yükselmektedir. Fakat arayüzey kayma gerilmesi değerleri $z/L \approx 0.85$ değerinden itibaren aynı değeri almaktadır. Buradan hareketle takviyenin geometrik yapısının, arayüzey kayma gerilmeleri üzerinde daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Arayüzey çekme gerilmelerinin her malzeme çifti için değişiklik göstermediği ve kayma gerilmesi değerleri pek değişmediği için arayüzeyden transfer edilen gerilme değeri aynı geometrik özelliklerde çekme gerilmesi şeklinde olmaktadır. Mekanik özellikleri en düşük olan malzeme çiftinin oluşturduğu kompozit çiftinde ilk kayma gerilmesi değerleri maksimum olurken çekme gerilmesi değerleri minimum olmaktadır. Bu şekilde bir karşılaştırma yapıldığında arayüzeydeki gerilme değerlerinin, malzeme çiftinin mekanik özellikleri ile etkilendiği görülmüştür.

Bölüm 6.4’te aynı matriks malzemesine karşılık değişik fiber malzemesi kullanılması durumunda meydana gelecek değişim incelenmiştir. Boy ve çap değişimi ile arayüzey kayma ve çekme gerilmelerinin değişimi daha önce belirtildiği gibi ters orantılı olmaktadır.

Şekil 6.4.17 ; 6.4.19 ; 6.4.21 ve 6.4.23’ de arayüzey çekme gerilmelerinin aynı matriks malzemesi ve aynı geometrik özelliklerde, fakat farklı fiber malzemesinin kullanıldığı durumda meydana gelen değişimin grafikleri verilmiştir. Arayüzey çekme gerilmelerinin fiberin elastisite modülünün artması ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Fiberin elastisite modülü maksimum olan kompozit malzemede çekme gerilmesinin de maksimum olması, arayüzeyden transfer edilen gerilmenin çekme gerilmesi şeklinde olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.4.18; 6.4.20 ; 6.4.22 ve 6.4.24’ de görüldüğü üzere arayüzey kayma gerilmesi, fiberin elastisite modülünün artması ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Buna göre arayüzey kayma gerilmeleri başlangıç değerleri itibarı ile fiberin elastisite modülünün maksimum olduğu durumda minimum değerini almıştır.

Arayüzey çekme ve kayma gerilmelerinin fiber malzemesinin değişimi ile incelendiği zaman fiber malzemesinin değişiminin kısmi olarak gerilmeler üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Fiberin ortalarına doğru takviye malzemesinin ve geometrik özelliklerin pek etkili olmadığı görülmüştür.

Bölüm 6.5’de aynı fiber malzemesine karşılık farklı matriks malzemesinin kullanıldığı durumda meydana gelen arayüzey çekme gerilmelerinin değişimine ait grafikler verilmiştir.

Boy ve çap değişiminin arayüzey çekme ve kayma gerilmelerine etkisi daha önce belirtildiği şekillerde olmuştur yani ters orantılı olarak değişmektedir.

Şekil 6.4.17 ; 6.4.19 ; 6.4.21 ve 6.4.23’ de arayüzey çekme gerilmelerinin aynı fiber malzemesi karşılık farklı matriks malzemesinin kullanıldığı durumda ve aynı geometrik özelliklerde malzemelerin kullanılması ile meydana gelen değişimin grafikleri verilmiştir. Çekme gerilmeleri elastisite modülünün artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Elastisite modülü büyük olan matriksin kullanılması halinde çekme gerilmeleri maksimum olmaktadır.

Şekil 6.4.18 ; 6.4.20 ; 6.4.22 ve 6.4.24’ de arayüzey kayma gerilmelerinin aynı fiber malzemesi ve aynı geometrik özelliklerde fakat farklı matriks malzemesinin kullanıldığı durumda meydana gelen değişimin grafikleri verilmiştir. Arayüzey kayma gerilmeleri matriks malzemesinin değişimi ile çok fazla değişmemektedir. $z/L = 1$ düğümünde aldıkları değerler hariç hemen hemen aynı değerleri almaktadırlar. Buda arayüzey kayma gerilmelerinin matriks malzemesinin değişimi ile doğrudan değişmediğini göstermektedir.

