

**ALÜMİNYUM METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE
FİBER TAKVİYE AÇISININ MEKANİKSEL ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Özgür ÖZDİLLİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2007
ANKARA**

Özgür ÖZDİLLİ tarafından hazırlanan ALÜMİNYUM METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE FİBER TAKVİYE AÇISININ MEKANİKSEL ÖZELLİKLERE ETKİSİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarız.

Doç. Dr. Halil AYKUL
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Müjgan ÇULFAZ

Üye : Prof. Dr. Süleyman TEKELİ

Üye : Prof. Dr. Faruk MENDİ

Üye : Doç. Dr. Halil AYKUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sami KAYA

Tarih : 21 / 05 / 2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özgür ÖZDİLLİ

**ALÜMİNYUM METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE FİBER
TAKVİYE AÇISININ MEKANİKSEL ÖZELLİKLERE ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Özgür ÖZDİLLİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAYIS 2007**

ÖZET

Bu çalışmada, serbest ucundan tekil bir yüke maruz, tek yönlü fiberlerle takviye edilmiş metal matriksli kompozit ankastre bir kiriş için elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, matriks malzemesi alüminyum ve takviye malzemesi çelik telden oluşan kompozit yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan metal matriksli kompozit malzemenin çekme deneyleriyle mühendislik sabitleri ve mekanik özellikleri elde edilmiştir. Daha sonra malzemenin belirlenen özelliklerinden faydalanılarak, fiber takviye elemanlarının diziliş açıları değiştirilerek yapıdaki elastik, plastik ve artık gerilmelerin analizi yapılmıştır. Gerilme analizi “MATLAB” bilgisayar programı yardımıyla yapılmıştır. Analiz sırasında 0^0 , 15^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 , 75^0 ve 90^0 fiber takviye açılı kompozit malzemedeki oluşan elastik, plastik ve artık gerilmeler tespit edilmiş ve ortaya çıkan normal gerilme (σ) ve kayma gerilmesi (τ) değerleri karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 914.1.073
Anahtar Kelimeler : Kompozit, elasto-plastik gerilme analizi, Matlab
Sayfa Adedi : 103
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Halil AYKUL

**ON ALUMINIUM METAL MATRIX COMPOSITE MATERIALS TO
MECHANICAL PROPERTIES EFFECT OF REINFORCEMENT ANGLE**

Özgür ÖZDİLLİ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAY 2007**

ABSTRACT

In this study, elasto-plastic stress analysis was carried out on a metal matrix composite cantilever beam of arbitrary fiber orientation subjected to a single transverse force applied to the free end. In the first stage of present study, metal matrix composite structure with alüminun as a matrix and steel wire as a reinforcement was produced. Engineering constants and mechanical properties of this metal matrix composite material was determined by tensile experiments. Afterwards; by using these propeties, elastic, plastic and residual stress analysis were done changing the angles of fiber reinforcement components. Stress analysis was made with the help of MATLAB computer programme. During the analysis, elastic, plastic and residual stresses were determined for 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90° fiber reinforcement angles, and normal stress (σ) and shear stress (τ), which are obtained from experiments results were compared.

Science Code : 914.1.073

Key Words : Composite, elasto-plastic stress analysis, Matlab.

Page Number : 103

Advisers : Assoc.Prof.Dr. Halil AYKUL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bana yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Halil AYKUL'a, yardımlarını esirgemeyen dostlarım Öğr. Gör. Alper ATMACA, Öğr. Gör. Selim KORKMAZ ve Araş. Gör. M. Emin ERDİN' e, çalışmalarım boyunca bana destek olan aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	6
2.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Kullanım Amacı	6
2.2. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları	7
2.3. Metal Matriksli Kompozit Malzemeler.....	8
2.3.1. MMK malzemelerin avantajları	8
2.3.2. MMK malzemelerin mekanik özellikleri	9
2.4. Kompozit Malzemelerin Tasarımı.....	10
2.5. Klasik Laminasyon Teorisi	10
2.6. Anizotropik Malzemelerde Gerilme - Şekil Değiştirme Bağıntıları.....	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE HESAPLAMALAR	17
3.1. Sürekli Fiber Takviyeli Metal Matriksli Kompozit Malzemenin Hazırlanması	17
3.1.1. Matriks malzemesi	17
3.1.2. Takviye elemanı	19

	Sayfa
3.1.3. Reçine	19
3.2. Kritik Fiber Hacmi.....	21
3.3. Sürekli Fiber Takviyeli MMK Malzemenin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	23
3.3.1. Fiber yönündeki elastisite modülünün bulunması	23
3.3.2. Fiber yönüne dik doğrultudaki elastisite modülünün bulunması	25
3.3.3. Poisson oranının bulunması	27
3.3.4. Kayma modülünün bulunması.....	28
3.3.5. Normal ve kayma gerilmelerinin bulunması	29
3.3.6. Kayma gerilmesinin bulunması.....	30
4. KOMPOZİTLERİN MAKROMEKANİK ANALİZİ	32
4.1. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme	32
4.2. Keyfi Tabakalı Kompozit İçin Gerilme - Şekil Değiştirme Bağlılıkları.....	35
4.3. Akma Kriterleri	40
4.3.1. Tsai - Hill teorisi	40
4.3.2. Tsai - Wu teorisi.....	42
4.4. Elasto - plastik gerilme analizi	43
4.4.1. Elasto-plastik çözüm	44
4.4.2. Artık iç gerilmeler	44
4.4.3. Takviyeli kirişte elasto-plastik gerilme analizi	46
5. SONUÇLAR	53
6. KAYNAKLAR	59

Sayfa

EKLER	62
EK-1 Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri.....	63
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Love notasyonu.....	12
Çizelge 3.1. Matriks malzemesinin kimyasal bileşim oranları	17
Çizelge 3.2. Matriks malzemesinin mekanik özellikleri.....	18
Çizelge 3.3. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve mühendislik sabitleri.....	18
Çizelge 3.4. Fiber malzemesinin mekanik özellikleri	19
Çizelge 5.1. Kompozit yapıda Bölüm 1 için elde edilen değerler	56
Çizelge 5.2. Kompozit yapıda Bölüm 2 için elde edilen değerler	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Al matriksli kompozit malzemenin yapı elemanları	20
Şekil 3.2. Al matriksli ve çelik tel takviyeli kompozit malzeme	21
Şekil 3.3. Al matriksli kompozit yapının kesiti	21
Şekil 3.4. Matriks ve fiberin gerilme-gerinme ilişkisi	22
Şekil 3.5. E_1 için yükleme yöntemi	24
Şekil 3.6. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_1 ' in değişimi	25
Şekil 3.7. E_2 için yükleme yöntemi	25
Şekil 3.8. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_2 ' nin değişimi	27
Şekil 3.9. Fiberin hacimsel Poisson oranının değişimi	28
Şekil 3.10. Kompozit malzemede kayma ve dönme	28
Şekil 3.11. Çekme deney numunesi	30
Şekil 3.12. Kayma gerilmesinin bulunması için hazırlanan çekme deney numunesi	30
Şekil 3.13. Kayma gerilmesinin bulunması için kullanılan aparat	31
Şekil 4.1. Eksen takımları arasındaki ilişki	35
Şekil 4.2. Tek yönlü fiber takviyeli bir tabaka ve asal koordinat eksenleri	42
Şekil 4.3. Elasto- plastik yükleme	44
Şekil 4.4. Yük kaldırılırsa malzemede oluşan diyagram	44
Şekil 4.5. Süper pozisyon yöntemiyle oluşan gerilmeler	45
Şekil 4.6. Serbest ucundan P tekil kuvvet uygulanan kompozit kirişin plastik bölge dağılımı	49
Şekil 4.7. P yüküne maruz takviyeli kiriş	52
Şekil 5.1. $\theta=0^\circ$ ve $x=427$ mm' deki normal gerilmeler	54
Şekil 5.2. $\theta=0^\circ$ ve $x=427$ mm' deki kayma gerilmeleri	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A_{ij}	Uzama rijitliği
B_{ij}	Birleşme rijitliği
D_{ij}	Eğilme rijitliği
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
σ	Normal gerilme
σ_y, σ_0	Akma gerilmesi
ϵ	Şekil değiştirme
ν	Poisson oranı
γ	Kayma şekil değiştirme
τ	Kayma gerilmesi
h	Plaka kalınlığı
k	Şekil değiştirme sertleşmesi parametresi
M	Eğilme momenti
n	Şekil değiştirme sertleşmesi üssü
N_x, N_y, N_{xy}	Kuvvet bileşenleri
Q_{ij}	Rijitlik dönüşümü
S	Kayma gerilmesi
S_{ij}	Uygunluk matrisi

Simgeler**Açıklama****[τ]**

Transformasyon matrisi

u

x-ekseni yönündeki şekil değiştirme alanı

v

y-ekseni yönündeki şekil değiştirme alanı

 V_f, V_m

Fiber ve matrisin hacimsel oranları

 V_{kr}

Kritik fiber hacmi

w

z- eksteni yönündeki şekil değiştirme alanı

X

0°'de akma mukavemeti

Y

90°'de akma mukavemeti

1.GİRİŞ

Hızla gelişen teknolojiye, geleneksel malzemelerin endüstriyel pazarda doyum noktasına gelmesi, bu teknolojiyle birlikte ihtiyaç duyulan üstün özellikli malzemelerin, maliyetlerinin yüksek olması ya da elde edilememesi “İleri Malzemeler” sınıfında olan kompozit malzemelerin kullanılmasını ve geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Kelime olarak “kompozit”, iki veya daha fazla ayrık parçadan oluşan anlamına gelmektedir. Kompozit malzemeler; makro ölçekte kimyasal olarak birbirinden ayrı, iki veya daha fazla bileşenden oluşan ve bu bileşenler arasında bir ara yüzeyin bulunduğu malzemelerdir [1].

İleri teknoloji ürünü olan seramik ve kompozitlerin kimi kompozisyonu ile çelikten daha sağlam daha hafif ve çok ileri teknoloji alanlarında kullanılmaktadırlar. Bu yeni teknoloji ürünleri, hafiflik ve yüksek sertliklerinin yanında üstün ısı ve korozyon dayanımları, üstün yüzey özellikleri, bazı elektriksel özellikleri ile tekstil, kimya, petro-kimya, metal kesme ve işleme, otomotiv, uzay-havacılık, silah, makina, optik, elektrik-elektronik, tıp, elektro optik, bilgisayar gibi çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadırlar. Silah sistemlerinin performansını, korunmasını ve kamuflajını büyük ölçüde etkileyen malzeme teknolojileri (metal, seramik ve polimer kompozitler) üzerinde de yurt dışında yoğun gelişme ve uygulama çalışmaları sürdürülmektedir.

Hafif ve yüksek mukavemetli malzeme modeli otomotiv sektöründe, son zamanlarda giderek artan çevre duyarlılığı ile ekolojik dengeyi bozan atık gazları ve yakıt tüketimini azaltma fikrine büyük katkısı olmuştur. Uygun kompozit malzemeler kullanılarak imal edilmiş bir otomobilin toplam ağırlığının düşürülmesi ile daha az yakıt tüketimi ve çevreye verilen zarar da büyük ölçüde engellenmektedir.

Kompozit malzemeler içinde, metal matriksli kompozit (MMK) malzemeler önemli bir gruptur. MMK malzemeler hafiflik, rijitlik, ısı direnci, yüksek dayanım, yüksek aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Değişik katkı maddeleri farklı formlarda ana malzemeye katılarak elde edilen MMK'lar içerisinde yaygın olarak silisyum karbür (SiC) parçacık (p) takviyeli alüminyum(Al)-MMK önemli bir yer tutmaktadır. Bu malzemelerin dayanım değerlerinin yüksek ve hafif olması nedeniyle özellikle otomotiv ve uzay/uçak endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Alüminyum metal matriksli kompozit plaklar şekillendirme esnasında elasto-plastik davranış gösterirler. Malzemenin elasto-plastik durumu, elastik bölge aşılarak belirli bir gerilme değerine ulaşıldıktan sonra malzemenin gösterdiği kalıcı şekil değiştirmeler olarak karakterize edilirler. Kompozit malzemelerdeki plastik deformasyon başlangıcı bir akma kriteri yardımı ile belirlenir. Plastik gerilmeden dolayı oluşan deformasyonlar sonucu malzemede artık gerilmeler oluşur [3].

Jeronimidis ve Parkyn, karbon fiber takviyeli termoplastik çapraz takviyeli tabakalı kompozit levhalardaki artık gerilmeleri incelemişlerdir. Klasik Laminasyon teorisi kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel olarak elde edilen artık gerilme değerleriyle karşılaştırılmıştır [4].

Chou vd., fiber takviyeli metal matriksli kompozitlerin üretim metotları, mekanik özellikleri, ikincil çalışma teknikleri ve ara yüzeyleri ile ilgili yapılmış olan çalışmaları yeniden gözden geçirmişlerdir [5].

Sadek ve Tawfik, farklı istifleme ve yükleme şartlarına maruz tabakalı kompozitler için yüksek mertebeli kayma deformasyon teorisi kullanarak sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model izotrop ve fiber takviyeli kompozitlerden yapılan rijit levhalara uygulanmıştır. Elde edilen

sonuçlar, daha önce yapılmış olan analitik ve diğer sonlu eleman çözümleri ile kıyaslanmıştır [6].

Bektaş ve Sayman, $(0^\circ/90^\circ)_2$ simetrik çapraz takviyeli ve $(30^\circ/-30^\circ)_2$, $(45^\circ/45^\circ)_2$, $(60^\circ/-60^\circ)_2$ simetrik açılı takviyeli termoplastik tabakalı plaklar için Elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır. Tabakalı kompozit plaklar uçlarından tutturulmuş olup kalınlık boyunca sabit bir sıcaklık değişimine maruz bırakılmıştır. Kompozit malzeme tam plastik olarak kabul edilmiştir. Akma kriteri olarak Tsai-Hill teorisi kullanılmıştır. Elastik-plastik ve artık gerilme bileşenleri bulunmuştur [7].

Shangdong vd., metal matriksli kompozit malzemelerin elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme davranışlarını sonlu eleman metodu kullanarak araştırmışlardır [8].

Atas ve Sayman, Paslanmaz çelik fiberle takviye edilmiş alüminyum matriksli kompozit levhaları dört kat tabaka halinde oluşturarak, gerilme değerlerini değişik yükler altında sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir [9].

Arslan vd., Eksenel yüklü faturalı ankastre alüminyum matriksli kompozit, akma meydana getirecek şekilde üniform çeki yüklerine tabi tutulmuş ve plakta gerilme yığılmasından dolayı oluşan artık gerilmeler incelenmiş ve faturadaki değişen yarıçaplarla değişen plastik bölgeler incelenmiştir [10].

Özcan vd, Paslanmaz çelik fiber takviyeli asimetric alüminyum matrisli kompozit plakalarda artık gerilme analizi ve plastik bölge davranışlarını incelemişler. 4 tabakalı bir kompozit kullanarak yük akma noktasından itibaren her adımda 0,0001 MPa artırmak koşuluyla 100, 150 ve 200 adımda artırılmıştır [11].

Karakuzu ve Özcan, yaptıkları çalışmada tekil dik yüklü metal matriksli bir kompozit kirişin elasto-plastik gerilme analizini analitik yöntemle Tsai-Hill kriterine göre gerçekleştirmişlerdir [12].

Smith ve Teng, yaptıkları araştırmada tabakalı kompozit kirişlerdeki ara yüzey gerilmeleri incelemişlerdir [13].

Esendemir, üçgen yayılı yüke maruz keyfi oryantasyon yapılmış polimer matriksli kompozit kiriş için analitik çözüm yardımıyla Elasto-plastik gerilme analizi yapmıştır. Elasto-Plastik çözümde malzeme tam plastik olarak kabul edilmiş ve farklı açılarda normal ve kayma kalıntı gerilme bileşenleri elde edilmiştir [14].

Sayman, paslanmaz çelik takviyeli alüminyum metal matriksli basit mesnetli tabakalı kompozit plakanın dik yükler altındaki davranışını incelemiştir. Sonlu eleman tekniği kullanarak elasto-plastik gerilme analizi gerçekleştirdiği çalışmasında kompozit yapının, akma dayanımını ve katılığı arttırdığını ve artık gerilmelerin mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir [15].

Arslan ve Kaman, polyester reçine kullanılan alüminyum matriksli petek yapılı kompozitlerin üretim teknikleri ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır [10].

Sayman vd., yaptıkları çalışmada çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriksli kompozit plakaların elasto-plastik davranışını Değiştirilmiş Newton-Raphson Metodu ile incelemişlerdir. Ortotropik plakanın mekanik özelliklerini ise deneysel metod ile tespit etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre simetrik düzenli plakalar, antisimetrik düzenli plakalara göre daha yüksek kuvvet ile akmaya başlamaktadırlar [16].

Aykul vd., yaptıkları çalışmada dik yüke maruz çelik fiber takviyeli düşük yoğunluklu polietilen termoplastik tabakalı kompozit plakanın elasto-plastik gerilme analizini ve plastik bölge yayılımını sonlu eleman metodu kullanarak incelemişler ve simetrik düzenli plakaların antisimetrik düzenli plakalara göre daha yüksek kuvvet ile akmaya başladığını ve akmanın merkezden veya kenarların orta noktalarından başladığını tespit etmişlerdir [17].

Sayman ve Aykul, yaptıkları çalışmada dairesel delik içeren basit mesnetli paslanmaz çelik takviyeli alüminyum metal matriksli tabakaya dik yük uygulayarak sonlu eleman metodu ile elastik, elasto-plastik ve artık gerilmeleri hesaplamışlardır. Bu çalışmada akmanın plağın ortasındaki delik civarında başladığı görülmektedir [18].

Bu çalışmada amaç; elde edilen alüminyum matriksli kompozit malzemenin bir kiriş şeklinde kullanılmasında dışarıdan gelen yükler karşısında plastik davranışını belirlemektir. Bunu yapabilmek için öncelikle çekme deneyi yapılarak üretilen kompozit malzemenin özellikleri belirlendi. Bir taraftan ankastre olarak kabul edilen kiriş için geçerli formüller (Matlab) bilgisayar programına girildi ve daha sonra programda farklı değerler (kiriş uzunluğu, açı vb...) girilmek suretiyle, bu farklı koşullar için elde edilen veriler tablo haline getirilerek değerlendirildi.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Kullanım amacı

En az iki farklı malzemenin mühendislikte kullanım alanlarına uygun olarak yeniden düzenlenmesiyle ortaya çıkan malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzemelerin kullanım amacı, kendisini oluşturan ayrı ve farklı yapılardaki bileşenlerden daha üstün özelliklere sahip yeni bir malzemenin üretilmesidir.

Kompozit malzemeler üretilirken iyileştirilmesi düşünülen özellikler aşağıdaki ana başlıklar halinde sıralanabilir:

- Mekanik Dayanım
- Yorulma dayanımı
- Korozyon direnci
- Isıl direnç
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklıkta dayanım
- Elektrik iletkenliği
- Rijitlik
- Ağırlık [19].

Bir kompozit malzemenin yapısı, ana fazı oluşturan (matriks) ve bu fazı güçlendirmek için kullanılan tali bir fazdan (takviye elemanı) oluşur. Kompozit malzemeleri değişik şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre metalik kompozitler, polimer kompozitler, seramik kompozitler vb. gibi gruplandırma yapılabilirdiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de sınıflandırma şu şekilde yapılabilir;

- Partikül esaslı kompozitler
- Lamel esaslı kompozitler

- Fiber esaslı kompozitler
- Dolgu kompozitleri
- Tabaka yapıli kompozitler

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre üstün yanları bileşen olarak kullanılabilecek malzeme türünün sınırsız olmasıdır. Bu ise kompozit malzemelerin istenildiği gibi özelliklerinin değıştirilebilmesini sağlar.

2.2. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Günümüzde geleneksel malzemelerin yerini alabilecek ve çeşitli mühendislik alanlarında rahatlıkla kullanılabilecek alternatif malzemeler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu alternatif malzemeler grubu içinde kompozit malzemeler son yıllarda yapılan çalışmalar ile çok talep görmüştür. Aynı yada farklı guruplarda iki veya daha fazla malzemenin özelliklerini bir araya getirerek yada yeni özellikler elde etmek amacıyla oluşturulan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, çok yönlü kullanım olanakları ve üretimlerinin düşük maliyetli oluşu temel özellikleri olarak belirtilebilir. “Geleceğin malzemeleri” olarak tanımlanan kompozit malzemeler çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır ve bu gelişim önümüzdeki yıllarda artacağı benzemektedir [20].

Kompozit malzemeler kullanımda sağlamış oldukları avantajlar ile spesifik noktalarda kullanılarak değışik ihtiyaçlara cevap vermektedirler. Kullanıldıkları en önemli birim savunma sanayiidir. Roket imalatı, uçak yapımı, helikopter yapımı en çok kullanıldığı alanlardandır. Bunun dışında otomotivde motor bloklarında özel dizaynlarda kullanılmaktadır [21].

Otomotiv sanayisinde, kaporta, iç donanım, motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleri kompozitten oluşan başlıca ürünlerdendir.

İnşaat sektöründe, cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit uygulamalarıdır.

Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında da kullanımı hızla artmaktadır.

2.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Otomotiv, uzay ve demiryolu gibi endüstriyel imalat alanlarında çokça kullanılan çelik ve dökme demir malzemelerin yerine mekanik özellikleri yönünden daha hafif yüksek dayanımlı metal matrisli kompozit malzemelerin (MMK) kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Metal Matrisli Kompozitler (MMK), metalik matris içerisinde dağıtılmış çeşitli fazlar içeren süper mekanik özelliklere sahip yeni bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, artırılmış mekanik özellikleri ve düşük yoğunluklarından dolayı en çok kullanıldıkları alanlar; tekerlek kampanası, fren diski, piston ve silindir gömleği gibi uygulamalardır [22].

2.3.1. MMK malzemelerin avantajları

MMK Malzemeler, seramiklerin yüksek dayanımını ve metallerin yüksek tokluk özelliklerini taşımaktadırlar. Yüksek özgül dayanıma sahip olmalarının yanında aşınma dirençleri ve yüksek sıcaklıkta mekanik özellikleri de iyidir.

Otomotiv, uzay/havacılık, demiryolu taşıma sistemleri ve spor alanlarında artan performans gereksinimlerinin karşılanabilmesi için çelik ve dökme demir malzemelerin yerini MMK malzemeler gibi hafif ve yüksek dayanımlı malzemeler almaktadır. Özellikle, otomotiv endüstrisinde hafif oluşları, yakıt tasarrufu sağlaması ve dolayısıyla çevreye daha az emisyon yayılması nedeniyle bu malzemeler imalatçılar tarafından büyük ilgi görmektedir [23].

Günümüzde hızla gelişen modern teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayacak, konvansiyonel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni

malzemelerin arayışı içinde MMK malzemeler yoğun ilgi görmekte ve özel uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır. MMK'lerin konvansiyonel malzemelere olan üstünlükleri; sahip oldukları yüksek mukavemet, elastik modül, tokluk, mükemmel sürünme, yorulma ve aşınma mukavemetleri ve düşük termal genişleme özellikleridir. Metallerin süneklik ve tokluğu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modül özellikleri ile birleştirmeleri neticesinde son derece önemli mühendislik malzemeleri ortaya çıkmıştır. Son yıllarda geliştirilen kaliteli ve ucuz partikül ve kısa fiberler sayesinde, MMK'ler ekonomik olarak üretilmeye başlanmıştır. Kullanımları başta otomobil endüstrisi olmak üzere birçok endüstriyel alanda yaygınlık kazanmaktadır [24].

2.3.2. MMK malzemelerin mekanik özellikleri

Uygulanan dış yüklere karşı bir cismin gösterdiği tepki mekanik davranış olarak adlandırılır. Bu davranışın biçimi de mekanik özelliği tayin eder. Uygulanan dış kuvvetlere karşı gerilme ve şekil değiştirmeler deneyle belirlenir. Cisimler artan dış kuvvetler altında önce şekil değiştirir sonra dayanımını yitirerek kırılırlar. Ancak düşük yükler altında şekil değiştirmeler elastik davranış, yükler belirli bir sınırı aşarsa plastik davranış meydana gelir. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler gibi homojen olmadığının anlaşılması ile bu modern kompozit malzemelerin rijitlik, dayanım ve hafiflik gibi özellikler gösterdiği açıktır. Bu malzemelerin mekanik özelliklerinde karşılaşılan en önemli değişkenler şunlardır:

- Takviye elemanı türü ve özelliği,
- Takviye elemanının hacim oranı,
- Fiber geometrisi ve doğrultusu,
- Fiber boy ve çap oranları
- Matriks türü

uygulanan üretim tekniği vb.dir [19].

2.4. Kompozit Malzemelerin Tasarımı

İzotropik malzemenin her alanda yalnızca bir değerle ifade edilebilen özelliklerinin, kompozit malzeme kullanımı durumunda birden çok değerle ifade edilmesi gerekmektedir. En basit durumda, tek yönde takviye edilmiş ortotropik yapıya sahip bir levhada takviye doğrultusunda ve buna dik doğrultuda olmak üzere iki çekme mukavemeti, iki elastisite modülü, iki ısı genleşme katsayısı ile iki elektrik ve ısı iletim katsayısı gibi değerlerin bilinmesi ve tasarımda göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Üstelik bu değerler doğrultulara göre büyük farklılıklar göstermektedir.

Bu durum, çok değişik şekillerde takviye edilebilen kompozitler göz önüne alındığında ortaya çıkacak zorlukları ve dikkate alınması gereken parametrelerin çokluğu sebebiyle kompozit malzemeden yapılacak makina elemanlarının dizaynında optimizasyonun önemini ortaya çıkarmaktadır.

Kompozit malzemenin izotropik malzemeye göre farklı yönlerinden biri de yapılacak makine parçasını meydana getirecek olan malzemenin, parçanın üretimi sırasında hazırlanmasıdır. Yani, izotropik malzemede olduğu gibi yan mamul malzemeden çeşitli işlemlerle parça imalatı çoğu zaman söz konusu değildir.

Bu çalışmada, metal matriksli kompozit malzemede kullanılan sürekli fiber takviyesinin hacim oranı ve yerleştirme açılarının mekaniksel özelliklere etkisi üzerinde yoğunlaşmıştır.

2.5. Klasik Laminasyon Teorisi

İki yada daha fazla tabakadan oluşan plaklar, malzeme asal eksenleri ile çeşitli açılar yapan zorlamalara dayanabilecek şekilde ve tabakaların değişik doğrultularda istiflenmesiyle üretilirler. Bu tip bir plağın rijitlikleri, klasik laminasyon teorisi yardımıyla hesaplanabilir. Tabakaların değişik

yönlendirilmeleri sonucunda plakta belirli bir asal eksen olmayabilir. Klasik laminasyon teorisi bir tabakadan yola çıkıp bir plağın davranışını inceler. Bir plağın kalınlığı boyunca gerilme-şekil değiştirme değişiminin hesaplanması için plağın uzama ve eğilme rijitliklerinin bilinmesi gerekir. Tabakalı plakların mekanik davranışının incelenmesinde şu kabuller yapılır [25].

- Tabakalar arası bağlar mükemmeldir ve kayma etkisiyle deforme olmazlar, plak tek bir tabaka gibi davranır.
- Plağın her tabakası homojen ve ortotropik olarak kabul edilir.
- Normal doğrultusunda plak kalınlığının sabit kaldığı kabul edilir
- Plak kalınlığı plak kenar uzunluklarına göre daha küçüktür ve sadece düzlemsel yükleme söz konusudur. Yani plak ve tabakalar (kenarları hariç) düzlem gerilme halindedir.
- Bütün yer değiştirmeler, plak kalınlığına kıyasla küçüktür.
- Yer değiştirmeler plak boyunca süreklidir.
- Düzlemsel yer değiştirmeler plak kalınlığı boyunca lineer olarak değişir. Yani x ve y yönlerindeki u ve v yer değiştirmeleri z' nin lineer fonksiyonudur.
- Şekil değiştirme-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri lineerdir.
- Plağın orta düzlemine dik düzlem, plak şekil değiştirse dahi orta düzleme dik kalır. Yani orta düzleme dik düzlemlerde kayma olmaz.

2.6. Anizotropik Malzemelerde Gerilme - Şekil Değiştirme Bağlıları

Bütün doğrultularda özellikleri birbirinden farklı olan malzemeler anizotropik olarak tanımlanırlar. Bu hal malzemeler için en genel haldir. Anizotropik malzemelerde genelleştirilmiş Hooke kanunu gerilme-şekil değiştirme bağıntıları şu şekilde yazılabilir [26].

$$\sigma_{ij} = A_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (2.1)$$

Burada σ_{ij} gerilme tansörü , ϵ_{kl} şekil değiştirme tansörü ve A_{ijkl} elastisite tansörüdür. (1,2,3) rakamları ise sağ el kaidesine göre düzenlenmiş koordinat sisteminin eksenlerini göstermektedir. Kütle kuvvetlerinin olmadığı ve gerilme şekil değiştirme tansörlerinin simetrik olduğu hallerde

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad \text{ve} \quad \epsilon_{kl} = \epsilon_{lk} \quad (2.2)$$

eşitlikleri yazılabilir. Bu hal için daha kısa bir gösterilişle (Love notasyonu ile) Çizelge 2.1 'deki gibi ifade edilebilir.

Çizelge 2.1. Love notasyonu

Gerilme		Şekil Değiştirme	
Tansör Notasyonu	Kısaltılmış Notasyon	Tansör Notasyonu	Kısaltılmış Notasyon
σ_{11}	σ_1	ϵ_{11}	ϵ_1
σ_{22}	σ_2	ϵ_{22}	ϵ_2
σ_{33}	σ_3	ϵ_{33}	ϵ_3
$\tau_{23} = \sigma_{23} = \sigma_{32}$	σ_4	$\gamma_{23} = \gamma_{32} = 2 \epsilon_{23}$	ϵ_4
$\tau_{31} = \sigma_{31} = \sigma_{13}$	σ_5	$\gamma_{31} = \gamma_{13} = 2 \epsilon_{31}$	ϵ_5
$\tau_{12} = \sigma_{12} = \sigma_{21}$	σ_6	$\gamma_{12} = \gamma_{21} = 2 \epsilon_{12}$	ϵ_6

Gerilme-şekil değiştirme tansörünün simetrikliğinden dolayı A_{ijkl} elastisite tansörünün 81 elemanı 36 elemana indirgenmiş olur. Genel hooke kanunu da böylece dört boyutlu tansörel ifadeden kurtulmuş olup, 2 boyutlu tansörel ifadelerle (matrislerle) tanımlanabilir hale gelmiş olur.

$$\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (2.3)$$

Love notasyonuna göre iki boyutlu tansörle gösterilen anizotropik malzemelerdeki gerilme-şekil değiştirme bağıntısının matris olarak ifadesi ise;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil değiştirme matrisi elemanları ise deplasmanlar cinsinden;

$$\epsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \epsilon_4 = \gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\epsilon_5 = \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \epsilon_6 = \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.5)$$

şeklinde dirler. Burada u,v,w fonksiyonları sırası ile x,y,z doğrultularındaki deplasmanlardır. 36 bağımsız elemana sahip olan rijitlik matrisi elastik malzemeler için birbirinden bağımsız 36'dan daha az sabit ile ifade edilebilir. Bunun için şekil değiştirme enerji yoğunluğu fonksiyonunu ele almamız gerekir.

Elastik potansiyeli mevcut elastik malzemelerde bir birim hacme karşılık gelen σ_i gibi bir gerilme bu malzemede $d\epsilon_i$ kadar şekil değişikliği meydana getirdiğinde, bu şekil değişimi elastik malzemenin birim hacim elemanı içinde d_w kadar bir şekil değiştirme enerjisinin meydana gelmesine sebep olur. Bu enerjiyi şöyle ifade edebiliriz;

$$dw = \sigma_i d\epsilon_i \quad (2.6)$$

Bu denklemde $\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j$ ifadesi yerine yazılırsa:

$$dw = C_{ij}\epsilon_j d\epsilon_i \quad (2.7)$$

Birim hacim elemanı için şekil değiştirme enerjisi bulunur. Bu ifadenin integrali alındığında;

$$w = \frac{1}{2} C_{ij}\epsilon_j\epsilon_i \quad (2.8)$$

veya farklı bir yaklaşımla;

$$w = \frac{1}{2} C_{ji}\epsilon_i\epsilon_j \quad (2.9)$$

olarak elde edilir. Burada görüldüğü gibi şekil değiştirme enerjisi elastik malzemenin tamamı için iki farklı denklemle ifade edilebilir. Bu farklı denklemlerin ayrı ayrı kısmi türevleri alınırsa Eş. 2.8'den,

$$\partial w = C_{ij}\epsilon_j \partial \epsilon_i \quad (2.10)$$

Eş.2.9' dan ise;

$$\partial w = C_{ji}\epsilon_i \partial \epsilon_j \quad (2.11)$$

elde edilir. Bu ifadeler şöyle de yazılabilir;

$$\frac{\partial w}{\partial \epsilon_i} = C_{ij}\epsilon_j, \quad \frac{\partial w}{\partial \epsilon_j} = C_{ji}\epsilon_i \quad (2.12)$$

Eş. 2.12'de görülen ifadeler hooke kanununun ifadesidir. Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonu ifadesinin ikinci kez kısmi türevi alındığında,

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \epsilon_i \partial \epsilon_j} = C_{ij} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \epsilon_j \partial \epsilon_i} = C_{ji} \quad (2.13)$$

ifadeleri yazılabilir. Kısmi türev alma sırası türevin değerini değiştirmeyeceğinden, w değerinin diferansiyeli matematiksel bir ifade olup malzemeye bağlı değildir. Böylece Eş. 2.13'ün sonucu olarak:

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (2.14)$$

yazılabilir. Eş. 2.14'den de açıkça görüldüğü gibi rijitlik matrisi simetriktir ve sadece 21 bağımsız elemanla ifade edilebilir. Benzer tarzda bir ifade ile Eş. 2.8, S_{ij} elastiklik matrisi ve gerilmeler cinsinden Eş. 2.16 ile yazılabilir. Burada S_{ij} şekil değiştirmeler ile gerilmeler arasındaki bağıntıyı veren matristir.

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (2.15)$$

$$w = \frac{1}{2} S_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (2.16)$$

Aynı işlemlerle S_{ij} elastiklik matrisininde C_{ij} rijitlik matrisi gibi simetrik bir matris olduğu ve anizotropik malzemelerde 21 bağımsız sabitle ifade edilebileceği görülür.

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (2.17)$$

Eş. 2.4 ile yazılmış olan gerilme-şekil değiştirme bağıntısı $C_{ij} = C_{ji}$ eşitliğinin yardımı ile matris olarak şöyle ifade edilebilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

Bu denklemde olduğu gibi benzer tarzda elastiklik matrisi de 21 bağımsız sabitle ifade edilir.

Eğer malzemede karşılıklı olarak iki düzlemde simetri varsa, yani malzemede iki tane ortogonal simetri düzlemi varsa bu durum ortogonal anizotropi olarak adlandırılır ve bu hal için rijitlik matrisi sadece 9 bağımsız elemanla tanımlanabilir.

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Rijitlik matrisi bu şekilde belirlendikten sonra gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ortogonal anizotropi “ortotropi” hali için aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE HESAPLAMALAR

3.1. Sürekli Fiber Takviyeli Metal Matriksli Kompozit Malzemenin Hazırlanması

Tek başlarına kullanıldıklarında istenilen özelliklerin elde edilemediği en az iki farklı malzemenin değişik üretim yöntemleri ile oluşturulduğu kompozit malzemelerin, yapıyı birleştirici ve gelen yükleri takviye elemanlarına ileten matriksin malzemesi olarak alüminyum ve yapıyı güçlendirerek, kompozitin dayanımını artıran, takviye elemanı olarak da çelik tel kullanılmıştır. Matriks ve takviye elemanı arasındaki bütünlüğü oluşturmak içinde reçine kullanılmıştır.

3.2. Matriks malzemesi

Metal matriksli kompozit malzeme üretiminde, matriks elemanı olarak, hafif metaller kullanılmakta olup, bunlar içerisinde de en yaygın kullanılanı ise Al ve alaşımlarıdır. Al ve alaşımlarının daha çok kullanılma sebebi;

- Dayanım/ özgül ağırlık oranının yüksek olması,
- Elektrik iletkenliği/ özgül ağırlığının yüksek olması,
- Atmosfere ve diğer ortamlar karşı yüksek korozyon direncine sahip bulunmasından kaynaklanmaktadır [19].

Bunlara ilaveten, şekillendirme ve ince levha haline getirilebilmesi diğer bir özelliğidir. Aşağıda Kompozitte Matriks malzemesi olarak kullanılan Al malzemesinin mekaniksel özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Matriks malzemesinin kimyasal bileşim oranları

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Cr	Ti
<0.10	4.65	0.74	0.18	0.08	<0.20	<0.05	0.08	<0.10

Çizelge 3.2. Matriks malzemesinin mekanik özellikleri

X(MPa)	Y(MPa)	E(GPa)	G(GPa)	$\delta 5(\%)$	ρ (gr/dm ³)
104	104	70	26	30-38	2.7

Çizelge 3.3.Kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve mühendislik sabitleri

X	135 MPa
Y	104 MPa
S	44 MPa
ν_{12}	0,327
G_{12}	42 GPa
E_1	112 GPa
E_2	88 GPa

Matriks'in görevi; fiberleri bir arada tutmak ve üzerine gelen yükü güvenli bir şekilde fiberlere iletmektir. Matriks malzemesi bu görevi yerine getirecek şekilde uygun malzemelerden seçilmelidir. Bu amaca uygun olarak metal matriksli kompozit malzemelerde alüminyum, magnezyum, bakır veya titanyum gibi hafif metaller kullanılabilir.

Elde edilen kompozit yapıda matriks malzemesi olarak alüminyum kullanılmıştır. Alüminyumun düşük yoğunluk, iklime dayanıklılık, iyi ısı iletkenliği, soğukta şekil değiştirme kabiliyeti gibi iyi özelliklerinin yanı sıra, düşük mukavemet, bazik karakterli malzemelere karşı dayanıksızlık, kaynak kabiliyetinin düşük olması gibi kötü özellikleri vardır. Alüminyumun oksijene karşı olan yüksek afinitesi nedeni ile, yüzeyde havanın teması sonucu ince fakat yoğun bir oksit tabakası (Al_2O_3) oluşur. Bu tabaka alüminyumu diğer etkilere korur; ancak bazlar ve bazı asitler tabakayı çözer. Yani alüminyum bu maddelere karşı dayanıklı değildir. Ayrıca alüminyumun oksijene afinitesi sıcak presleme ile alüminyum matriksli kompozit üretme işlemini de

zorlaştırmaktadır. Saf alüminyum paketlenme malzemesi olarak, mutfak ve ev aletlerinde, kablolarda, kondansatörlerde, kaplama malzemesi olarak ve alüminyum boyalarda kaplama olarak kullanılır [12].

3.1.2. Takviye elemanı

Fiber, takviye faz olarak ta adlandırılmaktadır. Görevi kompozit yapı üzerine gelen yükü güvenli bir şekilde taşımaktır. Fiber malzemesi bu amaca uygun olarak; cam, whisker veya çelik tel olabilir. Kompozit yapı için birbiriyle uyumlu matriks ve takviye malzemesi seçimi de çok önemlidir.

Bu çalışmada fiber olarak çelik tel kullanılmıştır. Çelik tel kullanılarak alüminyumun düşük dayanım dezavantajı giderilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar bölümünde verilen çelik tel' e ait çekme eğrisinin zikzaklı olmasının sebebi çekme sırasında ince tellerin tek tek kopmasıdır.

Çizelge 3.4. Fiber malzemesinin mekanik özellikleri

X(MPa)	Y(MPa)	E(GPa)	ρ (gr/dm ³)
941	941	200	7

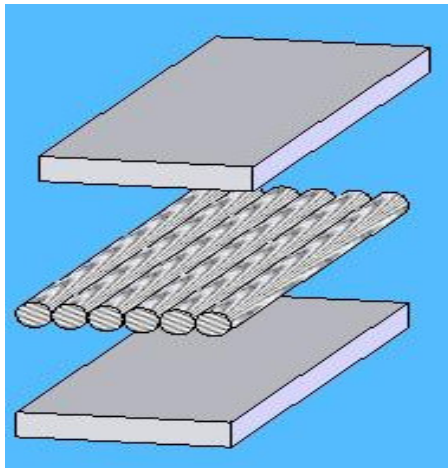
3.1.3. Epoksi reçine

Epoksi reçineler iki veya daha fazla epoksi gurubu polimerlerden meydana gelmiştir. Düşük viskoziteli sıvıdan yüksek ergime noktalı katıya kadar değişebilen bir sınır içindedirler. Sertleştirici türüne bağlı olarak reçinenin 5 °C' dan 180' °C a kadar her sıcaklık derecesinde hızlı veya yavaş bir jelleşme (sertleşme) sağlanabilir. Epoksi reçineler polyesterler gibi sertleştiricileri ile reaksiyona girdiklerinde su ve buharlaştırıcı madde çıkışı olmaz. Sertleşme sırasında büzülme çok azdır. Sertleştikten sonra 250 °C kadar ısıl stabilitelerini korurlar. Bu avantajlarına karşın fiyatları diğer reçinelere göre fazladır. Alkali, asit ve solventlere karşı direnci reçine ve sertleştirici türüne bağlı olarak değişir. Mükemmel izolasyon maddesidir [10].

Epoksi, diğer polimer matrislere göre pahalı olmasına rağmen, kompozitler için en çok tercih edilen polimerdir. Epoksilerin en çok kullanılan polimer olmasının başlıca sebepleri;

- Çekme ve darbe dayanımları oldukça yüksektir,
- Aşınmaya karşı oldukça dayanıklıdır,
- Yüksek sıcaklıkta iyi mekanik ve fiziksel performans,
- Hangi düzgünlük ve dokuda olursa olsun, herhangi bir yüzey yapıştırılabilir,
- Oda sıcaklığında katılaşabilirler,
- Düşük viskozite ve düşük akış hızı,
- Yüksek elektriksel direnç,
- Yüksek kimyasal direnç [27].

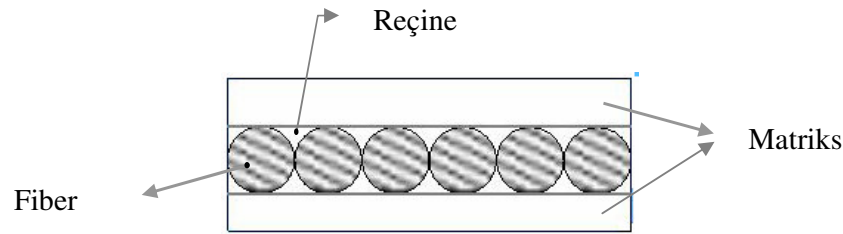
Reçine, oda sıcaklığında A ve B bileşenleri ayrı ayrı kendi ambalajında karıştırıldı. Ayrı bir kaba eşit miktarda A ve B bileşenleri konarak tekrar karıştırıldı. Yapıştırılacak yüzeyler temizlendi. Üretici firma tavsiyelerine uygun hazırlanmış karışım, yüzeylere sürülerek yapıştırma işlemi gerçekleştirildi.



Şekil 3.1. Al matriksli kompozit malzemenin yapı elemanları



Şekil 3.2. Al matriksli ve çelik tel takviyeli kompozit malzeme



Şekil 3.3. Al matriksli kompozit yapının kesiti

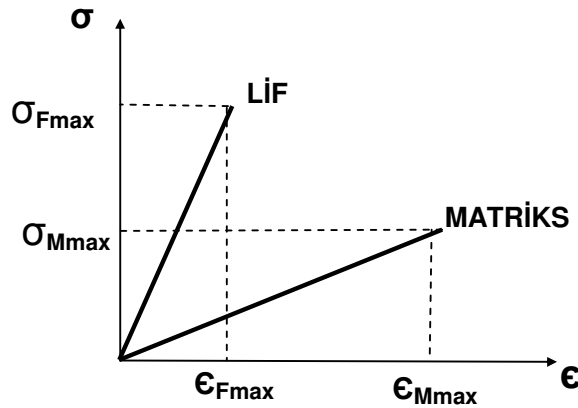
3.2. Kritik fiber hacmi

Tek eksenli olarak takviye edilmiş kompozit malzemeler matriks ve liflerin tokluğuna veya kırılabilirliğine bağlı olarak dört şekilde deforme olmaktadır.

- Lifler ve matriksin her ikisi beraber elastik deformasyona uğrar.
- Lifler sürekli olarak elastik deformasyona uğrar fakat matriks plastik olarak deforme olur.
- Lifler ve matriks her ikisi birden plastik deformasyona uğrar.
- Kompozit malzeme içindeki lifler ve hemen ardından kompozit malzeme çok az deformasyondan sonra kırılırlar.

Şüphesiz kırılğan liflerde üçüncü madde hiç gerçekleşmeyebilir. Benzer şekilde bir kırılğan matriks hiçbir zaman ne ikinci ne de üçüncü şıkka uymaz. Kompozit malzemenin kırılması, ya fiberin kırılması ile olur yada ya da lifler ve matriksin tokluğuna göre kırılırlar.

Liflerin hepsinin aynı mukavemete sahip ve liflerin matrikse oranla daha kırılğan olduğu durumda; Eğer lifler kompozit içinde belirli bir minimum miktardan fazla hacimsel konsantrasyona sahip ise gerilme sonucunda liflerin kendi gerilme limitlerine karşı gelen şekil değışikliklerine ulaşıldığında malzeme kırılır. Zira lifler matriksten daha kırılğandırılar, matriks kadar uzayamazlar. Böylece şekil değıştirme yönü ile lifler daha zayıf kalmaktadır.



Şekil 3.4. Matriks ve fiberin gerilme-gerinme ilişkisi

$$(\sigma_k)_{\max} = \sigma_{f\max} V_f + (\sigma_m)_{\epsilon_{f\max}} (1 - V_f) \quad (3.1)$$

$$(\sigma_k)_{\max} = \epsilon_{f\max} E_f V_f + E_m \epsilon_{f\max} (1 - V_f) \quad (3.2)$$

Buradan şu görülür ki; Lif takviyesi, matriksin mukavemetini yalnız başına olan mukavemetinin üzerine çıkarabiliyorsa $(\sigma_k)_{\max} > (\sigma_m)_{\max}$ dır. Bu durum için (V_{kr}) kompozitin içindeki liflerin hacimsel oranının değeri hesapla bulunabilir.

$$(\sigma_f)_{\max} V_{kr} + (\sigma_m) \epsilon_{f \max} (1 - V_{kr}) = (\sigma_{m \max}) \quad (3.3)$$

$$V_{kr} = \frac{(\sigma_m)_{\max} - (\sigma_m) \epsilon_{f \max}}{(\sigma_f)_{\max} - (\sigma_m) \epsilon_{f \max}} \quad (3.4)$$

V_{kr} , Eş. 3.4 ile elde edilecek değerden mutlaka fazla olmalıdır. Aksi takdirde matriks içine liflerin konulması mukavemet açısından herhangi bir avantaj getirmeyecektir [26].

3.3. MMK Malzemenin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.3.1. Fiber yönündeki elastisite modülünün bulunması

Matriks ve lifler yükleme doğrultusunda şekilde görüldüğü gibi birleştirilmişlerse veya malzeme takviye doğrultusunda bir σ_1 gerilmesinin etkisinde kalıyor ise, bu malzemeler seri haldedir denebilir [10]. Temel kabulde hem lifler hem de matriks aynı miktarda uzar(ϵ_1).

$$\sigma_f = E_f \epsilon_1 \quad (3.5)$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_1 \quad (3.6)$$

yazılabilir. Bu malzemenin kesit alanı A kadar ise ve kesit alan içinde fiber A_f kadar, matriks de A_m kadar yer işgal ediyorsa, P kuvveti σ_1 ile A 'nın çarpımı kadardır.

$$P = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3.7)$$

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon_1 \quad (3.8)$$

$$\sigma_f = E_f \epsilon_1$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1$$

$$E_1 \varepsilon_1 A = E_f \varepsilon_1 A_f + E_m \varepsilon_1 A_m \quad (3.9)$$

$$E_1 = \frac{A_f}{A} E_f + \frac{A_m}{A} E_m \quad (3.10)$$

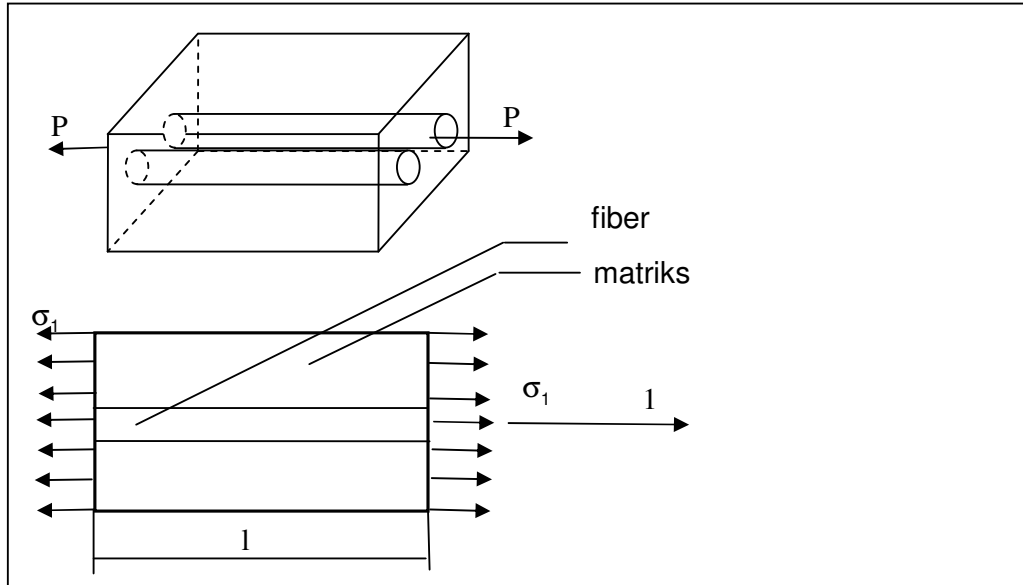
hacimsel konsantrasyon,

$$V_f = \frac{A_f l}{A l} = \frac{A_f}{A}$$

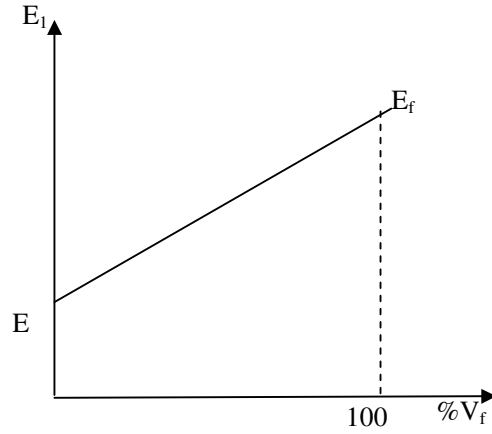
$$V_m = \frac{A_m}{A} \quad (3.11)$$

$$V_m + V_f = 1$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$



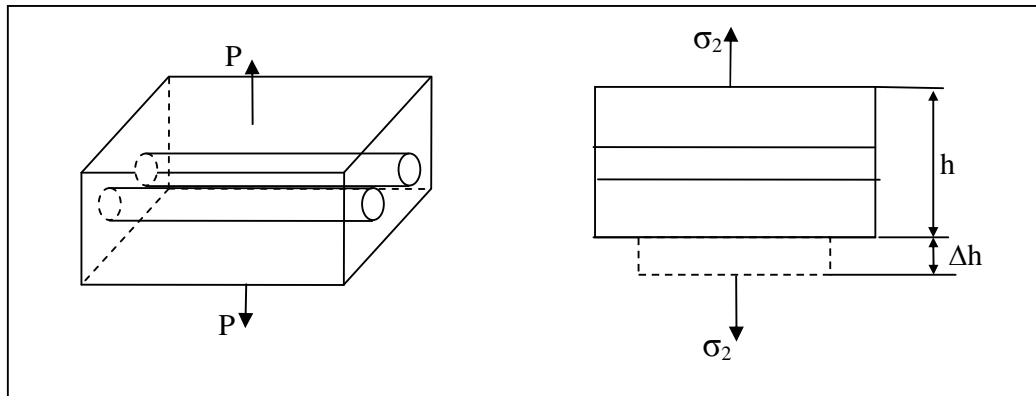
Şekil 3.5. E_1 için yükleme yöntemi



Şekil 3.6. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_1 ' in değişimi

3.3.2. Fiber yönüne dik doğrultudaki elastisite modülünün bulunması

Malzeme takviye doğrultusuna dik yönde yüklenmiş ise bu malzemeler paralel denebilir. Kabul olarak σ gerilmesi matriks ve fiberde eşit olarak taşınır.