8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Fibere uygulanan normal kuvvet fiber – matriks arayüzeyi ile fiberden matrikse iletilmektedir. Bu kuvvet arayüzeyden normal gerilme ve kayma gerilmesi olmak üzere iki şekilde transfer edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan fiber – matriks arayüzeyindeki normal gerilme ve kayma gerilmesi arasında bir orantı olduğu gösterilmiştir. Kompozite uygulanan normal gerilmenin arayüzeyden iletim miktarı arttıkça kompozit malzemenin mukavemeti yüksek olacaktır.

Sonuçlar incelendiği zaman, modelin boyutlarının ve malzeme özelliklerinin arayüzey özelliklerini değiştirdiği görülmüştür. Buna göre zayıf bir arayüzey ile kuvvetli bir arayüzey arasındaki fark belirlenebilmektedir.

Model boyutlarındaki değişim ile fiber – matriks arayüzeyinin değişimi, fiber boyunun ve fiber çapının artması ile doğru orantılı olarak arayüzeyin mukavemetini yükseltmektedir. Fiberin çapı ve modelin boyu küçüldükçe, fiberden matrikse arayüzeyden transfer edilen kayma gerilmelerinin miktarında bir artma söz konusudur. Ayrıca arayüzeyden transfer edilen çekme gerilmelerinin miktarı da artmaktadır. Uygulanan çekme yükünün çekme gerilmesi olarak transfer edilmesi ile tüm kompozitin yükü taşınması arayüzeyin mukavemetinin, dolayısıyla kompozitin mukavemetinin yüksek olduğunu göstermektedir. Malzemenin boyutlarının büyümesi ile birim boya gelen gerilme değeri azalmaktadır. Bu nedenle aynı türden malzeme özelliklerine sahip kompozitin arayüzeyinde yük ile arayüzey gerilme değerleri arasında bir bağıntı kurulabilir. Ayrıca boyutların büyümesi takviyenin etkisini artırarak mukavemeti arttırmaktadır. Sonuç olarak boyut değişimi arayüzey özelliklerini değiştirmektedir.

Aynı geometrik özelliklere sahip farklı kompozit malzemelerde her iki kompozit bileşeninin mekanik özellikleri, arayüzeyin özelliklerinin değişiminde büyük rol oynamaktadır. Elastisite modülü yüksek olan kompozit bileşenlerinin oluşturduğu modellerde arayüzeyin mukavemeti yüksek olmaktadır. Özellikle arayüzey çekme gerilmeleri elastisite modülü ile doğru orantılı olarak, arayüzey kayma gerilmeleri ise ters orantılı olarak değişmektedir. Mekanik özellikleri yüksek olan kompozit sisteminde arayüzey çekme gerilmelerinin yüksek, kayma gerilmelerinin düşük olması arayüzey mukavemetinin yüksek olmasından dolayıdır. Çünkü bir malzemeyi hasara uğratacak olan gerilme türü kayma gerilmesidir. Çekme yükünün çekme gerilmesi olarak transferi malzemenin mukavemetini artıracaktır. Farklı malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşan kompozit malzemelerin farklı arayüzey özellikleri olduğu buradan anlaşılmaktadır. Ayrıca arayüzeyin özellikleri, dolayısıyla da kompozitin özellikleri kullanılan malzemelere göre tabii olarak değişecektir.

Fiberin ve matriksin değişimi ile meydana gelecek gerilme dağılımındaki değişimler de incelenmiştir. Aynı matriksin ve aynı geometrik özelliklerde farklı fiberler ile kullanılmasında, fiberin etkisi ve aynı fiberin farklı matrikslerle kullanımı ile matriksin etkileri araştırılmıştır. Fiberin elastisite modülünün artması ile arayüzeyin mukavemeti doğru orantılı olarak artmaktadır.

Bu çalışmada seçilen yük malzemelerin akma gerilmesinin altında bir değere sahiptir. Bu nedenle elastik sınırlar aşılmadan anlık bir yük değeriinde fiber ve matriks arasında meydana gelecek gerilme transferi araştırılmıştır. Plastik bölgeye geçilmemesinin sebebi arayüzeyin mühendislik sabitlerinin tam olarak bilinmemesinden dolayıdır ki plastik durum için nümerik bir çalışma yapmayı güçleştirmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalarda sayısal çözüm için gerekli veriler tamamlanamadığı için, genellikle elastik sınırlar dahilinde çözüm yapılmaktadır.