Şekil 3.7. E_2 için yükleme yöntemi

$$\sigma_m = \sigma_f = \sigma_{\text{kompozit}}$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_m$$

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f$$

$$\sigma_{\text{kompozit}} = E_2 \epsilon_2$$

P yükü tatbik edildiğinde h kalınlığındaki malzeme h kadar uzuyorsa bu uzama matriks ve fiberin uzamalarının toplamıdır.

$$\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_f$$

$$\epsilon_2 h = \Delta h \quad \Rightarrow \quad \epsilon_2 = \frac{\Delta h}{h}$$

$$\epsilon_m = \frac{\Delta h_m}{h_m} \quad \Rightarrow \quad \Delta h_m = \epsilon_m h_m$$

$$\epsilon_f = \frac{\Delta h_f}{h_f} \quad \Rightarrow \quad \Delta h_f = \epsilon_f h_f$$

$$V_m = \frac{h_m}{h} \quad \Rightarrow \quad h_m = h V_m$$

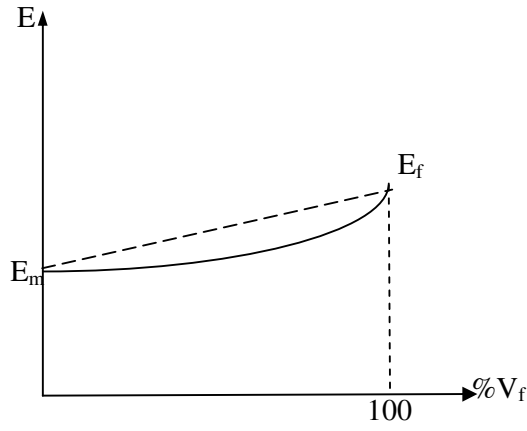
$$V_f = \frac{h_f}{h} \quad \Rightarrow \quad h_f = h V_f \quad (3.12)$$

$$\epsilon_2 h = \epsilon_m h V_m + \epsilon_f h V_f$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} V_m$$

$$\frac{\sigma_k}{E_2} = \frac{\sigma_f}{E_f} V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} V_m$$



Şekil 3.8. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_2 ' nin değişimi

3.3.3. Poisson oranının (ν_{12}) bulunması

$$\nu_{12} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (3.13)$$

$$\epsilon_2 = -\frac{\Delta h}{h} \quad (3.14)$$

$$h = -h\epsilon_2 = h\epsilon_1\nu_{12} \quad (3.15)$$

Δh diğer bir ifade şekli ile matriks ve fiberlerin kısaltmalarının toplamı olduğuna göre,

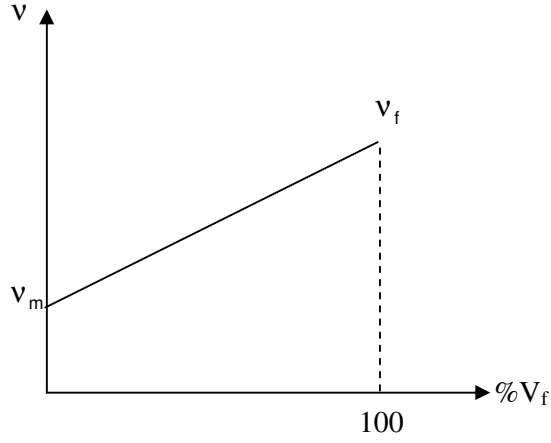
$$\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_f$$

$$\Delta h_m = hV_m\epsilon_1\nu_m \quad (3.16)$$

$$\Delta h_f = hV_f\epsilon_1\nu_f$$

$$h\epsilon_1\nu_{12} = hV_f\epsilon_1\nu_f + hV_m\epsilon_1\nu_m$$

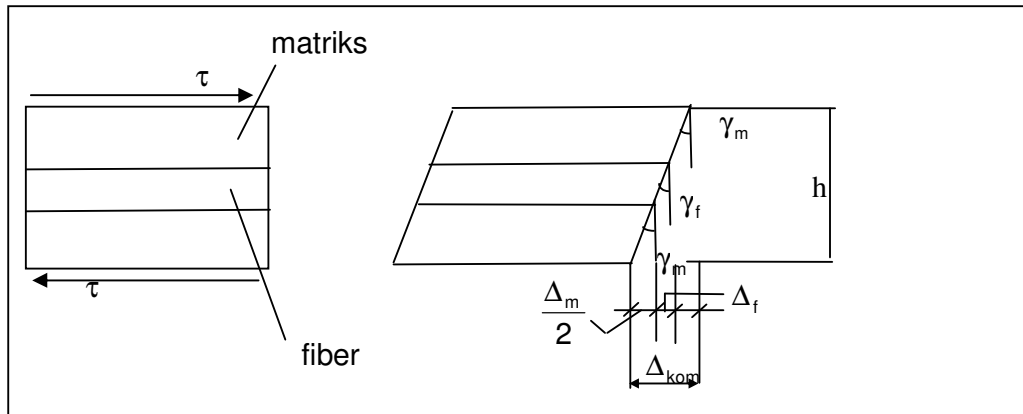
$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$$



Şekil 3.9. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak poisson oranının değişimi

3.3.4. Kayma modülünün bulunması

Kompozit malzemedan h kalınlığında ve L boyunda alınan deney parçalarına kayma gerilmeleri uygulandığında parçalar Şekil 3.10'da görüldüğü gibi değişikliğe uğrar ve θ kadar bir dönme meydana gelir.



Şekil 3.10. Kompozit malzemedeki kayma ve dönme

Şekilde abartılarak çizilmiş olan dönme gerçekte çok azdır. Bu sebeple dönmeden sonra parça kalınlığının sabit kaldığı kabul edilir. γ_m matriksin γ_f fiberin τ kayma gerilmesi altında dönme açılarıdır. Kompozit malzemedan

alınan h kalınlığındaki parçalarda dönmeler çok az olduğundan dönme açılarının tanjantları radyan olarak açının kendisine eşittir.

$$\begin{aligned}\Delta_{kom} &= h \cdot \gamma_{12} \quad , \quad \Delta_{kom} = \Delta_m + \Delta_f \\ \Delta_m &= h \cdot V_m \cdot \gamma_m \quad , \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \\ \Delta_f &= h V_f \gamma_f \quad , \quad V_m = \frac{\tau}{G} \quad , \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \\ \Delta_{kom} &= h \cdot \gamma_{12} = h \cdot V_m \cdot \gamma_m + h \cdot V_f \cdot \gamma_f\end{aligned}\tag{3.17}$$

$$\gamma_{12} = V_m \cdot \gamma_m + V_f \cdot \gamma_f$$

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

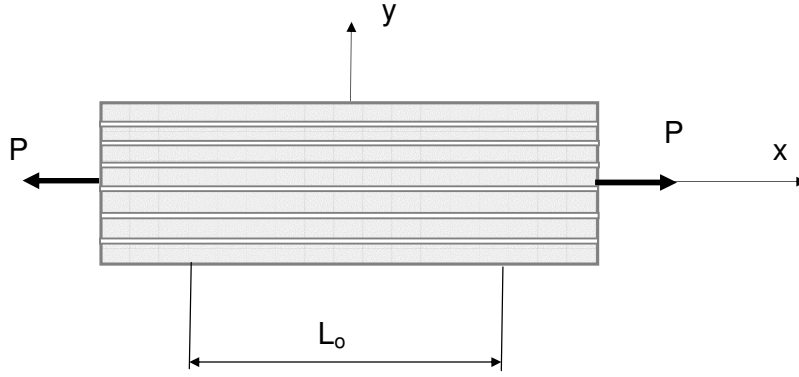
$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_m} V_m + \frac{1}{G_f} V_f$$

3.3.5. Normal ve kayma gerilmelerinin bulunması

Kompozit yapının eksenel (X) ve eksene dik (Y) gerilmeleri TS 138 EN 10002–1 standardına göre alınmış numune (Şekil 3.10) ile yapılan basit çekme deneyi ile bulundu. Bulunan değerler sonuç kısmında verilmiştir. Numune kalınlıkları 3 mm ‘den büyük olduğu için ilk ölçü uzunluğu (çeneler arası mesafe)

$$L_o = k \sqrt{S_o}\tag{3.18}$$

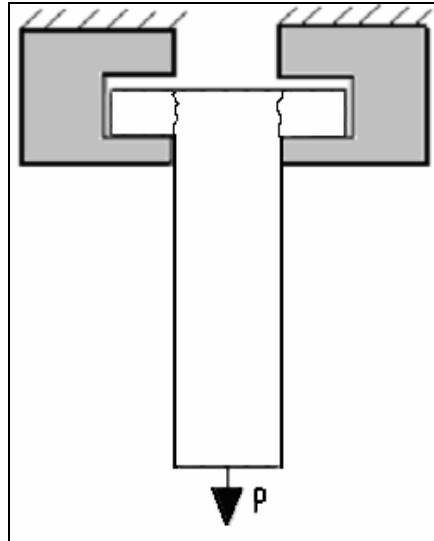
bağıntısından bulundu. Burada k değeri 5,65 'dir. S_o ; kesit alanı ve L_o ; ilk ölçü uzunluğudur.



Şekil 3.11. Çekme deney numunesi

3.3.6. Kayma gerilmesinin bulunması

Kayma gerilmesi (S) 'ni bulmak için ise Şekil 3.10'da görüldüğü gibi özel bir aparat hazırlandı. Çekme deney cihazında yapılan deney sonucunda kayma gerilmesi Eş .3.19'a göre bulundu.



Şekil 3.12. Kayma gerilmesinin bulunması için hazırlanan çekme deney numunesi



Şekil 3.13. Kayma gerilmesinin bulunması için kullanılan aparat

Şekildeki gibi yüklenen malzeme için,

$$S = \frac{P}{2A} \quad (3.19)$$

yazılabilir. Burada S kayma gerilmesi, A; kesit alanı ve P de uygulanan kuvvettir. Bu metotla yaklaşık olarak kompozit malzemenin kayma dayanımı bulunmuştur.

4. KOMPOZİTLERİN MAKROMEKANİK ANALİZİ

Matriks ve fiber şeklinde birkaç tabakadan oluşmuş tabakalı kompozit malzemelerin tasarımı ve mekanik davranışlarının incelenmesine makromekanik adı verilmektedir. Mikromekaniksel analizlerde kompozit elemanlarının kendi özelliklerinden hareket edilerek ve aralarındaki ilişki göz önüne alınarak kompozit malzeme özelliklerinin hangi sınırlar içerisinde değişebileceği belirlenir. Makromekaniksel analizlerde ise kompozit yapının servis koşullarındaki mekaniksel davranışları incelenir. Örneğin dışarıdan uygulanan çekme gerilmelerinin oluşturacağı deformasyonlar yapı elemanlarının ayrı ayrı deformasyonları yerine kompozitin deformasyonu cinsinden ifade edilir [28].

4.1. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme

Herhangi bir elastik malzeme için düzlem gerilme halini ifade etmek için üç eksenli gerilme hali ile ilgili tanımlarda ve denklemlerde üçüncü düzlemle ilgili gerilmelerin sıfır alınması gerekli ve yeterlidir [26].

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

ortotropik malzemelerde şekil değiştirmeler;

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 \quad (4.1)$$

denklemini düzlem gerilme hali için,

$$\gamma_{12} = \varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2$$

$$\gamma_{23} = \varepsilon_4 = S_{44}\sigma_4 = S_{44}\tau_{23} = 0 \quad (4.2)$$

$$\gamma_{13} = \varepsilon_5 = S_{55}\sigma_5 = S_{55}\tau_{13}$$

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

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

Eş. 4.3'de elastiklik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilmek istendiğinde,

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

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (4.4)$$

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

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

Eş. 4.2'de açıkça görüldüğü gibi malzemeye bağlı dört tane bağımsız değişkenle şekil değiştirme-gerilme bağıntıları tanımlanabilmektedir. Şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade etmek yerine gerilmeleri şekil değiştirmeler cinsinden Q_{ij} matrisi ile ifade etmek birçok kolaylıklar sağlayacağı için iki eksenli gerilme haline ait gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

Burada rijitlik matrisinin elemanları elastiklik matrisinin elemanları cinsinden,

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, & Q_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\
Q_{12} &= \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, & Q_{66} &= \frac{1}{S_{66}}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

veya aynı elemanlar mühendislik sabitleri cinsinden,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \tag{4.7}$$

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

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

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \tag{4.8}$$

şeklinde yazılabilir. Burada elemanlar;

$$S_{11} = \frac{1}{E} \quad S_{12} = -\frac{\nu}{E} \quad \text{dir.}$$

Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ise;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \tag{4.9}$$

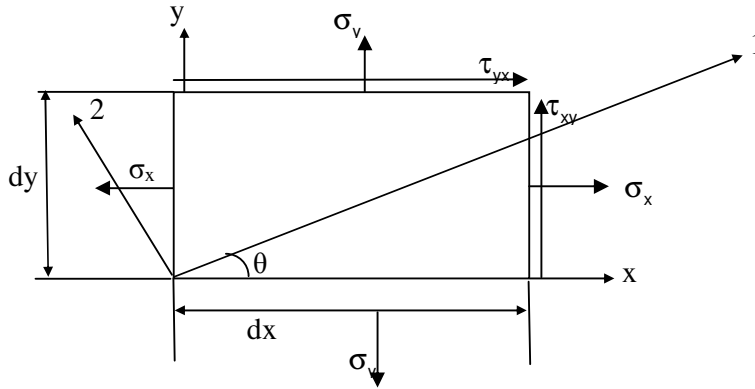
şeklinde yazılabilir. Buradaki elemanlarda Eş. 4.2 ve Eş. 4.5'den yararlanılarak elde edilebilir.

$$E_1 = E_2 = E; \quad G_{12} = G$$

$$Q_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad , \quad Q_{12} = \frac{\nu E}{1-\nu^2} \quad , \quad Q_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.10)$$

4.2. Keyfi Tabakalı Kompozit İçin Gerilme-Şekil Değişirme Bağlılıkları

Asal malzeme doğrultuları 1 ve 2 eksenleri ile tanımlanan ortotropik kompozit malzemenin üzerine uygulanmakta olan gerilmeler (θ) kadar farklı olan x ve y eksenleri doğrultusunda olduğunda, malzemenin elemanter mekaniğinden yararlanarak, transformasyon denklemlerinin yazılması gerekir.



Şekil 4.1. Eksen takımları arasındaki ilişki

Şekilde görüldüğü gibi x, y düzlemi içinde kenarları dx, dy ve kalınlığı çok küçük bir değer olan h' a eşit bir plak ele alalım; Bu plakta gerilmeler en büyük elastisite modülünün bulunduğu 1 eksenine transform etmek için gerilmelerin dengesi yazılırsa:

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{xy} (2 \sin \theta \cos \theta)$$

$$\tau_{12} = \sigma_x (\sin \theta \cos \theta) + \sigma_y (\sin \theta \cos \theta) + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (4.11)$$

$$\sigma_2 = \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_x \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} (\sin \theta \cos \theta)$$

Bu denklemden faydalanarak [T] transformasyon matrisi,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

şeklinde yazılabilir. Gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin transformu bu $[T]$ matrisinin yardımı ile aşağıdaki gibi yapılabilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix}$$

Burada T transformasyon matrisi ve yapılan transformasyon işlemi dikkatle incelendiğinde; işlemin malzeme özellikleri ile hiçbir ilişkisinin bulunmadığı sadece gerilmelerin dönmesi ile ilgili olup gerilme eksenleri arasındaki θ açısına bağlı olarak ifade edilebildiği açıkça görülebilir.

1 ve 2 eksenleri malzemenin asal doğrultu eksenlerini, x, y eksenleri de gerçekte uygulanan gerilmelerin bulunduğu eksenleri işaret ettiğinde, malzemeye ait asal gerilme değerleri cinsinden x, y doğrultularındaki gerilmeleri bulabilmek için transformasyon şöyle tanımlanır:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix}$$

(-1) matrisin tersini temsil etmektedir ve ters matris şöyle yazılır;

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix}$$

1, 2 ve x, y eksenlerinin birbirleri ile çakışır durumda bulunması halinde Eş. 4.14'deki $[T]^{-1}$ denklemi ile de şekil değiştirmeler cinsinden ifadesi yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

Eksenlerin çakışmaması durumunda genel ifade aşağıdaki işlem basamakları ile şöyle bulunur:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} &= [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \\ &= [T]^{-1} [Q] [R] [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.20)$$

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

$$[R][T][R]^{-1} = [T]^T \quad (4.21)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.22)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.26)$$

Burada (-) işareti yani $[\bar{Q}_{ij}]$, indirgenmiş Q_{ij} rijitlik matrisi yerine transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir. k. tabakadaki gerilme bileşenlerinin değeri plak referans düzleminin şekil değiştirme ve eğrilikleri yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.24)$$

Burada k indisi k. tabakayı ifade eder. Plâğın her tabakası için $\bar{Q}_{ij}$ matrisi farklı olabileceğinden, plak kalınlığı boyunca gerilme değişimi sürekli değildir.

Şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade edebilmek için indirgenmiş Q_{ij} matrisine benzer tarzda S_{ij} matrisi tanımlamak gerekir. Eş. 4.3'ü başlangıç olarak alıp;

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^T [S] [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{26} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

ifadesi basamak basamak yapılacak işlemle bulunur. Burada;

$$[R] [T]^{-1} [R]^{-1} = [T]^T \quad (4.28)$$

$[T]^T [S] [T] = [\bar{S}]$ olarak alınır.

4.3. Akma Kriterleri

Bir malzemenin gerilmesi ve bunun sonucu olarak akması veya kırılması ile ilgili deneysel sonuçlar genellikle tek eksenli gerilme durumlarını içeren çalışmalarla tespit edilirler. Fakat gerçekte malzemelerde iki veya üç eksenli gerilme durumunun mevcut olduğu görülür. Kırılma teorilerinde malzemenin ortotropik olmasından başka homojen olması da istenir. Eğer malzeme homojen değilse bu malzeme ile yapılan deneylerle bir sonuca ulaşmak mümkün değildir. Bu bakımdan kullanılan malzemelerin homojen bir yapıya sahip olmalarına dikkat etmek gerekir [10].

Kırılma teorilerinde esas olarak alınan gerilme çeşitli malzemelerde farklıdır. Gevrek malzemeler bilindiği gibi akmadan kırılırlar, sünek malzemeler ise belli bir lineer uzama bölgesinden sonra bir akma noktasına ve daha sonra plastik şekil değiştirme bölgesine ve sonunda bir kopma noktasına ulaşırlar. Farklı olan bu malzemelerden gevrek malzemeler için kırılma, sünek malzemeler için ise akma noktası kırılmanın açıklanması için kullanılır.

Kırılma ve akma, malzemelerin kendine has özelliklerinden dolayı gerilme olayından çok daha karmaşıktır. Bu karmaşık olayın açıklanabilmesi için değişik teoriler ortaya atılmıştır. Bunlardan Tsai-Hill ve Tsai-Wu teorileri aşağıda açıklanmıştır.

4.3.1. Tsai-Hill teorisi

İzotrop malzemeler için kullanılan Von-Mises akma teorisi; [29]

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_y^2 \quad (4.29)$$

şeklinde tanımlanır. Tsai-Hill teorisi ise Von Mises izotropik akma teorisinin anizotropik malzemelere tatbik edilmiş şekli olarak düşünülebilir. Tsai ve Hill

tarafından, anizotropi asal eksenleri (1,2,3 eksenleri) boyunca üç boyutlu gerilme durumu için öne sürülen bu teori;

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 \quad (4.30)$$

denklemini ile ifade edilir. Bu denklem;

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1$$

olarak da yazılabilir. F, G, H, L, M ve N parametreleri tek eksenli ve kayma yüklemelerindeki akma dayanımları yardımıyla belirlenir. Eğer sadece kayma gerilmesi etki ediyorsa Eş. 4.6;

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (4.31)$$

olur. Burada S kayma dayanımıdır. Benzer olarak sadece σ_1 etki ediyorsa, diğer bütün gerilmeler sıfıra eşit olacağından Eş. 4.6;

$$G + H = \frac{1}{X^2} \quad (4.32)$$

Sadece σ_2 etki ediyorsa;

$$F + H = \frac{1}{Y^2} \quad (4.33)$$

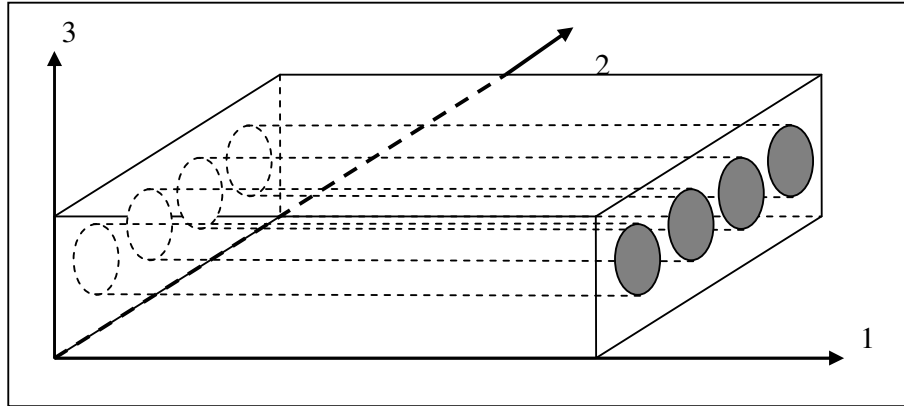
Eğer sadece σ_3 etki ediyorsa;

$$F + G = \frac{1}{Z^2} \quad (4.34)$$

Haline dönüşür. Burada X, 1 yönündeki akma dayanımı, Y ve Z ise sırasıyla 2 ve 3 yönündeki akma dayanımlarıdır. Çekme ve basmadaki dayanımlar eşit kabul edilir. Eş. 4.8, Eş. 4.9 ve Eş. 4.10'un çözümünden F, G, H katsayıları ile X, Y, Z arasındaki ilişki,

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\ 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \end{aligned} \quad (4.35)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 4.2. Tek yönlü fiber takviyeli bir tabaka ve asal koordinat eksenleri

1 yönünde takviye edilmiş düzlem gerilme için $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$ 'dır. Bununla beraber Şekil 4.1'deki gibi takviyede geometrik simetri düşüncesinden $Y=Z$ olarak alınmaktadır. Bu durumda Eş. 4.6;

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (4.36)$$

şeklinde ifade edilir [12]. Buradan eşdeğer gerilme $\bar{\sigma}$;

$$\sigma^{-2} = \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \frac{X^2}{Y^2} \sigma_2^2 + \frac{X^2}{S^2} \tau_{12}^2 = X^2 \quad (4.37)$$

şeklinde ifade edilebilir.

4.3.2. Tsai-Wu teorisi

Bu teori anizotropik malzemeler için aşağıdaki akma formülü olarak verilmiştir.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1 \dots 6) \quad (4.38)$$

İki eksenli gerilme hali için bu denklem;

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

tek eksenli gerilme halinde ise X_t çekme dayanımı, X_c basma dayanımı olmak üzere Eş. 4.14 kısaca,

$$\begin{aligned} F_1 X_t + F_{11} X_t^2 &= 1 \\ F_1 X_c + F_{11} X_c^2 &= 1 \end{aligned} \quad (4.39)$$

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

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}$$

$$\begin{aligned}
F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c} \\
F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\
F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} \\
F_6 &= 0 \\
F_{66} &= \frac{1}{S^2}
\end{aligned} \tag{4.40}$$

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ iki eksenli gerilme hali için Eş. 4.14;

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1 \tag{4.41}$$

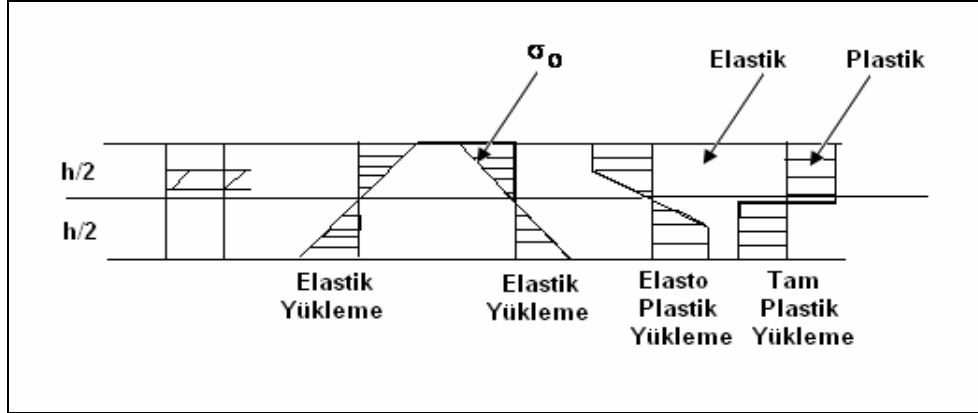
ile ifade edilir.

4.4. Elasto- Plastik Gerilme Analizi

Eğilmeye maruz kirişlerde iki farklı deformasyon bölgesi mevcuttur. Bunlardan birincisi lineer elastik davranış bölgesi, ikincisi ise plastik deformasyon bölgesidir. Lineer elastik davranış bölgesinden sonra yapının bir parçasında plastik akma başladığı halde geri kalan parçası lineer elastik olarak davranmaya devam eder. Plastik akmanın kontrol altında bulundurulmuş bölgesi burasıdır. Sonuçta öyle bir noktaya gelinir ki yük hiç artmadığı halde akma devam eder. Bu aşamada yapının plastik deformasyonu sınırsız bir hal alır.

4.4.1. Elasto- plastik çözüm

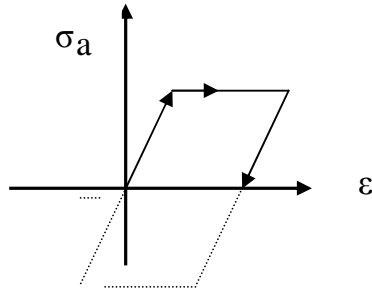
Kirişler elastik bölgeden başlayarak zorlandığında kiriş malzemesi ideal plastik kabul edilirse şu durumlar meydana gelir.



Şekil 4.3. Elasto- plastik yükleme

4.4.2. Artık iç gerilmeler

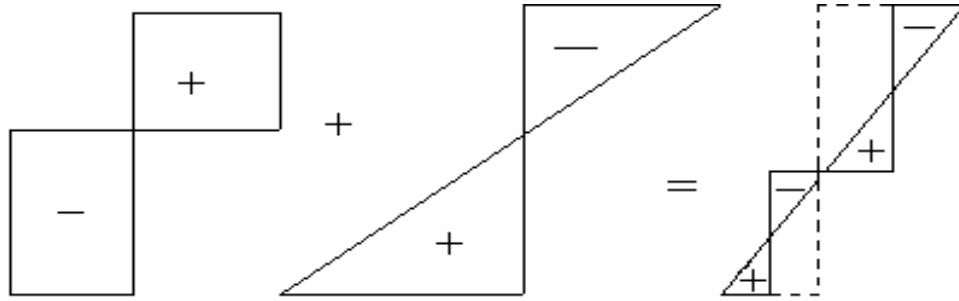
Elasto-plastik yüklenmiş bir malzemede yük kaldırılırsa ideal bir plastik malzeme için şekildeki diyagram elde edilebilir.



Şekil 4.4 Yük kaldırılırsa malzemede oluşan diyagram

İçte kalan gerilmelerden dolayı diyagramın tam olarak ϵ eksenine gelmediği görülür. Bu içerde kalan gerilmelere iç gerilmeler veya artık gerilmeler ismi verilir. Eğer ince çubuk eleman, plastik bölgede tek eksenli çekilip daha sonra kuvvet kaldırılırsaydı $\sigma - \epsilon$ diyagramı eksenine üzerinde duracaktı. Çünkü böyle bir yükleme gerilme dağılımı düzgün olup iç gerilmeler ihmal edilebilir mertebededir. Fakat bir kiriş elasto-plastik zorlanıp yük kaldırıldığı zaman kiriş kesitinde gerilme dağılımı düzgün olmadığından diyagramın ekseninin üzerinde görülür. Bu durumda kirişte iç gerilmeler

meydana gelmektedir. Yük kaldırıldığında, kirişin uygulanan yükün ters yönünde bir miktar açıldığı görülür. Şekil 3 den görüleceği üzere bu yük kaldırılırken yük lineer olarak etki etmekte ve açılmadan dolayı etki eden kuvvetin ters işaretlisi olmaktadır. Mesela tam elastik yüklenmiş bir kirişte eğilme momenti kaldırıldığında meydana gelen iç gerilmeler süper pozisyon prensibiyle bulunabilir.



Şekil 4.5 Süper pozisyon yöntemiyle oluşan gerilmeler

Bu gerilmelerin kesit boyunca cebirsel toplamalarının sıfır olduğu iç gerilmeler vasıtası ile kullanılan elamanların mukavemetleri yükseltilmektedir. Bilhassa top namlularında, içten basınçlı kaplarda önce malzeme plastik yüklenmekte daha sonra yük kaldırılmaktadır. Bu durumda meydana gelen iç gerilmeler ters işaretli oldukları için yeni yüklemeye elaman daha fazla yük taşıyabilmektedir.

4.4.3. Takviyeli kirişte elasto - plastik gerilme analizi

Serbest ucundan tekil bir yüke maruz kompozit ankastre bir kiriş için (Şekil 4.6.) ;

Elastik Çözüm

Düzlem gerilme durumu için denge denklemi aşağıdaki şekilde verilmektedir [30].

$$a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - 2a_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (4.42)$$

Burada F gerilme fonksiyonu ve a_{ij} uygunluk matrisinin bileşenleridir; [31,32]

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.43)$$

Burada ;

$$\begin{aligned} a_{11} &= S_{11}m^4 + (2S_{12} + S_{66})m^2n^2 + S_{22}n^4 \\ a_{12} &= S_{12}(m^4 + n^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{66})m^2n^2 \\ a_{22} &= S_{11}n^4 + (2S_{12} + S_{66})m^2n^2 + S_{22}m^4 \\ a_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})nm^3 - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})n^3m \\ a_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})n^3m - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})nm^3 \\ a_{66} &= 2(2S_{11} + 2S_{12} - 4S_{12} - S_{66})m^2n^2 + S_{66}(m^4 + n^4) \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$S_{11}=1/E_1, \quad S_{12}= -U_{12}/E_1, \quad S_{22}=1/E_2, \quad S_{66}=1/G_{12}, \quad m=\cos\theta, \quad n=\sin\theta$$

Hem sınır şartlarını hem de denge denklemini sağlayacak F fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$F = \frac{d}{6}xy^3 + \frac{e}{12}y^4 + \frac{a}{2}y^2 + bxy \quad (4.45)$$

F fonksiyonu denge denkleminde yerine konulursa,

$$-2a_{16}d + 2a_{11}e = 0 \text{ ve } e = md, \quad m = a_{16}/a_{11} \text{ olarak ifade edilmektedir.}$$

Gerilme bileşenleri:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = dxy + ey^2 + a = dxy + md y^2 + a \quad (4.46)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\frac{d}{2}y^2 - b$$

şeklindedir. Bu kirişimiz için sınır şartları:

$$y = \pm c \quad \text{için} \quad \tau_{xy} = 0 \quad (4.47)$$

$$y = \pm c \quad \text{için} \quad \sigma_y = 0$$

$$x = 0 \quad \text{için} \quad \int_c^c \tau_{xy} dy = -P$$

Şeklindedir. Burada t kiriş kalınlığıdır. Serbest uçta σ_x 'in eğilme momenti sıfıra eşittir,

$$\int_{-c}^c \sigma_x dy = 0 \quad (4.48)$$

$$\int_{-c}^c \sigma_x ty dy = 0$$

Yukarıdaki sınır şartlarından yararlanılarak F fonksiyonundaki a,b,d,e katsayıları:

$$a = \frac{md}{3}c^2, \quad d = \frac{3P}{2tc^3} = \frac{P}{I}, \quad b = \frac{d}{2}c^2 \quad (4.49)$$

$$e = md = \frac{3P}{2tc^3}m = \frac{P}{I}m$$

şeklinde ifade edilir.

Bu katsayılar gerilme bileşenleri denklemlerinde yerlerine konulursa gerilme bileşenleri;

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -\frac{P}{I} \left(xy + my^2 - \frac{m}{3} c^2 \right) \\ \sigma_y &= 0 \\ \tau_{xy} &= -\frac{P}{2I} (c^2 - y^2)\end{aligned}\quad (4.50)$$

olarak elde edilir. Burada I kirişin asal atalet momenti olup $I = \frac{t(2c)^3}{12}$ dir.

Elastik-Plastik Çözüm

Plastik deformasyonun başlangıcı bir akma kriteri yardımı ile belirlenmekte olup, akma sonrası deformasyon malzeme direncinin büyük ölçüde düşüşü sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu çözümde akma kriteri olarak Tsai-Hill teorisi kullanılmıştır. Bu kritere göre σ eşdeğer gerilmesi,

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \frac{X^2}{Y^2} \sigma_2^2 + \frac{X^2}{S^2} \tau_{12}^2 = X^2 \quad (4.51)$$

şeklindedir. Burada X ve Y, 1 ve 2 asal malzeme yönlerindeki akma dayanımları; S, 1-2 düzlemindeki kayma akma dayanımıdır. Eğer eşdeğer gerilme akma dayanımı X'den daha büyükse elasto-plastik gerilme analizi uygulanır. σ_1 , σ_2 , τ_{12} asal malzeme yönündeki gerilme bileşenleri,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau_{12} &= -\sigma_x \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)\end{aligned}\quad (4.52)$$

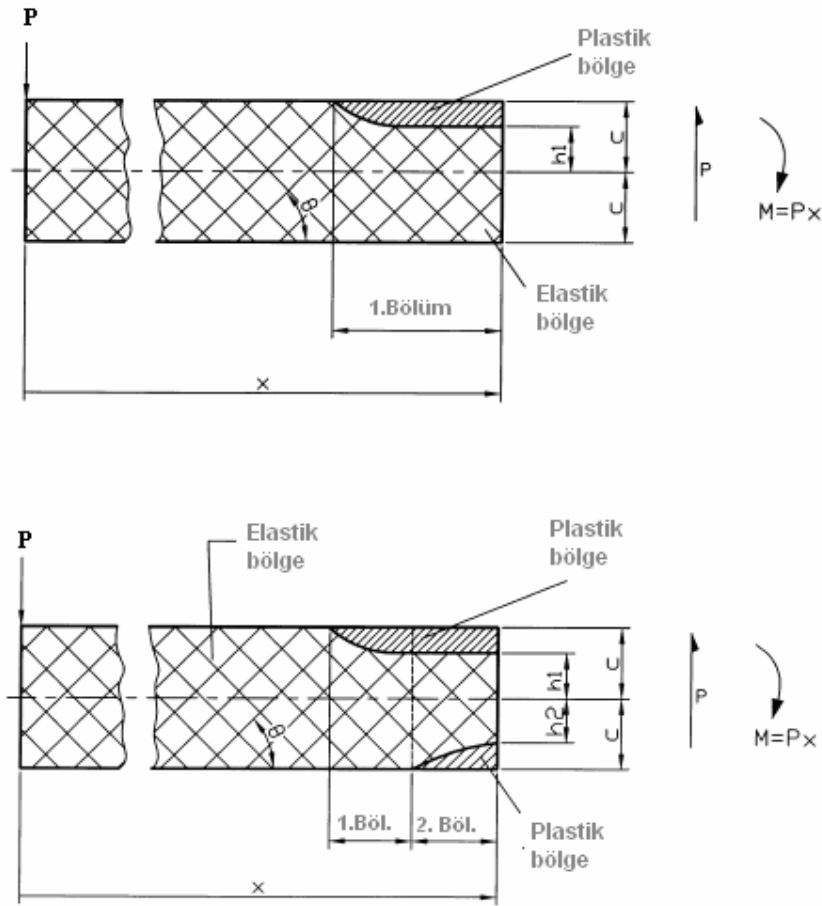
şeklinde verilir.

Malzemenin akma noktası,

$$X_1 = \frac{X}{\sqrt{\cos^4 \theta - \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{X^2 \sin^4 \theta}{Y^2} + \frac{X^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{S^2}}}\quad (4.53)$$

Bölüm1: Şekil 4.6'da plastik bölge en üst yüzeyde başlamaktadır. Bu durumda sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
 y = -h_1 & \quad \text{için} \quad \tau_{xy} = 0 \\
 y = c & \quad \text{için} \quad \tau_{xy} = 0 \\
 \int_{-h_1}^c \tau_{xy} dy &= -P \\
 y = -h_1 & \quad \text{için} \quad \sigma_x = X_1
 \end{aligned} \tag{4.54}$$



Şekil 4.6. Serbest ucundan P tekil kuvvet uygulanan kompozit kirişin plastik bölge dağılımı

Kirişin enine kesiti boyunca σ_x gerilme bileşeni sıfırdır.

$$X_1(c - h_1)t + \int_{-h_1}^c \sigma_x dy = 0 \tag{4.55}$$

σ_x gerilme bileşeninin momenti P_x 'e eşittir.

$$X_1(c - h_1)t + \int_{-h_1}^c \sigma_x t dy = 0 \quad (4.56)$$

Hem diferansiyel denklemi hem de sınır şartlarını sağlaması için F gerilme fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$F = \frac{d}{6}xy^3 + \frac{e}{12}y^4 + \frac{a}{2}y^2 + \frac{r}{6}y^3 + \frac{k}{2}xy^2 + bxy \quad (4.57)$$

Bu durumda gerilme bileşenleri;

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = dxy + md y^2 + ry + kx + a \quad (4.58)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0$$

$$\tau_{xy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\frac{d}{2}y^2 - ky - b$$

şeklindedir. Burada $e=md$ 'dir. Sınır şartları yardımıyla bilinmeyen parametreler aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$k = \frac{d(h_1 - c)}{2}, \quad b = \frac{dh_1c}{2}, \quad d = -\frac{12P}{t(h_1 + c)^3}$$

$$r = \frac{4cX_1}{(c + h_1)^2} - dx - \frac{2md}{3}(c - 2h_1)$$

$$a = \frac{X_1(c - h_1)^2}{(c + h_1)^2} + \frac{mdh_1(h_1 - 2c)}{3} - \frac{d(h_1 - c)}{2}x$$

Bölüm 2 : Plastik bölgenin en üst ve en alt yüzeylerde başladığı durumda sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
 y = -h_1 \quad \text{için} \quad \tau_{xy} &= 0 \\
 y = h_2 \quad \text{için} \quad \tau_{xy} &= 0 \\
 \int_{-h_1}^{h_2} \tau_{xy} t dy &= -P \\
 y = -h_1 \quad \text{için} \quad \sigma_x &= X_1 \\
 y = h_2 \quad \text{için} \quad \sigma_x &= -X_1
 \end{aligned} \tag{4.59}$$

Kirişin enine kesiti boyunca σ_x gerilme bileşeni sıfırdır.

$$X_1(c - h_1)t - X_1(c - h_2)t + \int_{-h_1}^{h_2} \sigma_x t dy = 0 \tag{4.60}$$

σ_x gerilme bileşeninin momenti Px 'e eşittir.

$$\int_{-h_1}^{h_2} \sigma_x t dy = X_1 t(c - h_2) - X t(c - h_1) \tag{4.61}$$

Hem diferansiyel denklemi hem de sınır şartlarını sağlaması için F gerilme fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$F = \frac{d}{6} xy^3 + \frac{e}{12} y^4 + \frac{a}{12} y^2 + \frac{r}{6} t^3 + \frac{k}{2} xy^2 + bxy \tag{4.62}$$

Bu durumda gerilme bileşenleri:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = dxy + mdy^2 + ry + kx + a \\
 \sigma_y &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0 \\
 \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\frac{d}{2} y^2 - ky - b
 \end{aligned} \tag{4.63}$$

şeklindedir.

Burada $e=md$ 'dir. Sınır şartları yardımıyla bilinmeyen parametreler aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$$k = \frac{d(h_1 - h_2)}{2}, \quad b = \frac{dh_1h_2}{2}, \quad d = -\frac{12P}{t(h_1 + h_2)^3}$$

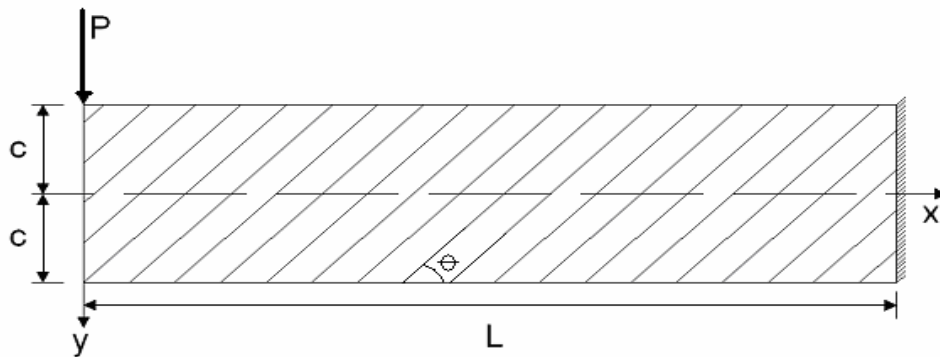
$$r = \frac{2X_1}{(h_1 + h_2)} - dx - md(h_1 - h_2)$$

(4.64)

$$a = \frac{X_1(h_1 - h_2)}{(h_1 + h_2)} + mdh_1h_2 - \frac{d(h_1 - h_2)}{2}x$$

$$h_1 = \frac{\frac{Pm}{3t} + \sqrt{\frac{P^2m^2}{3t^2} + \frac{c^2X_1^2}{3} - \frac{PxX_1}{3t}}}{\frac{X_1}{3}}$$

Çelik tellerle takviye edilen alüminyum matriksli kompozit malzemeye MATLAB programında, tek ucundan sabitlenen 40 x 6,4 mm kesitindeki kompozit kirişe, serbest ucundan $P=750$ N tekil yükü uygulandı ve akma, çökme değerleri tespit edilerek plastik bölgedeki elastik, plastik ve artık gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu işlem 0° 'den başlanıp 15° artırılarak fiber takviyeler dik konuma gelene kadar hesaplanıp tablolar ve grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 4.7 P yüküne maruz takviyeli kiriş

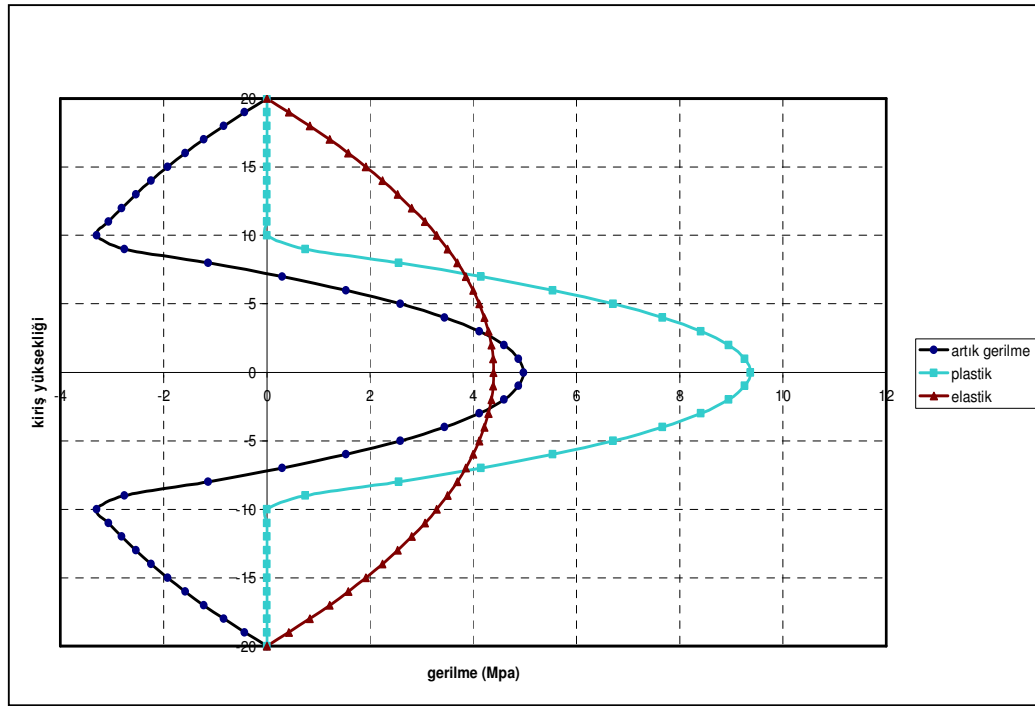
5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kullanılan çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriksli kompozit reçine kullanılarak elde edilmiştir. Matriks ve fiber arasında bağ oluşturmak amacıyla epoksi reçine kullanılmıştır. Çelik teller tek yönlü olarak yönlendirilmiştir. Alüminyum levhaya reçine sürülmüş, çelik teller yerleştirilmiş tekrar reçine sürülmüş ve elde edilen yapı reçinenin sertleşmesi için 80°C'de 1 saat süre ile pişirilmiştir.

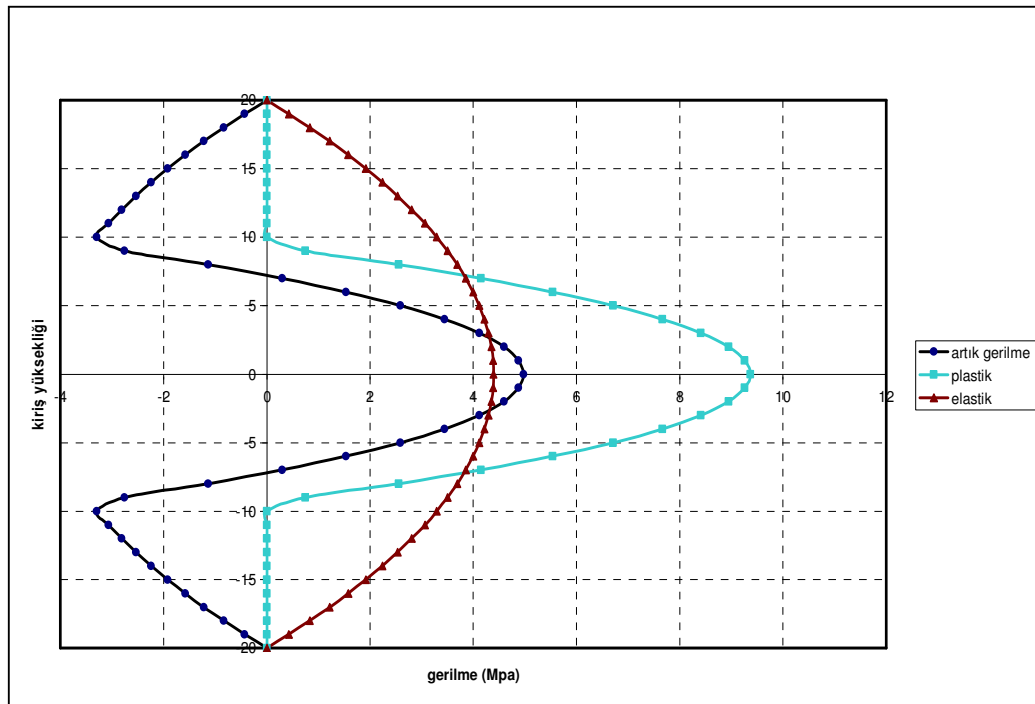
Elde edilen kompozit yapının mekanik özellikleri Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine laboratuvarında bulunan çekme cihazında yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir.

Bu deneysel çalışmada, birer örnek olarak alınan alüminyum matriks ve çelik tel takviye elamanı değiştirilerek, kullanılacak malzemelere ait mekanik özelliklere göre kompozit ankastre kirişte, farklı takviye açılarında oluşacak gerilme değerleri elde edilebilir.

Matlab bilgisayar programında serbest ucundan $P = 750$ N yüküne maruz tek yönlü takviyeli ankastre kompozit kiriş için analitik olarak elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Sonuçta elde edilen değerler çizelge 5.1. ve Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Çizelgelerdeki akma ve çökme arasındaki kiriş mesafelerindeki normal gerilme ve kayma gerilme grafiklerinin tamamı eklerde verilmiş olup, aşağıda şekil 5.1. 'de ise 0^0 takviye açısında ve 427 mm uzunluğundaki bir ankastre kompozit kiriş için normal gerilme grafiği ve Şekil 5.2' de ise kayma gerilme grafiği görülmektedir. Oluşan artık gerilmeler elastik ve plastik gerilmelerin arasındaki farklardır. Şekil 5.1'den görüldüğü gibi σ_x artık gerilme bileşeninin üst ve alt yüzeylerde maksimumdur. Şekil 5.2'den görüldüğü gibi kayma gerilmesinin artık gerilme bileşeni $y=0$ değerinde maksimumdur.