Bu çalışmada model iki boyutlu seçilerek gerilme analizi yapılmıştır. Üç boyutlu bir sonlu eleman modeli yapılarak çalışma tekrarlanabilir ve bu çalışmadaki verilerle karşılaştırılabilir. Ayrıca üç boyutlu olarak seçilecek modelde fiberin şeklinin arayüzeydeki gerilme transferini nasıl etkileyeceği ve arayüzeydeki gerilmelerin değerlerinin tespiti yapılabilir. Çalışma sadece sayısal olarak sınırlandırılmıştır. Bu çalışmaya eklenebilecek deneysel ve analitik metotlarla çalışma aralığı sadece elastik değil plastik bölgeyi de içeren sonuçlara ulaşılabilir. Ayrıca anlık yükleme değişimleri farklı yükleme aralıklarıyla karşılaştırılabilir ve sonuçların optimum yaklaşımları elde edilebilir. İlerdeki çalışmalarda arayüzey bölgesinin farklı sonlu eleman modelleri ile analizi ve analitik ve deneysel metotlarla bu sayısal çalışmanın sonuçları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Arslan N, Kaman M., Gür M, 1999, Eksenel Yüklü Faturalı Ankastre Kompozit Levhalarda Elasto-Plastik Gerilme Analizi, Bilim Günleri, Denizli.
2. Arslan, N., Turgut, A. and Sancaktar, E., 1993, Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention, The Effect of Fiber Type on the Level of Stress Concentration Created by U-Notches in Long-Fiber Composites Plates, ASME ,DE-Vol. 55, pp. 125-134.
3. Arslan , N. , 1995 , “U” Çentikli Düzlem Levhalarda Elasto – Plastik Bölgelerin İncelenmesi ve İç Gerilmelerin Araştırılması , Doktora tezi , F.Ü. Fen Bil. Enst. , Elazığ .
4. Karakuzu, R., Özel, A. and Sayman, O., 1997, Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Metal Matrix Plates with Edge Notches, Computers and Structures, Vol. 63, pp. 511-558.
5. Bathe, KJ., 1982, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
6. Benham , P. , Crawford, R.J. , Armstrong, C.G. , 1997, Mechanics of Engineering Materials , Longman Company, Newyork.
7. Boes, J.H., 1997, Fracture Toughness of Composite Materials Reinforced With Short, Ductile Fibers , Master of Science, State University of New York at Buffalo, USA.
8. Bowling, J. And Groves, G.W., 1979, The Debonding and Pull-Out of Ductile Wires From a Brittle Matrix, Journal of Materials Science, 14, s.431.
9. Cheung, YK., Yeo, MF., 1979, *A Practical Introduction to Finite Elements Analysis*, Pitman Publishing Limited, London.
10. Davis J. Qu J. , 2000 , Numerical Analysis of Fiber Fragmentation in o SiC Composite Specimen , Composites Science and Technology, Vol: 60 , pp: 2297 – 2307.
11. DiFrancia, C., Ward T.C. ve Claus, R.O., 1996, The Single-Fiber Pull-Out Test.1: Review and Interpretation , Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing, 27, s.597.

12. Dowling, N.E., 1993, *Mechanical Behaviour of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, Prentice Hall, New Jersey, s.773.
13. D'isa, F., 1968, *Mechanics of Materials*, Youngstown Üniv., Ohio.
14. Gibson, FR., 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw-Hill International Editions, 1994.
15. Hull D., 1987, *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, NewYork, pp: 36 – 51.
16. Hsueh C.H., 1996, Interfacial Debonding and Fibre Pull – Out Stresses of Fibre – Reinforced Composites, *Materials Science and Engineering*, Vol : A165, pp: 189 – 195.
17. Karakuzu, R. and Sayman, O., 1994, Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Orthotropic Rotating Discs with Holes, *Computers and Structures*, Vol. 51, pp. 695-703.
18. Kato, A., 1991, Design Equation for Stress concentration Factors of Notched Strips and Grooved Shafts, *Journal of Strain Analysis*, Vol.26, pp. 21-28.
19. Kaman M., 2002, Kısa Fiberlerle Takviye Edilmiş Kompozitlerde Çekme Etkisi ile Fiberin Matriksden Ayrılması ve Kırılma Tokluğunun Araştırılması, Doktora Semineri, Fırat Üniv. Fen Bil. Ens., Elazığ.
20. Liu Y. Zhang X., 1999, On Steady State Fibre Pull – Out II Computer Simulation, *Composites Science and Technology*, Vol: 59, pp: 2191 – 2199.
21. Marieta C. Schultz E., 2002, Characterization of Interfacial Behaviour in Carbon Fiber Cynate Composite Specimen, *Composites Science and Technology*, Vol: 62, pp: 299-309.
22. Meurs M., Schrauwen B. 1998, Determination of The Interfacial Normal Strength Using Single Fibre Model Composites, Elsevier Science LTD., *Composites Part A29A*, pp: 1027 – 1034.