Şekil 5.1. $\theta=0^\circ$ ve $x=427$ mm'deki normal gerilmeler



Şekil 5.2. $\theta=0^\circ$ ve $x=427$ mm'deki kayma gerilmeleri

Çizelge 5.1. Kompozit yapıda Bölüm 2 için elde edilen değerler

				Oryantasyon Açıları						
				0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
En üst yüzeyde (mm)				307,200	259,109	204,202	182,725	188,950	216,037	236,658
En alt yüzeyde (mm)				307,200	259,425	205,818	186,120	192,975	218,718	236,658
Plastik çökme (mm)				460,793	388,896	307,516	276,651	286,469	326,072	354,980
				ÜST YÜZEY			ALT YÜZEY			
	X (mm)	H1(mm)	h2 (mm)	σ _{elastik}	σ _{plastik}	σ _{artık}	σ _{elastik}	σ _{plastik}	σ _{artık}	
0°	307,20	20,000	20,000	135,000	135,000	0,000	-135,000	-135,000	0,000	
	322,00	19,012	19,012	141,503	135,000	-6,503	-141,503	-135,000	6,503	
	337,00	17,955	17,955	148,095	135,000	-13,095	-148,095	-135,000	13,095	
	352,00	16,832	16,832	154,687	135,000	-19,687	-154,687	-135,000	19,687	
	367,00	15,629	15,629	161,279	135,000	-26,279	-161,279	-135,000	26,279	
	382,00	14,325	14,325	167,871	135,000	-32,871	-167,871	-135,000	32,871	
	397,00	12,889	12,889	174,462	135,000	-39,462	-174,462	-135,000	39,462	
15°	259,43	20,000	20,000	113,936	113,936	0,000	-113,797	-113,936	-0,139	
	274,00	18,817	18,841	120,479	113,936	-6,543	-120,340	-113,936	6,404	
	289,00	17,545	17,569	127,071	113,936	-13,135	-126,932	-113,936	12,996	
	304,00	16,173	16,197	133,663	113,936	-19,727	-133,524	-113,936	19,588	
	319,00	14,674	14,698	140,255	113,936	-26,319	-140,116	-113,936	26,180	
	334,00	13,003	13,027	146,847	113,936	-32,911	-146,708	-113,936	32,772	
	349,00	11,084	11,108	153,438	113,936	-39,502	-153,299	-113,936	39,363	
30°	204,20	20,000	20,000	90,092	90,092	0,000	-89,382	-90,092	-0,710	
	219,00	18,506	18,664	96,595	90,092	-6,503	-95,885	-90,092	5,793	
	234,00	16,859	17,016	103,187	90,092	-13,095	-102,477	-90,092	12,385	
	249,00	15,032	15,192	109,779	90,092	-19,687	-109,068	-90,092	18,976	
	264,00	12,953	13,110	116,370	90,092	-26,278	-115,660	-90,092	25,568	
	279,00	10,470	10,678	122,962	90,092	-32,870	-122,252	-90,092	32,160	
	294,00	7,184	7,342	129,554	90,092	-39,462	-128,844	-90,092	38,752	

Çizelge 5.2. (Devam) Kompozit yapıda Bölüm 2 için elde edilen değerler

				ÜST YÜZEY			ALT YÜZEY		
	X (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	σ _{elastik}	σ _{plastik}	σ _{artık}	σ _{elastik}	σ _{plastik}	σ _{artık}
45°	186,73	20,000	20,000	81,045	81,045	0,000	-79,553	-81,045	-1,492
	201,00	17,932	18,300	89,075	81,045	-8,030	-87,584	-81,045	6,539
	216,00	16,037	16,405	95,668	81,045	-14,623	-94,176	-81,045	13,131
	231,00	13,889	14,257	102,259	81,045	-21,214	-100,767	-81,045	19,722
	246,00	11,348	11,716	108,851	81,045	-27,806	-107,359	-81,045	26,314
	261,00	8,057	8,425	115,433	81,045	-34,388	-113,951	-81,045	32,906
	276,00	1,204	1,872	122,035	81,045	-40,990	-120,543	-81,045	39,498
60°	188,95	20,000	20,000	83,919	83,919	0,000	-82,150	-83,919	-1,769
	203,00	18,489	18,911	90,093	83,919	-6,174	-88,324	-83,919	4,405
	218,00	16,726	17,147	96,685	83,919	-12,766	-94,917	-83,919	10,998
	233,00	14,756	15,178	103,276	83,919	-19,357	-101,508	-83,919	17,589
	248,00	12,485	12,906	109,868	83,919	-25,949	-108,100	-83,919	24,181
	263,00	9,706	10,127	116,460	83,919	-32,541	-114,692	-83,919	30,773
	278,00	5,748	6,169	123,052	83,919	-39,133	-121,283	-83,919	37,364
75°	216,04	20,000	20,000	95,527	95,527	0,000	-94,349	-95,527	-1,178
	231,00	18,582	18,829	102,103	95,527	-6,576	-100,924	-95,527	5,397
	246,00	17,043	17,290	108,694	95,527	-13,167	-107,516	-95,527	11,989
	261,00	15,352	15,599	115,286	95,527	-19,759	-114,108	-95,527	18,581
	276,00	13,452	13,699	121,878	95,527	-26,351	-120,700	-95,527	25,173
	291,00	11,238	11,485	128,470	95,527	-32,943	-127,292	-95,527	31,765
	306,00	8,472	8,179	135,062	95,527	-39,535	-133,883	-95,527	38,356
90°	236,66	20,000	20,000	104,000	104,000	0,000	-104,000	-104,000	0,000
	251,00	18,749	18,749	110,302	104,000	-6,302	-110,302	-104,000	6,302
	266,00	17,344	17,344	116,895	104,000	-12,895	-116,895	-104,000	12,895
	281,00	15,815	15,815	123,486	104,000	-19,486	-123,486	-104,000	19,486
	296,00	14,120	14,120	130,078	104,000	-26,078	-130,078	-104,000	26,078
	311,00	12,194	12,194	136,667	104,000	-32,667	-136,667	-104,000	32,667
	326,00	9,899	9,899	143,262	104,000	-39,262	-143,262	-104,000	39,262

Çizelge 5.1'den görüleceği gibi 0° ve 90° oryantasyon açıları için akma en üst ve en alt yüzeylerde aynı anda başlamaktadır ve oryantasyon açıları 45°'ye kadar arttıkça plastik bölgenin daha küçük x mesafelerinde başladığı görülmüştür. Oryantasyon açıları 45°'den sonra x değerlerinde büyüme görülmektedir.

Çizelge 5.2. Kompozit yapıda Bölüm 1 için elde edilen değerler

				Oryantasyon Açıları			
				30°	45°	60°	75°
En üst yüzeyde (mm)				204,2020	182,725	188,951	216,037
Plastik çökme (mm)				307,5160	276,651	286,469	326,072
				ÜST YÜZEY			
	X (mm)	h1(mm)	h2 (mm)	$\sigma_{elastik}$	$\sigma_{plastik}$	$\sigma_{artık}$	
30°	204,20	20,0000	20,000	90,092	90,092	0,000	
	204,50	19,9713	20,000	90,223	90,092	-0,131	
	204,80	19,9180	20,000	90,352	90,092	-0,260	
	205,10	19,9120	20,000	90,487	90,092	-0,395	
	205,40	19,8830	20,000	90,618	90,092	-0,526	
45°	182,73	20,000	20,000	81,045	81,045	0,000	
	183,00	19,9700	20,000	81,165	81,045	-0,120	
	184,00	19,8620	20,000	81,605	81,045	-0,560	
	185,00	19,7540	20,000	82,044	81,045	-0,999	
	186,00	19,6160	20,000	82,484	81,045	-1,439	
60°	188,95	20,0000	20,000	83,900	83,900	0,000	
	189,00	19,9949	20,000	83,940	83,900	-0,040	
	190,00	19,8907	20,000	84,380	83,900	-0,480	
	191,00	19,7865	20,000	84,819	83,900	-0,919	
	192,00	19,6823	20,000	85,259	83,900	-1,359	
75°	216,04	20,0000	20,000	95,527	95,527	0,000	
	217,00	19,9117	20,000	95,950	95,527	-0,423	
	217,50	19,8650	20,000	96,170	95,527	-0,643	
	218,00	19,8194	20,000	96,389	95,527	-0,862	
	218,50	19,7741	20,000	96,609	95,527	-1,082	

Bu çalışmada, şu sonuçlar elde edilmiştir;

- 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° oryantasyon açılarında akma en üst yüzeyde başlar.
- 0° ve 90° oryantasyon açıları için akma en üst ve en alt yüzeylerde aynı anda başlamaktadır.
- Oryantasyon açıları 45°'ye kadar arttıkça plastik bölgenin daha küçük x mesafelerinde başladığı görülmüştür. Oryantasyon açıları 45°'den sonra x değerlerinde büyüme görülmektedir.

- σ_x artık gerilme bileşeninin üst ve alt yüzeylerde maksimum olduğu görülmüştür.
- Oryantasyon açısı 45° 'ye kadar arttıkça kirişin uzunluğu azalmaktadır. Oryantasyon açıları 45° 'den sonra kirişin uzunluğu artmaktadır.
- Kayma gerilmesinin artık gerilme bileşeni $y=0$ değerinde maksimumdur.
- Normal gerilmeye ait artık gerilme bileşeninin değeri kayma gerilmesine ait olanından daha büyüktür.
- Kirişin dayanımı artık gerilmelerle arttırılabilir.

KAYNAKLAR

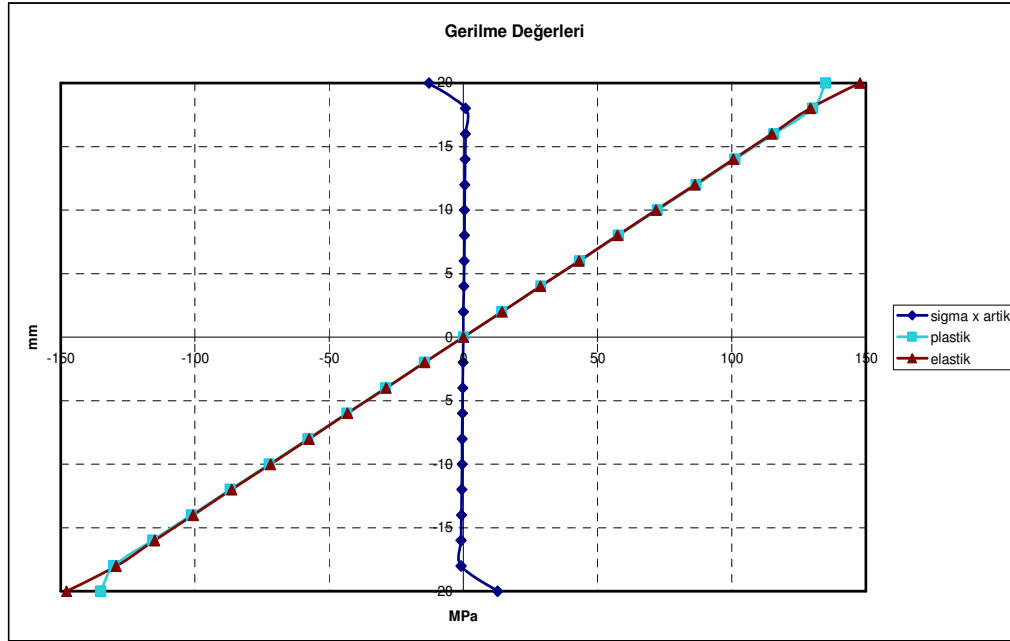
1. Agarwall, B.D., Broutman, L.J. ,“Analysis and performance of fiber composites”, **JohnWiley and Sons**, New York, 355 (1980).
2. Foltz, J.V., and Blackmon, C.M., "Metal matrix composites", **Advanced Materials & Processes**, 154 (6):19-24 (1997).
3. Mendelson, A., “Plasticity Theory and Application”, **The Macmillan Company**, New York, 349 (1968).
4. Jeronimidis, G., Parkyn, A.T., “Residual Stresses in Carbon Fibre Thermoplastic Matrix Laminates”, **Journal of Composite Materials**, 22;401-415 (1988).
5. Chou, T.W., Kelly, A., Okura, A., “Fiber-Reinforced Metal Matrix Composites”, 16(3); 187-206 (1985).
6. Sadek, E.A., Tawfik, S.A., “A finite element model for the analysis of stiffened laminated plates”, **Composites and Structures**, 75: 369-383 (2000).
7. Bektaş, N., Sayman, O.,”Elasto-Plastic Stress Analysis in Simply Supported Thermoplastic Laminated Plates under Thermal Loads”, **Composites Science and Technology**, 61: 1695-1701 (2001).
8. Shangdong, T., Daining, F., Hang, Q., “Elastic and plastic properties of metal-matrix composites: geometrical effects of particles”, **Computational Materials Science**, 6:303-309 (1996).
9. Atas, C., Sayman, O., “Elastic-plastic stress analysis and expansion of plastic zone in clamped and simply supported aluminum metal - matrix laminated plates”, **Composite Structures**, 49: 9 -19 (2000).
10. Arslan, N., Kaman, M. O., Pıhtılı, H., “Eksenel yüklü yarım daire çentikli kompozit levhalarda elasto-plastik gerilme analizi”, **Bilim Günleri**, Denizli, 66-72 (1999).
11. Aykul, H., Özcan, R., Ataş, C.,”Residual stres analysis and plastic zone behavior in antisymmetric metal- matrix laminted composite clastic”, **Int. J. Of Applied Mechanics and Engineering**, 6: 53-70 (2001).
12. Karakuzu, R., Özcan, R., “Exact Solution of Elasto-Plastic Stresses in a Metal-Matrix Composite Beam of Arbitrary Orientation Subjected to Transverse Loading”, **Composites Science and Technology**, 56:1383-1389 (1996).

13. Smith, S., Teng, J.G., "Interfacial stresses in plated beams", **Engineering Structures**, 23: 857-871 (2001).
14. Esendemir, Ü., "An elasto-Plastic stress analysis in a polymer matrix composite beam of arbitrary orientation subjected to transverse linearly distributed load, journal of reinforced plastics and composites, 21: 735-748 (2002).
15. Sayman, O., "Elasto-plastic Stress Analysis in Stainless Steel Fiber Reinforced Aluminium Metal Matrix Laminated Plates Loaded Transversely", **Composite Structures**, 43:147-154 (1998).
16. Sayman, O., Atas, C., Çallıoğlu, H., "Material nonlinear behavior of laminated metal-matrix composite plates supported at edges under uniform transverse loading", **Composites Science and Technology**, 62:1913-1923 (2002).
17. Aykul, H., Atas, C., Akbulut, H., "Elastic-plastic stress analysis and plastic zone propagation in fiber reinforced thermoplastic laminates using finite element method", **Reinforced Plastics and Composites**, 20(15):1301-1325 (2001).
18. Sayman, O., Aykul, H., "Elasto-plastic stress analysis of aluminium metal matrix laminated plates with a circular hole under transverse loading", **Reinforced Plastics and Composites**, 20 (14): 1205-1221 (2001).
19. Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", **Gazi Kitabevi**, Ankara, 327 (2000).
20. Lubin, G., "Handbook of Composites", **Van-Nontrand Reinhold Com.**, New York, 85-95 (1982).
21. Aktaş, R., Otabatmaz A.İ., "Kompozit malzemeler ve havacılık sanayiindeki uygulamaları", **TMMOB**, Ankara, 45-47(1995).
22. Durante, S., G. Rutelli, F. Rabeezzana, "Aluminum-based mmc machining with diamond-coated cutting tools", **Surface and Coating Technology**, 94-95 (1997).
23. Lavernia, E.J., Ibrahim, I. A. and Mohamed, F. A., "Particulate reinforced metal matrix composites – a review", **Journal of Materials Science**, 26; 1137-1156 (1991).
24. Kök, M., "Al₂O₃ partikül takviyeli 2024 alüminyum metal matriksli kompozitlerin üretimi", **Fen ve Mühendislik Dergisi**, Ankara , 4-2, (2001).

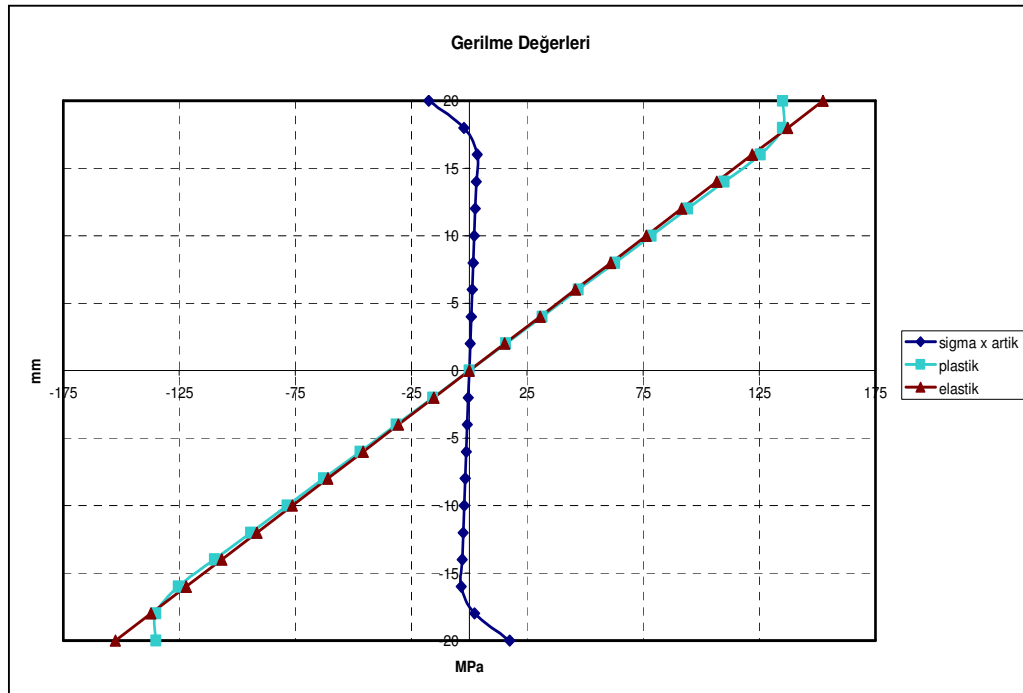
25. Daining, F., Hang, Q., Shangdong, T., "Elastic and plastic properties of metal-matrix composites: geometrical effects of particles", **Computational Materials Science**, 6:303-309, (1996).
26. Sayman, O., Aksoy, S., "Kompozit Malzemeler" **Ege Üniversitesi Matbaası**, İzmir, 108 (1982).
27. Kaw A., "Mechanics of Composite Materials", **CRC Pres Inc.**, USA, 4-17 (1997).
28. Kollar L.P., Springer G.S., "Mechanics of Composite Structures", **Cambridge University Press**, Cambridge, 1-2 (2003).
29. Öndürücü, A., "Metal matriksli kompozit plakların termal elasto-plastik gerilme analizi", Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta**, 22-26: 38-41 (2003).
30. Lekhnitskii, S.G., "Theory of elasticity of an anisotropic body, **Mir Publishers**", Moscow, 105 (1981).
31. Lekhnitskii, S.G., Tsai, S.W., Cheron, T. "Anisotropic plates, **Gordon and Breach Science Publishers**, New York, 75 (1968).
32. Jones, R. M., "Mechanics of composite materials", **Taylorandfrancis**, Philadelphia, 55-61 (1999).

EKLER

EK-1 Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

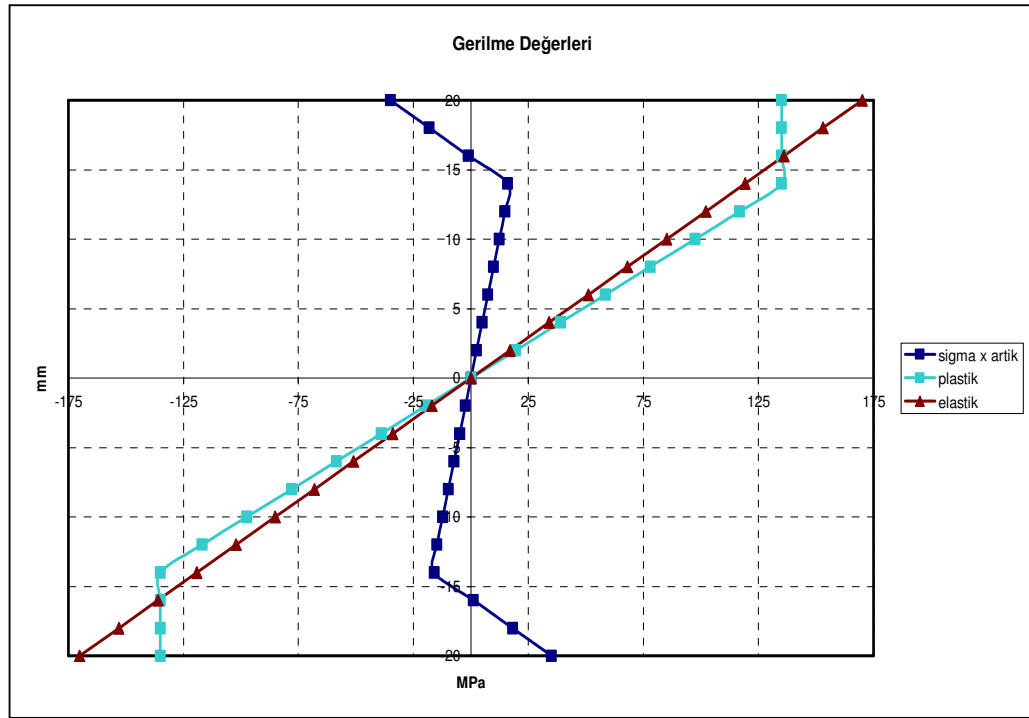


Şekil 1.1. $\theta=0^\circ$ ve $x=327$ mm deki normal gerilmeler

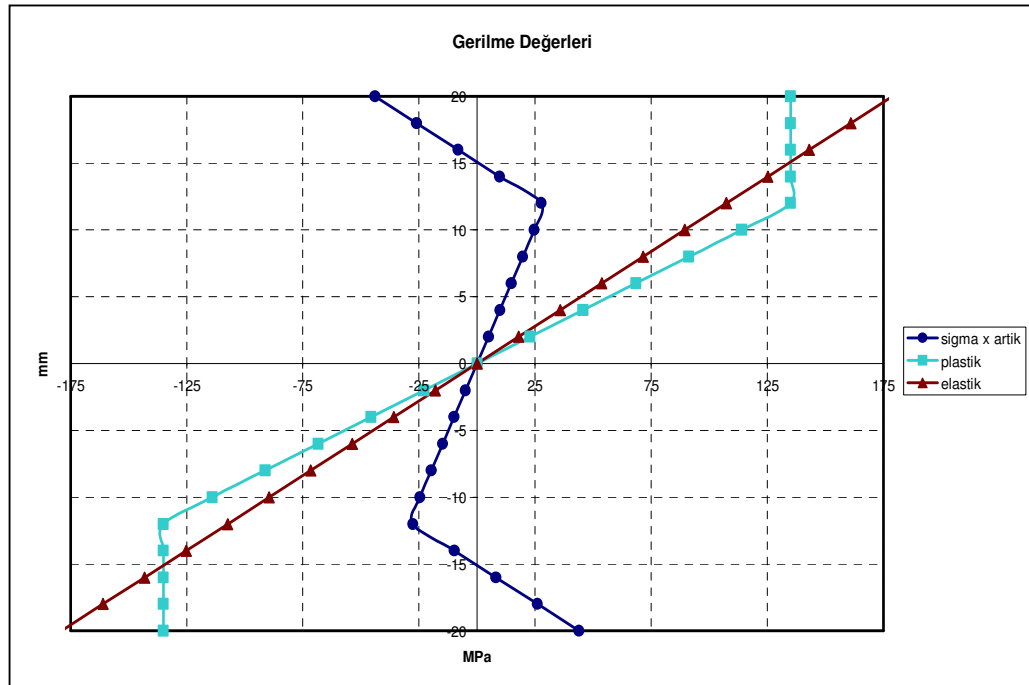


Şekil 1. 2. $\theta=0^\circ$ ve $x=347$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

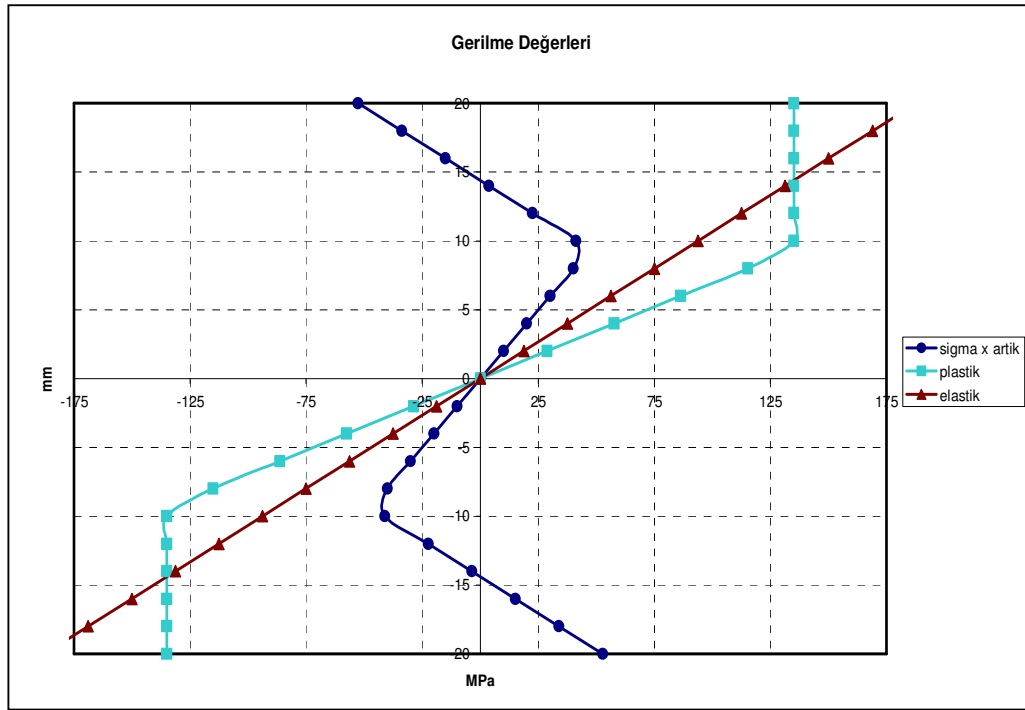


Şekil 1. 4. $\theta=0^\circ$ ve $x=387$ mm deki normal gerilmeler

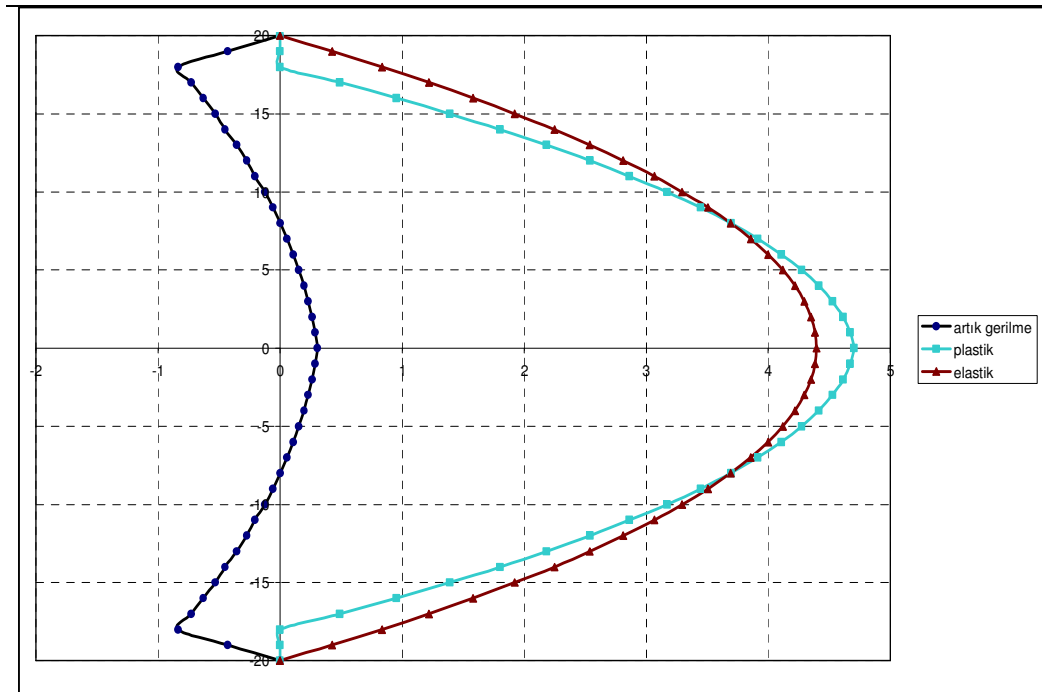


Şekil 1. 5. $\theta=0^\circ$ ve $x=407$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

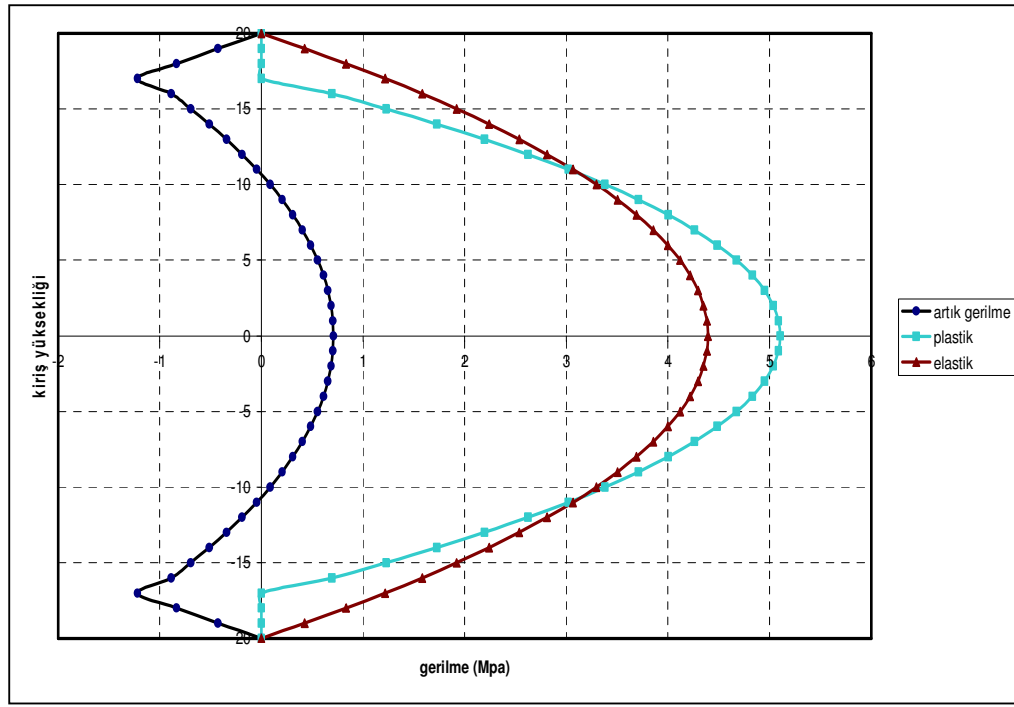


Şekil 1. 6. $\theta=0^\circ$ ve $x=427$ mm deki normal gerilmeler

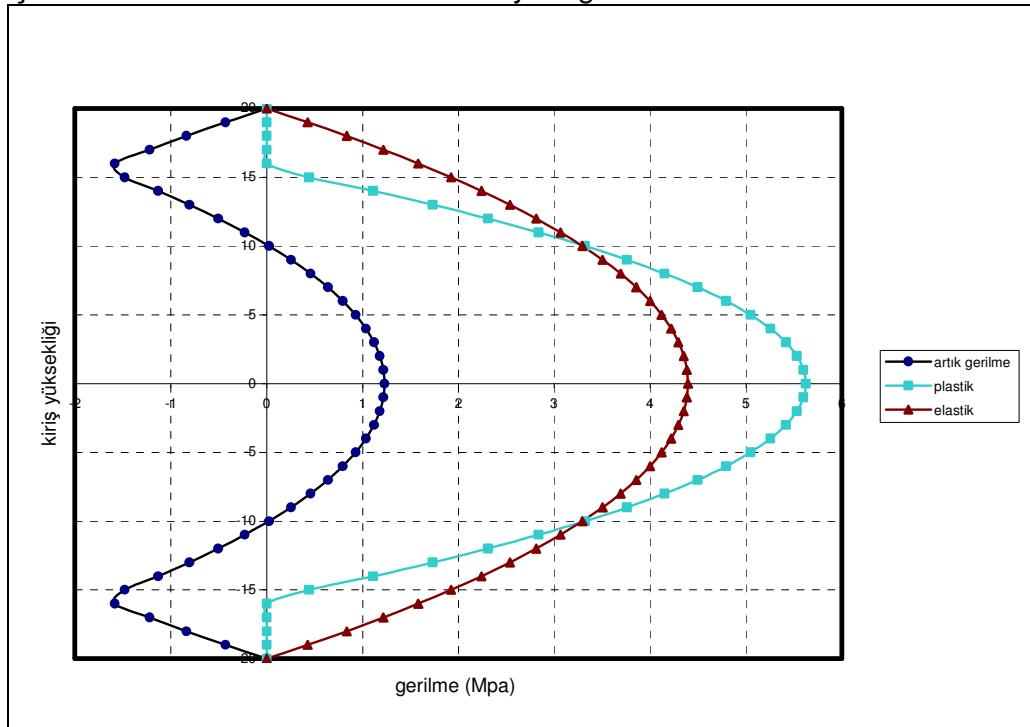


Şekil 1. 7. $\theta=0^\circ$ ve $x=327$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

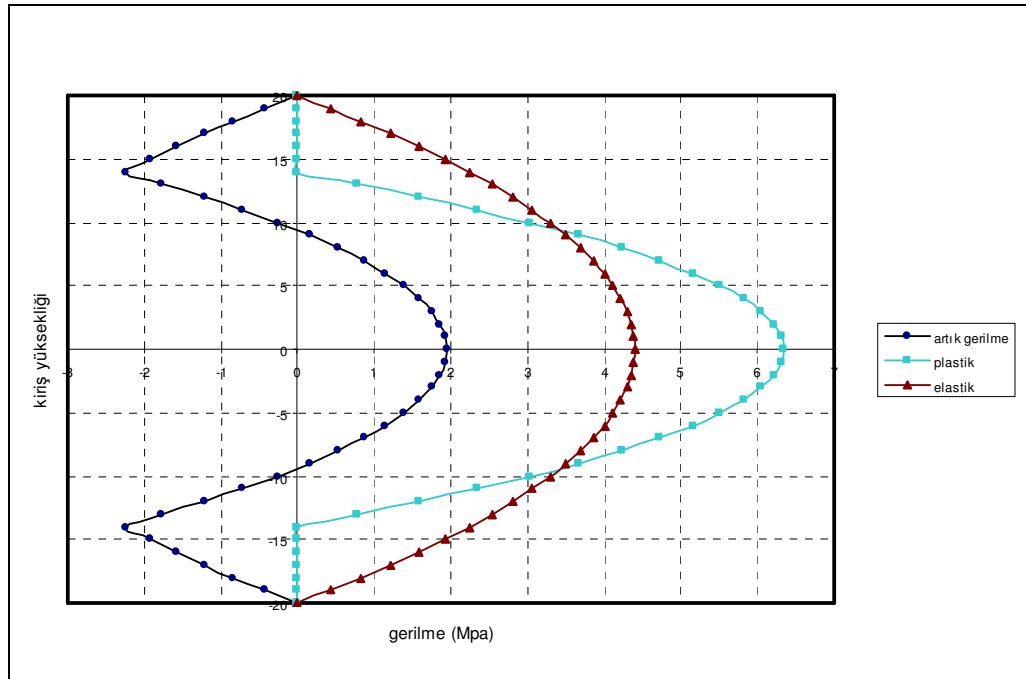


Şekil 1. 8. $\theta=0^\circ$ ve $x=347$ mm deki kayma gerilmeleri

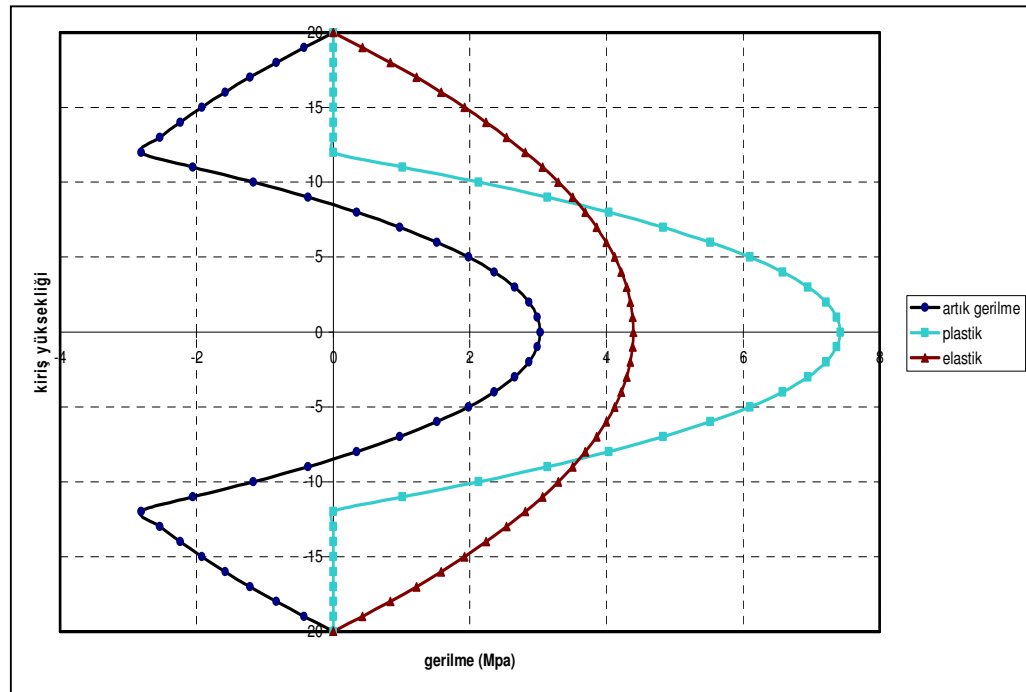


Şekil 1. 9. $\theta=0^\circ$ ve $x=367$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

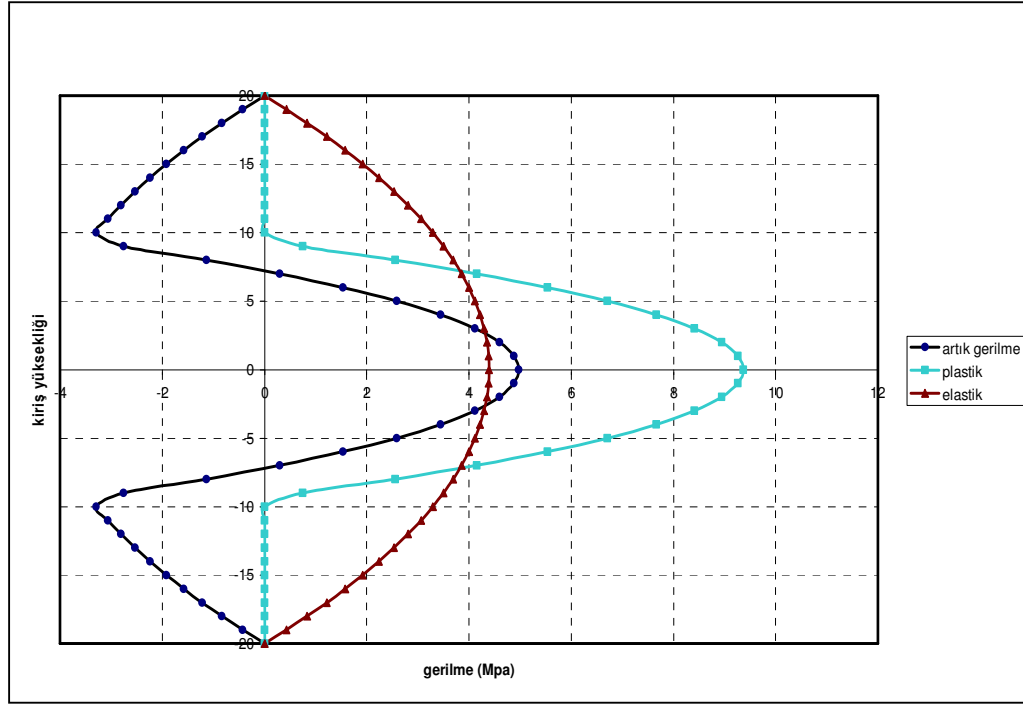


Şekil 1. 10. $\theta=0^\circ$ ve $x=387$ mm deki kayma gerilmeleri

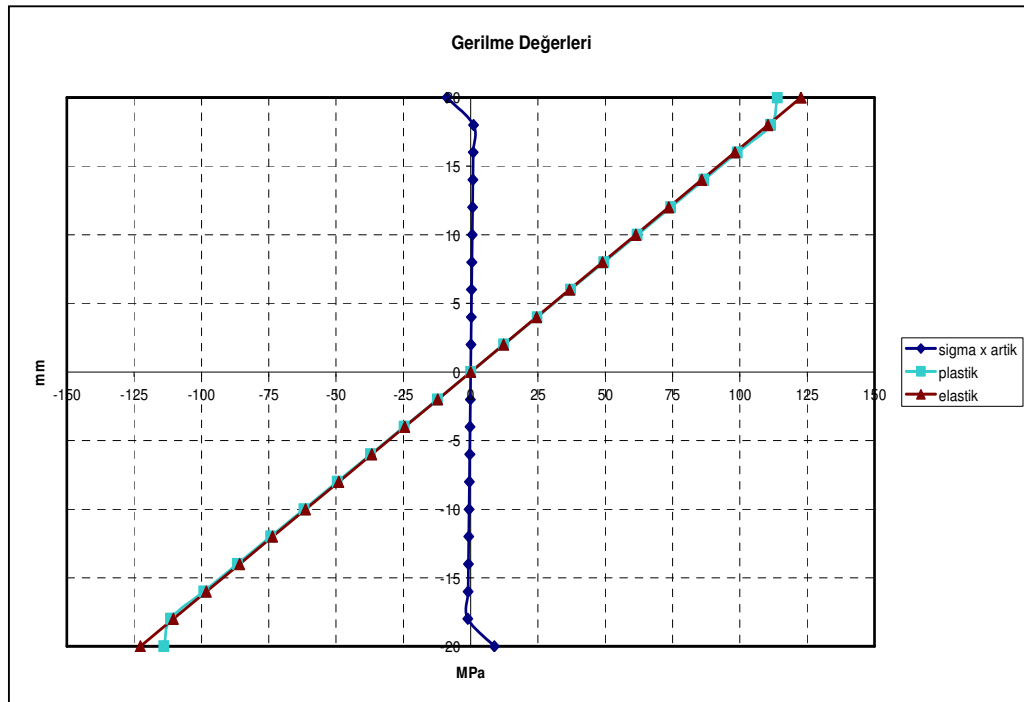


Şekil 1. 11. $\theta=0^\circ$ ve $x=407$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

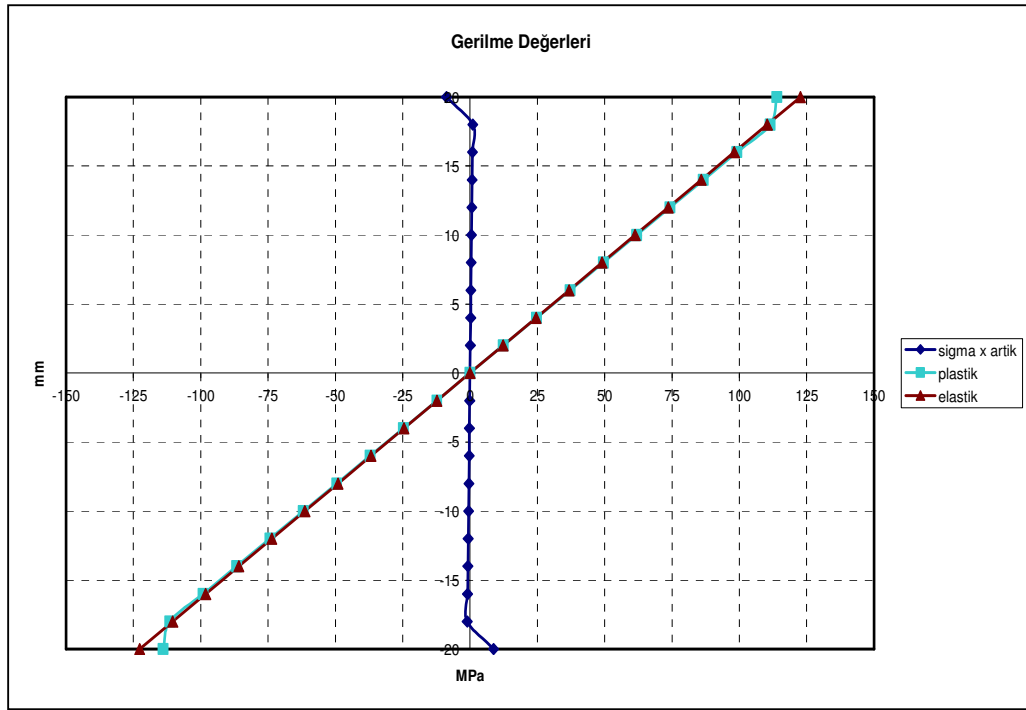


Şekil 1. 12. $\theta=0^\circ$ ve $x=427$ mm deki kayma gerilmeleri

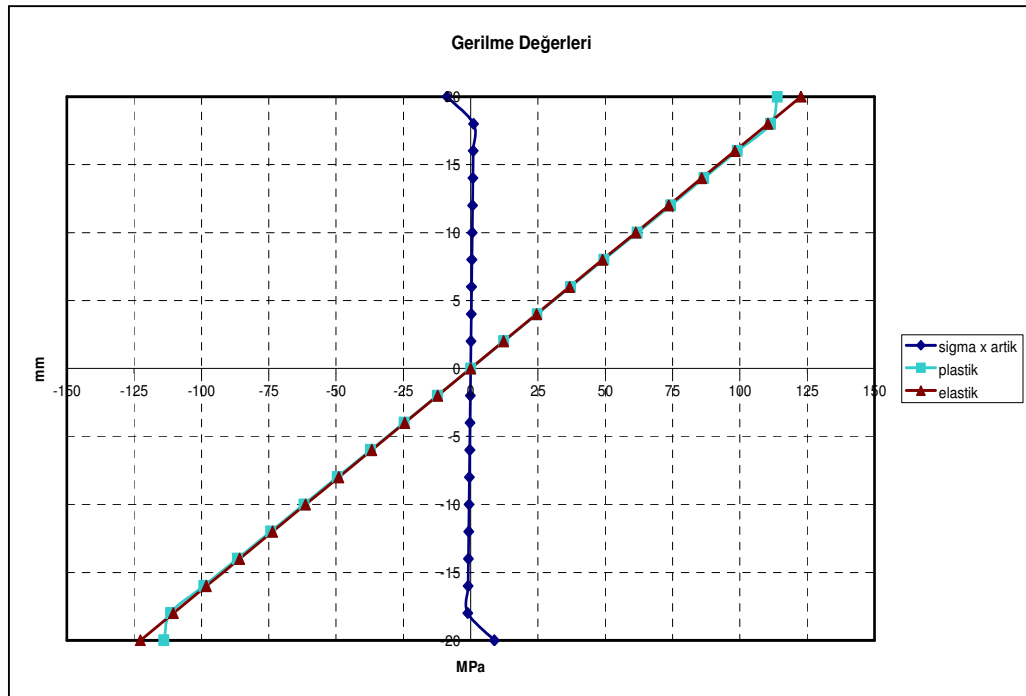


Şekil 1. 13. $\theta=15^\circ$ ve $x=279$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

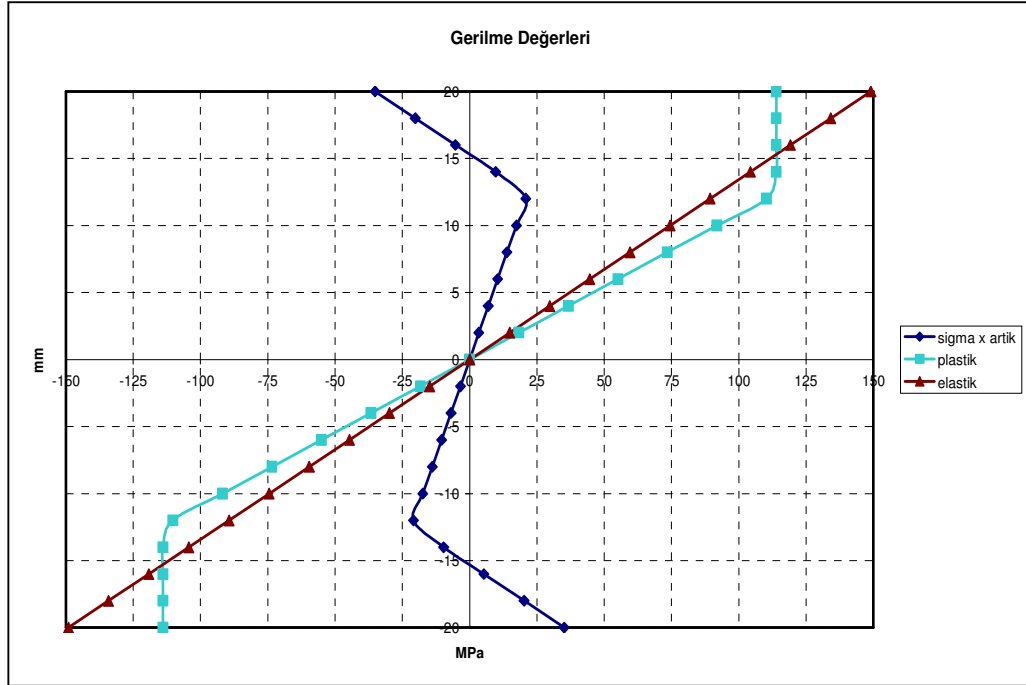


Şekil 1. 14. $\theta=15^\circ$ ve $x=299$ mm deki normal gerilmeler

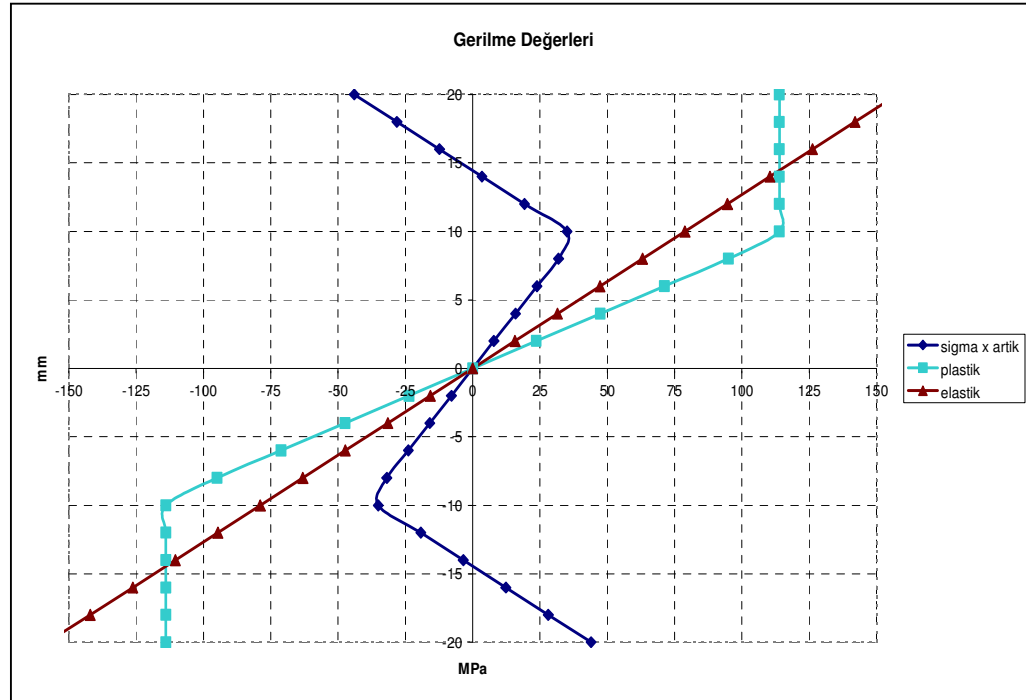


Şekil 1. 15. $\theta=15^\circ$ ve $x=319$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