23. Okabe T. Takeda N. , 2001, Estimation of Strength Disturbution for a Fiber Embedded in a Single – Fiber Composite , Composites Science and Technology , Vol : 61 , pp: 1789 – 1800.
24. Owen, DR. and Figuerias, JA, 1983, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Anisotropic Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Thick and Thin Plates and Shells, Vol.19,pp. 541-566.
25. Grande D.H., Mandell, J.F. and Hong, K.C.C., 1998, Micro Mechanical Analysis of thr Fiber Push out and Re Push Test, Composite Science and Technology, 58, pp. 1709 – 1725
26. Povirk G.L., Needleman A. , 1993 , Finite Element Simulations of Fiber Pull – Out, Journal of Engineering Materials, Vol : 115 , pp: 286 – 291.
27. Sun W. , Lin F. , 2001 , Computer Modelling and FEA Simulation for Fiber Pull – Out , Journal of Thermo Plastic Composite Materials , Vol : 14 , pp: 327 – 343
28. Shanley , F.R. , 1967 , *Mechanics of Materials*, Mc Graw Hill Book Comp. Newyork.
29. Song D.Y. , Takeda N. , 2000, A Method of Stress Analysis for Interfacial Property Evaluation in Thermo Plastic Composites, Materials Science and Engineering , Vol : A267 , pp: 242 – 246.
30. Tsai K.H. , 1996, The Micro Mechanics of Fibre Pull – Out , Journal of Mechanic sand Physics of Solids, Vol: 44 , pp: 1147 – 1177.
31. Takaku A.ve Arridge R.G.C., 1973, The Effect of Interfacial Radial and Shear Stress on Fiber Pull-Out in Composite Material, Journal of Physics D: Applied Sciences, 6, s.2038.
32. Topçu M. , 1991 , Transmisyon zincirleri yan plakalarında elasto – plastik gerilme analizi , Doktora tezi , D.E.Ü. Fen Bil. Enst. , İzmir.
33. Topçu M. , Taşgetiren S. , 1998 , *Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu* , Pa.Ü. Müh. Fak. Matbaası , Denizli.

34. Tripathi D., Jones F., 1997, Measurement of The Load Bearing Capability of The Fiber / Matriks Interface by Single Fiber Fragmentation Process, Composites Science and Technology Vol: 57 , pp: 925 – 935.
35. Tsai K., Kim K., 1995 , The Micro - Mechanics of Fiber Pull – Out , Journal of Mech. Phys. Solids, Vol: 44 , pp : 1147 – 1177.
36. Xiaoyu J. , 1999 , Micro - Mechanical Characteristics of Fiber Matriks Interfaces in Composite Materials , Composites Science and Technology, Vol: 59 , pp: 635 – 642.
37. Yun Fu S. , Yue C. , 2000, Analyses of Micro Mechanics of Stress Transfer in a Single and Multi Fiber Pull – Out tests , Composites Science and Technology, Vol: 60 , pp: 569 – 579.
38. Zienkiewicz, OC., Valliappan, S. and King, IP., 1969, International journal for Numerical Methods in Engineering, Elasto-Plastic Solutions of Engineering Problems ‘Initial Stress’, Finite Element Approach, Vol. 1., pp.75-100.
39. Zhang X. , Liu H. , 1999 , On Steady State fibre pull – out I The Stress Field ,Composites Science and Technology , Vol:59 , pp : 2179 – 2189.
40. Faber K.T., Advani, S.H., Lee, J.K. and Jinn J.T., 1986, Frictional Stress Evaluation along the Fiber – Matrix Interface in Ceramic Matrix Composites, Journal of American Ceramics Society , 699 , pp. C- 208 , C- 209.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON BİREKİM