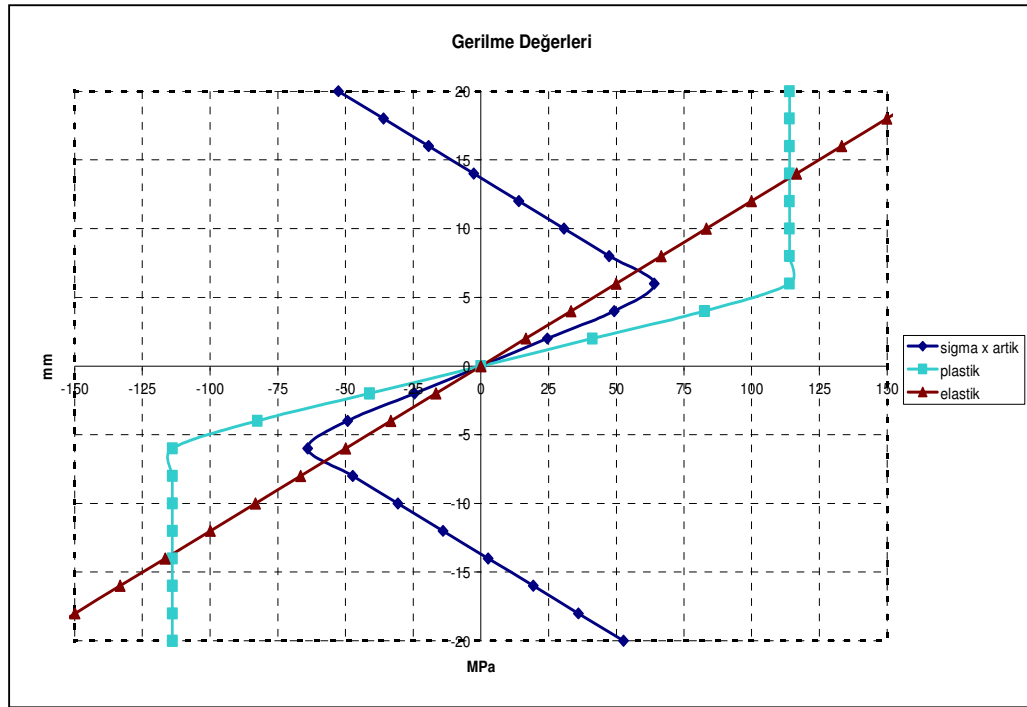


Şekil 1. 16. $\theta=15^\circ$ ve $x=339$ mm deki normal gerilmeler

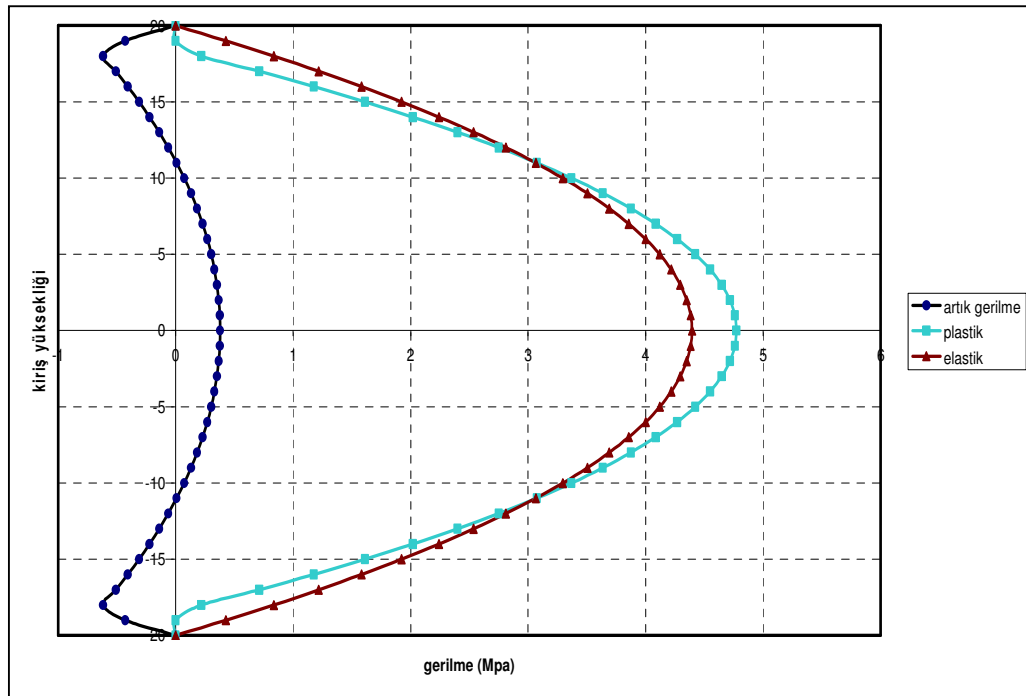


Şekil 1. 17. $\theta=15^\circ$ ve $x=359$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

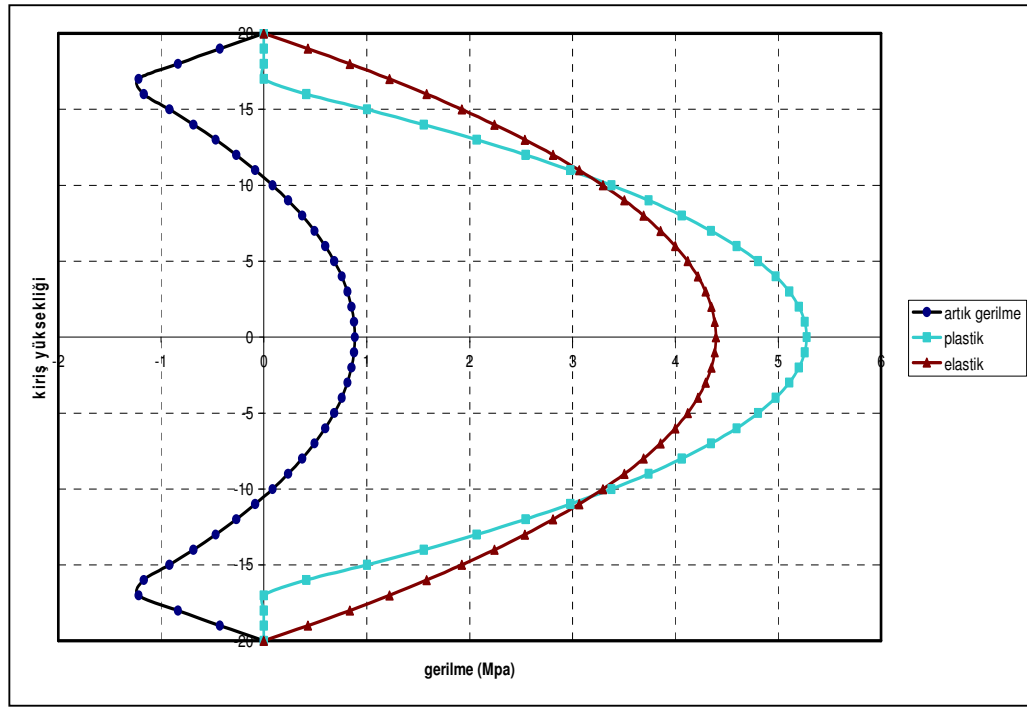
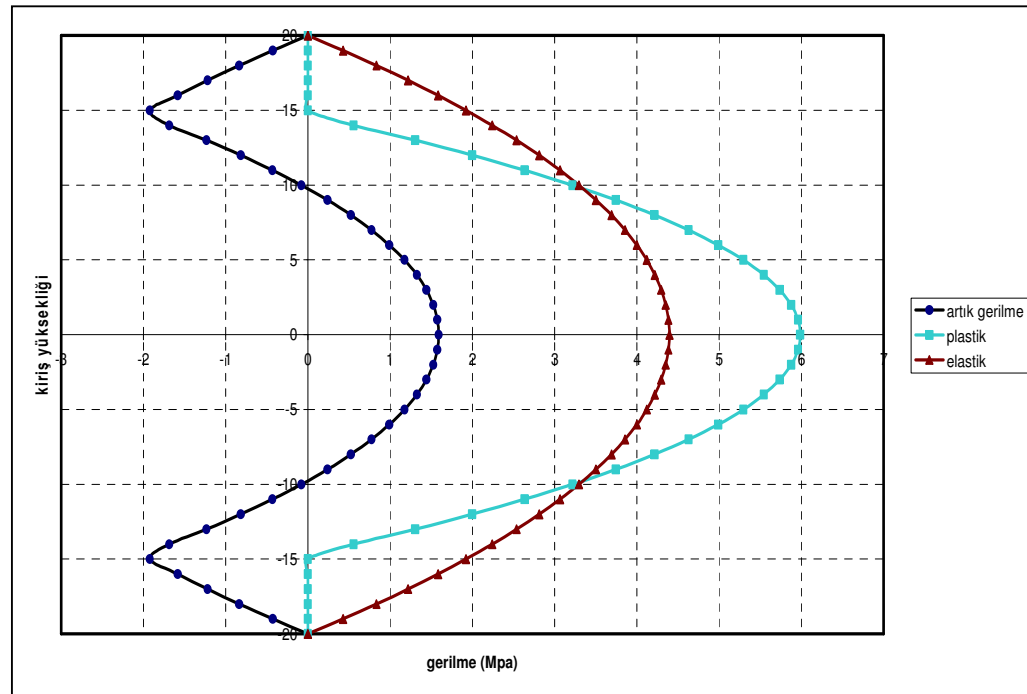


Şekil 1. 18. $\theta=15^\circ$ ve $x=379$ mm deki normal gerilmeler

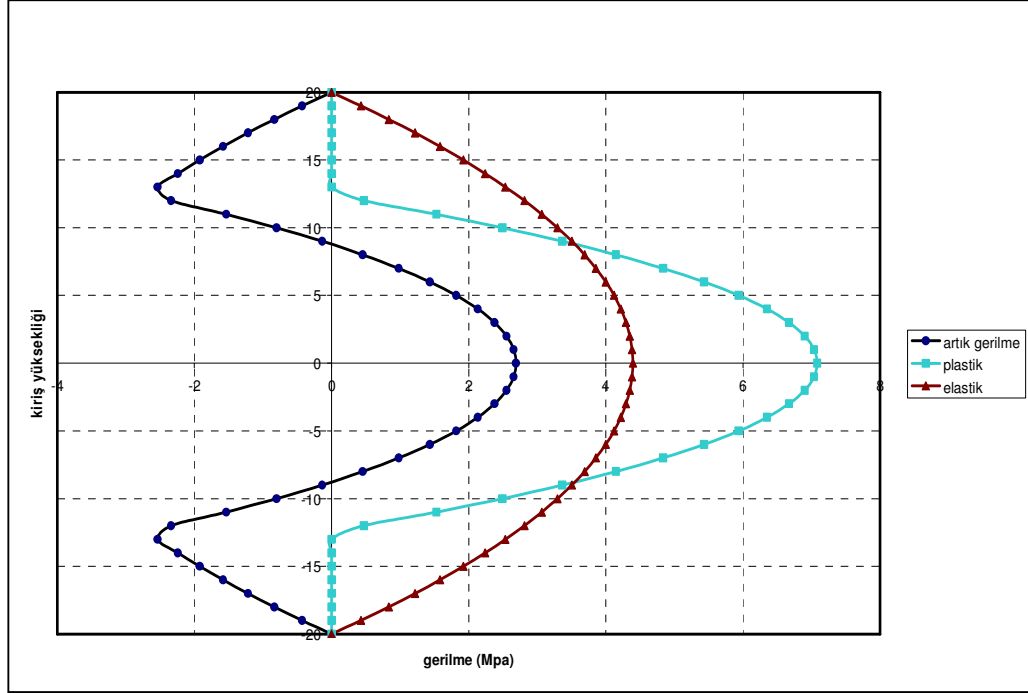


Şekil 1. 19 . $\theta=15^\circ$ ve $x=279$ mm deki kayma gerilmeler

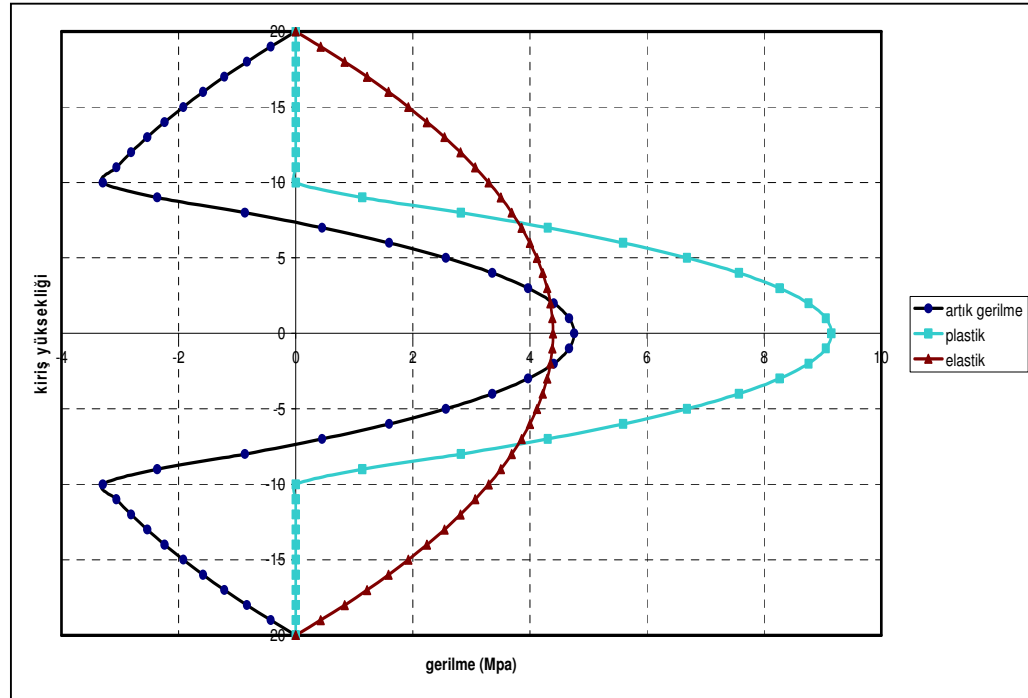
EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 20 . $\theta=15^\circ$ ve $x=299$ mm deki kayma gerilmelerŞekil 1. 21. $\theta=15^\circ$ ve $x=319$ mm deki kayma gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

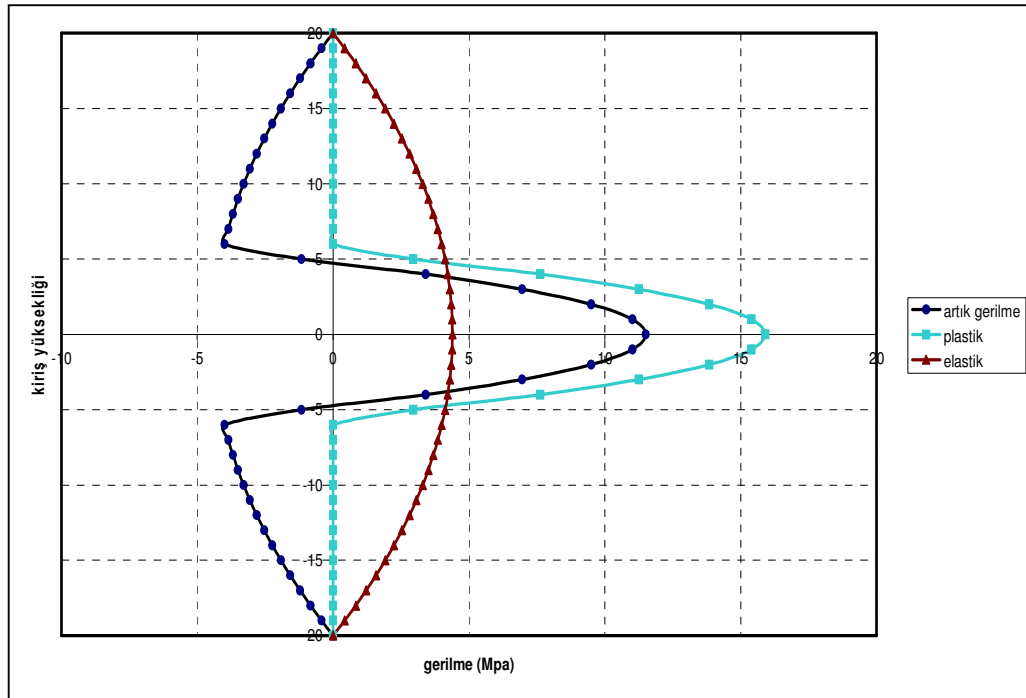


Şekil 1. 22. $\theta=15^\circ$ ve $x=339$ mm deki kayma gerilmeler

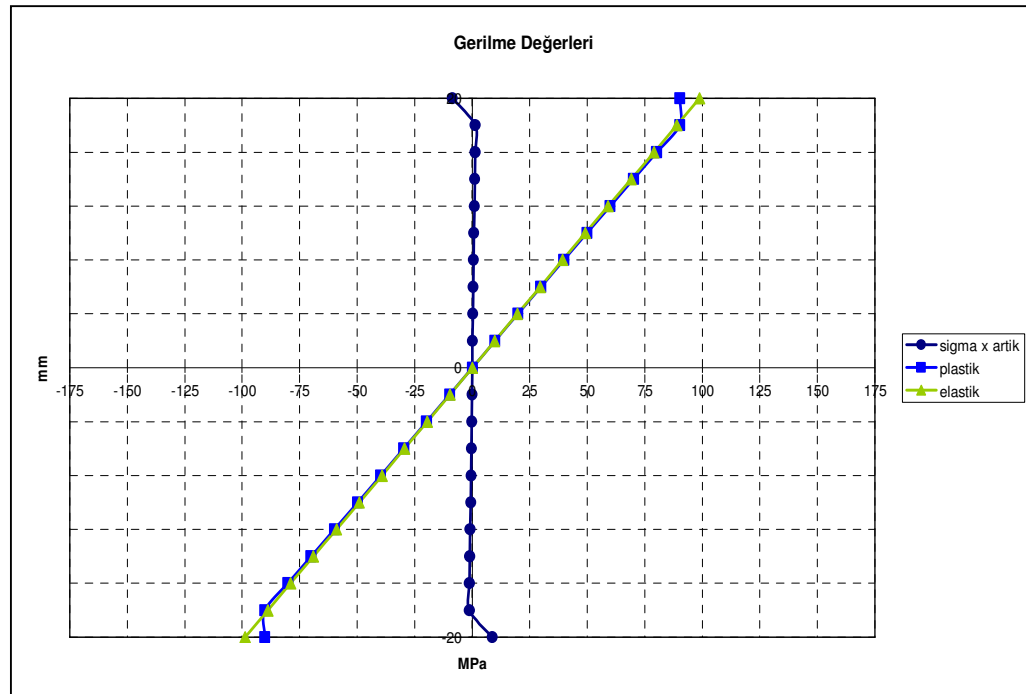


Şekil 1. 23. $\theta=15^\circ$ ve $x=359$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

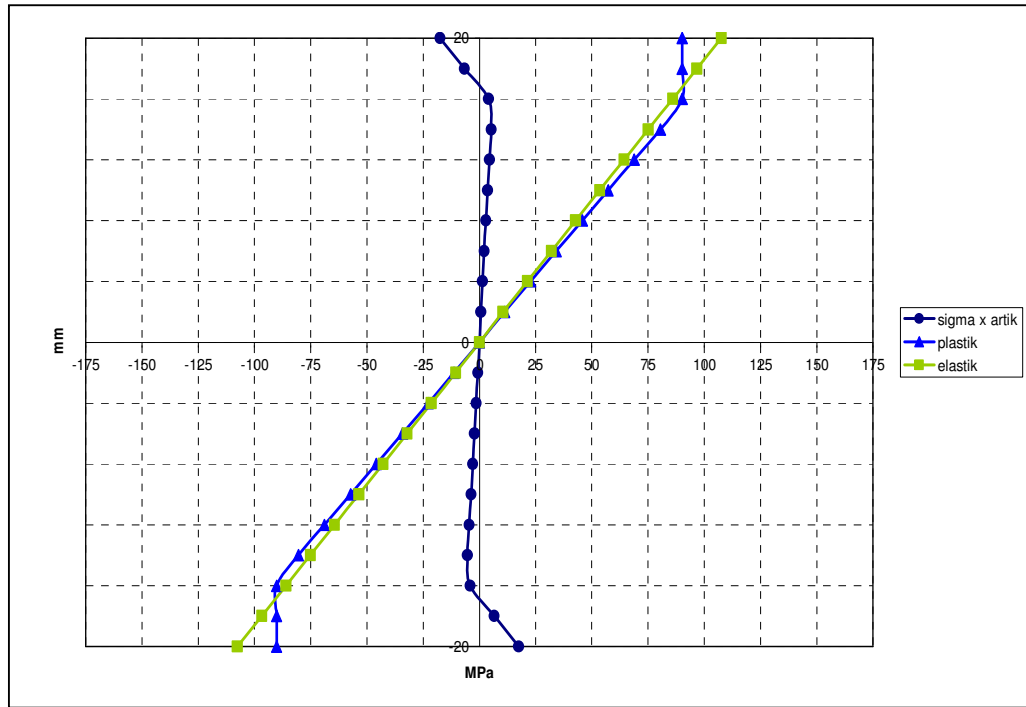


Şekil 1. 24. $\theta=15^\circ$ ve $x=379$ mm deki kayma gerilmeler

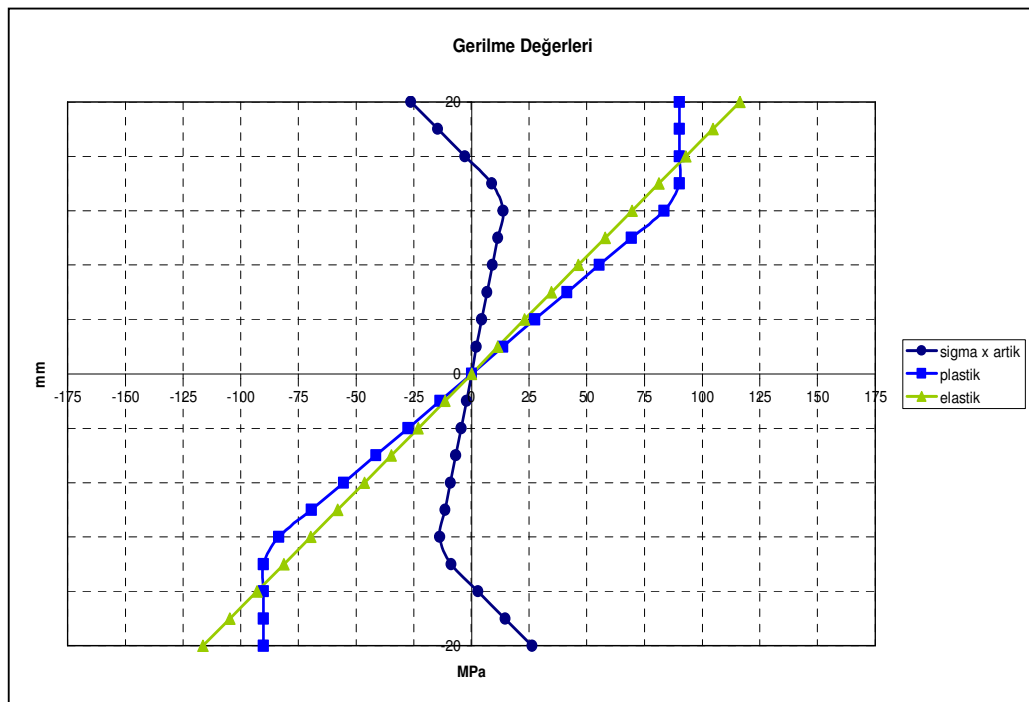


Şekil 1. 25. $\theta=30^\circ$ ve $x=224$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

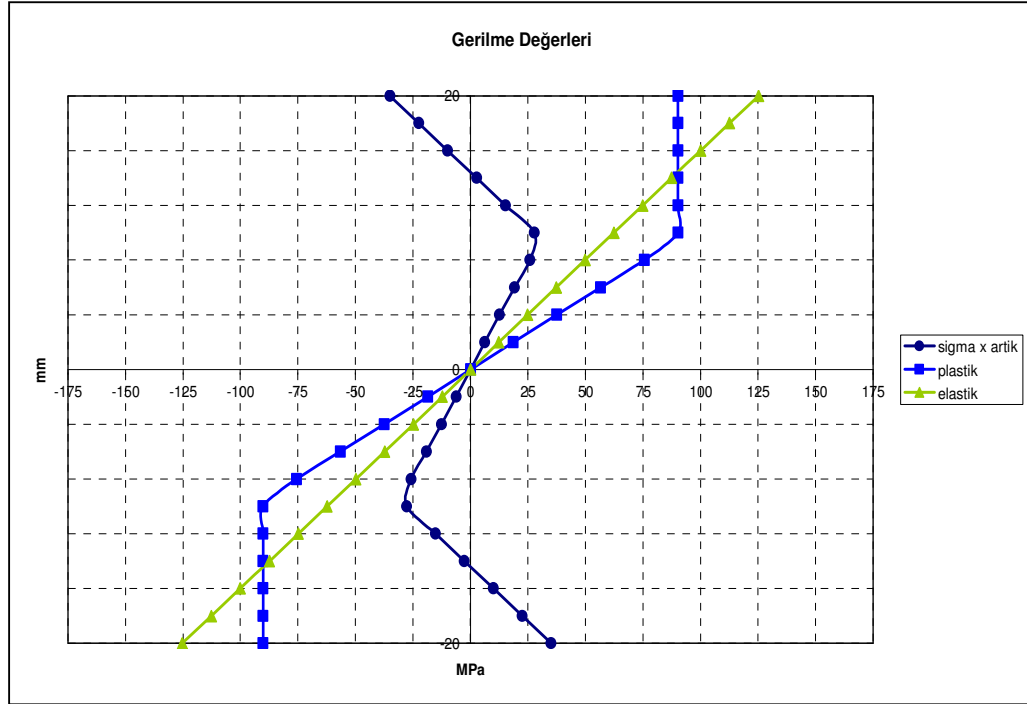


Şekil 1. 26. $\theta=30^\circ$ ve $x=244$ mm deki normal gerilmeler

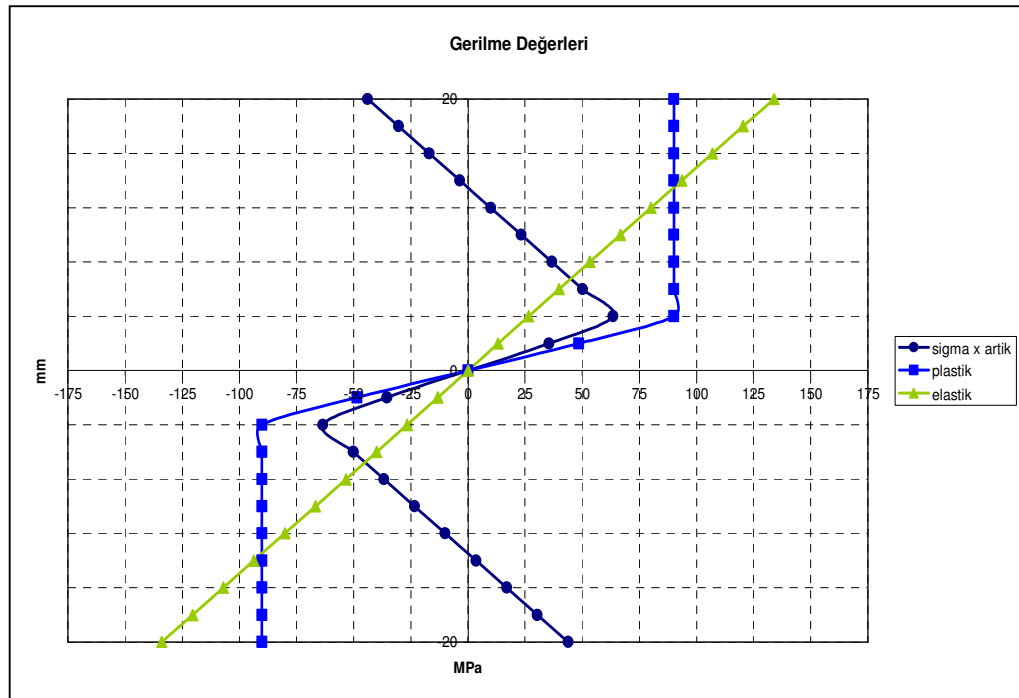


Şekil 1. 27. $\theta=30^\circ$ ve $x=264$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

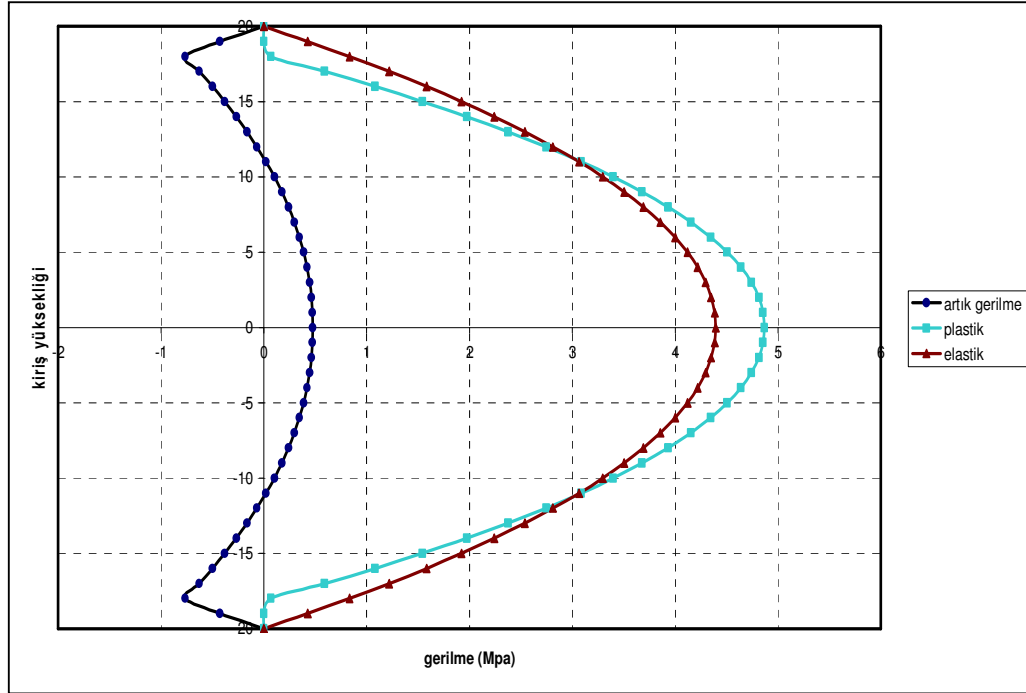


Şekil 1. 28. $\theta=30^\circ$ ve $x=284$ mm deki normal gerilmeler

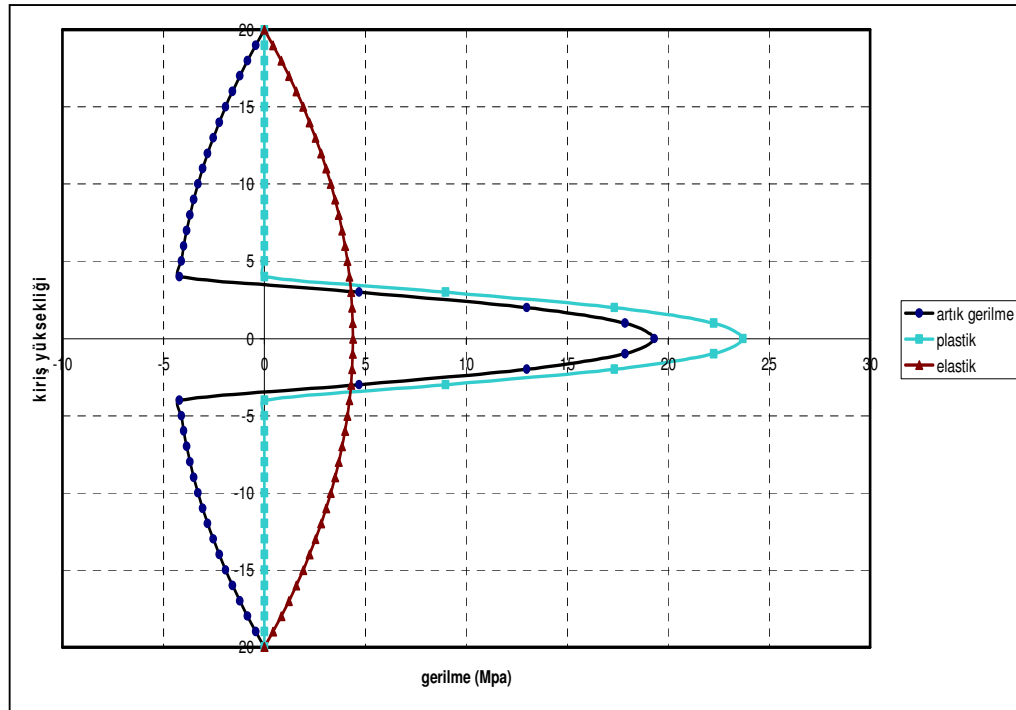


Şekil 1. 29. $\theta=30^\circ$ ve $x=304$ mm deki normal gerilmeler

EK-1(Devam)Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

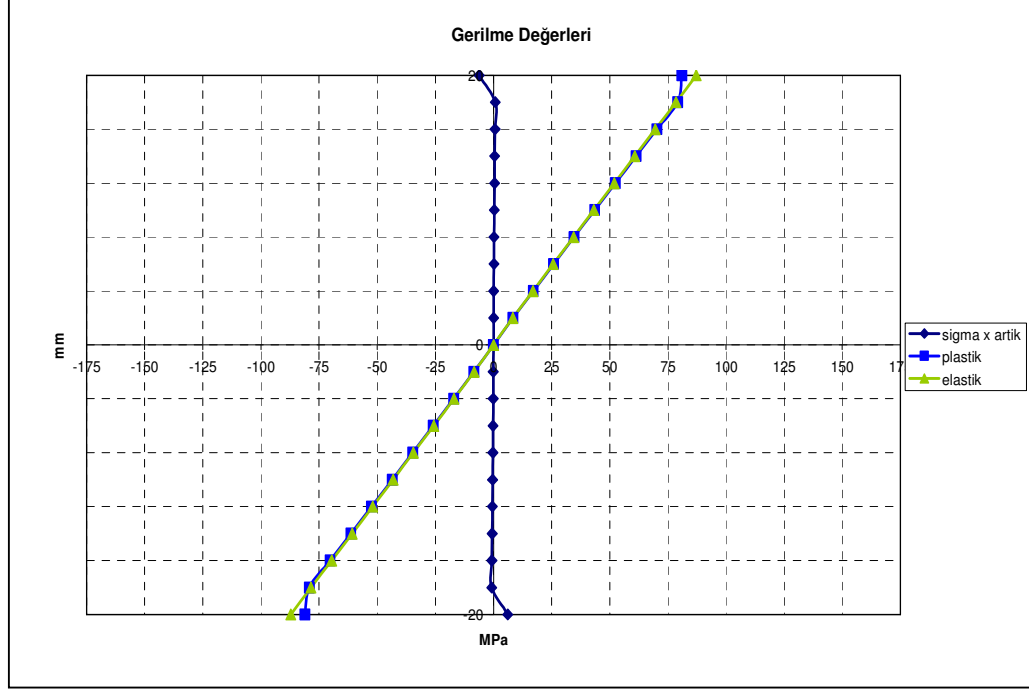


Şekil 1. 30. $\theta=30^\circ$ ve $x=224$ mm deki kayma gerilmeler

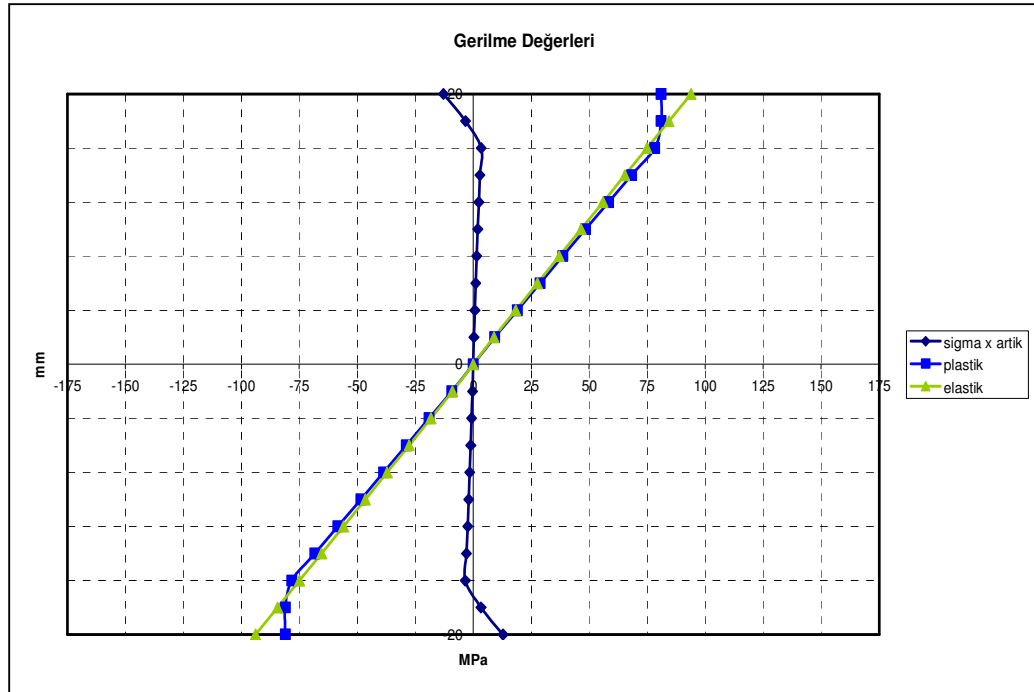


Şekil 1. 34. $\theta=30^\circ$ ve $x=304$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

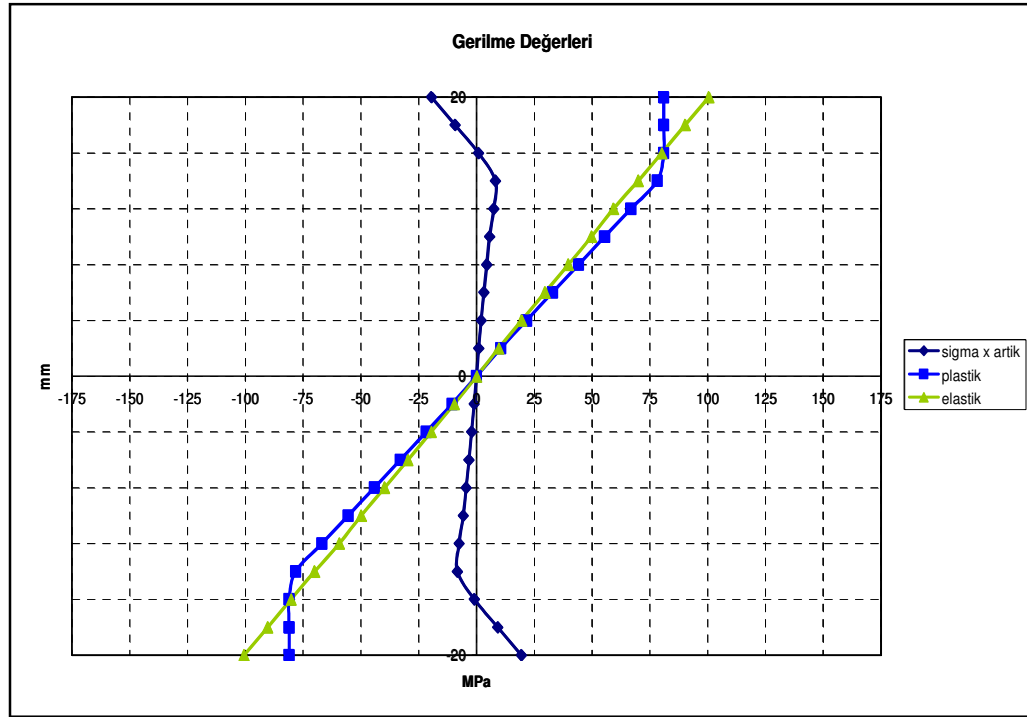


Şekil 1. 35. $\theta=45^\circ$ ve $x=197$ mm deki normal gerilmeler

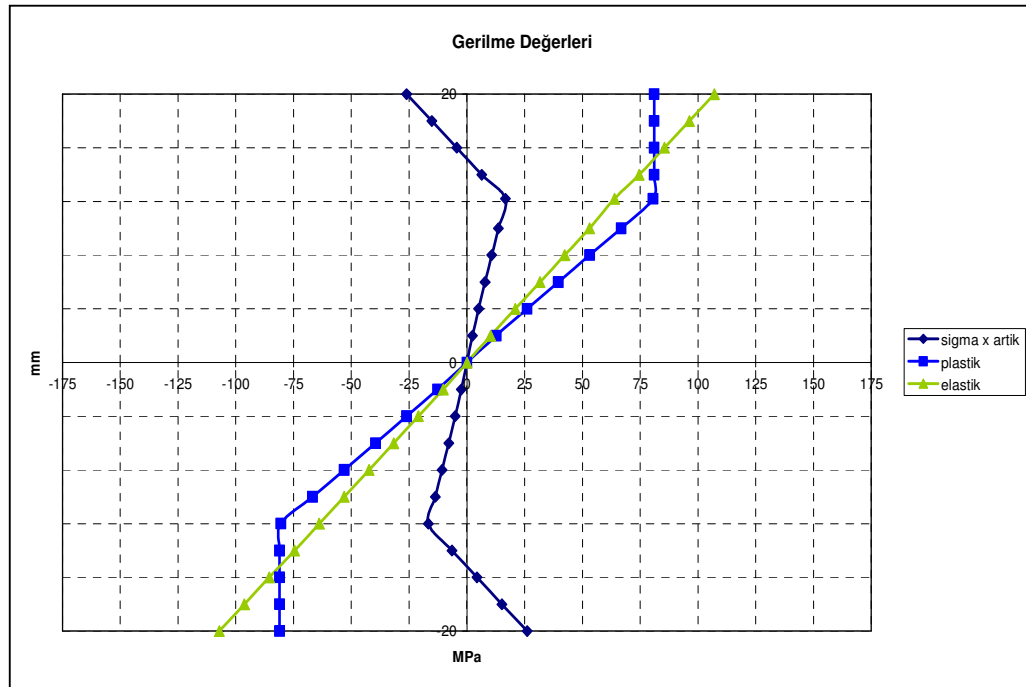


Şekil 1. 36. $\theta=45^\circ$ ve $x=212$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

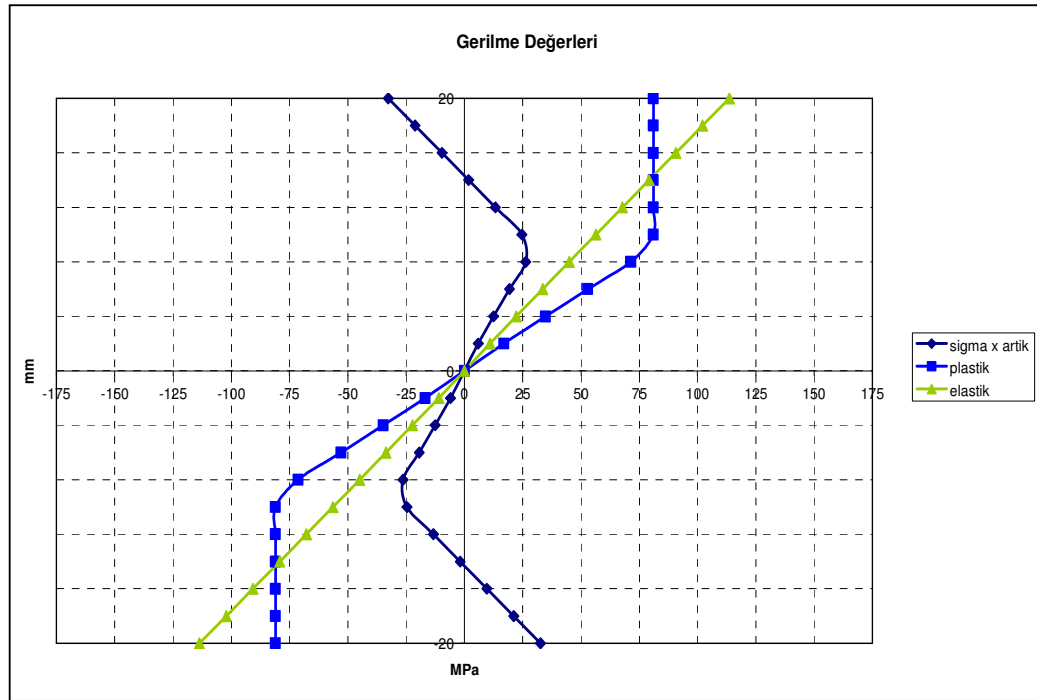


Şekil 1. 37. $\theta=45^\circ$ ve $x=227$ mm deki normal gerilmeler

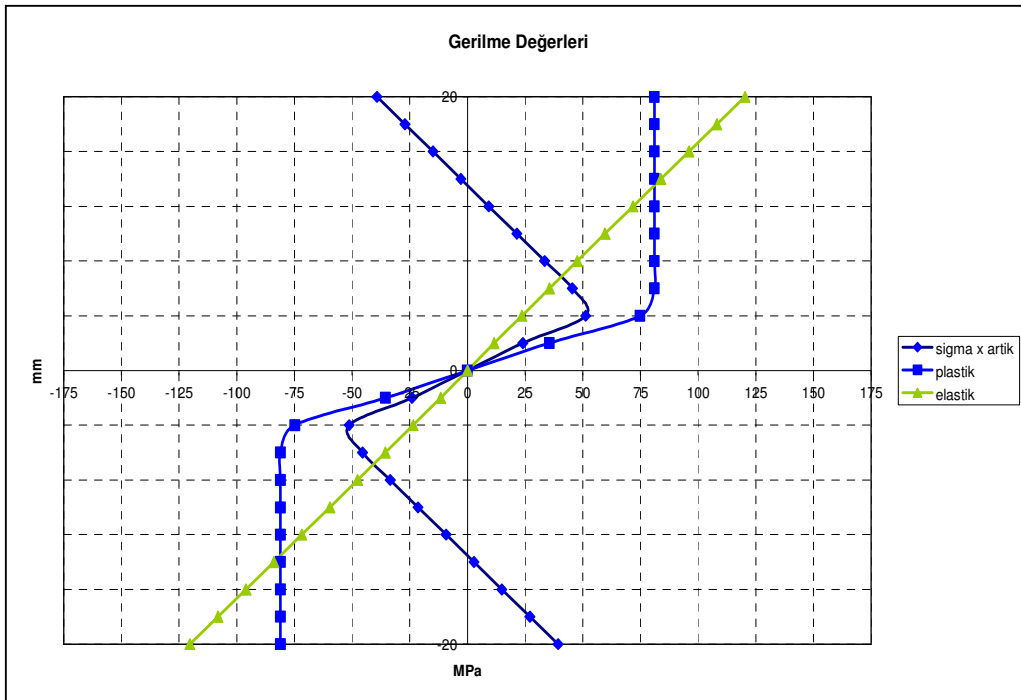


Şekil 1. 38. $\theta=45^\circ$ ve $x=242$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

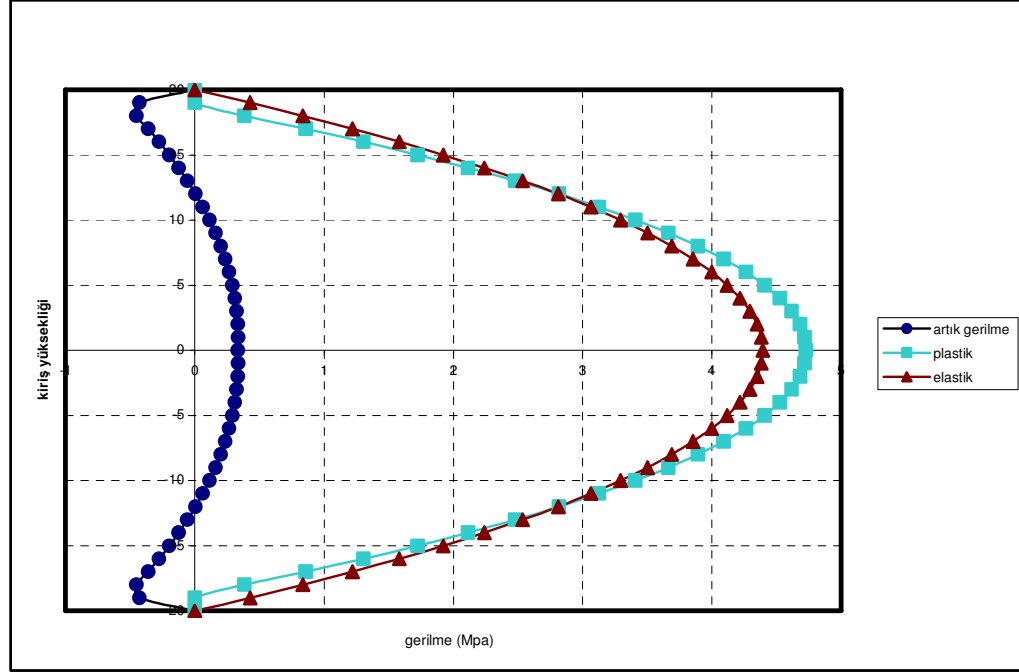
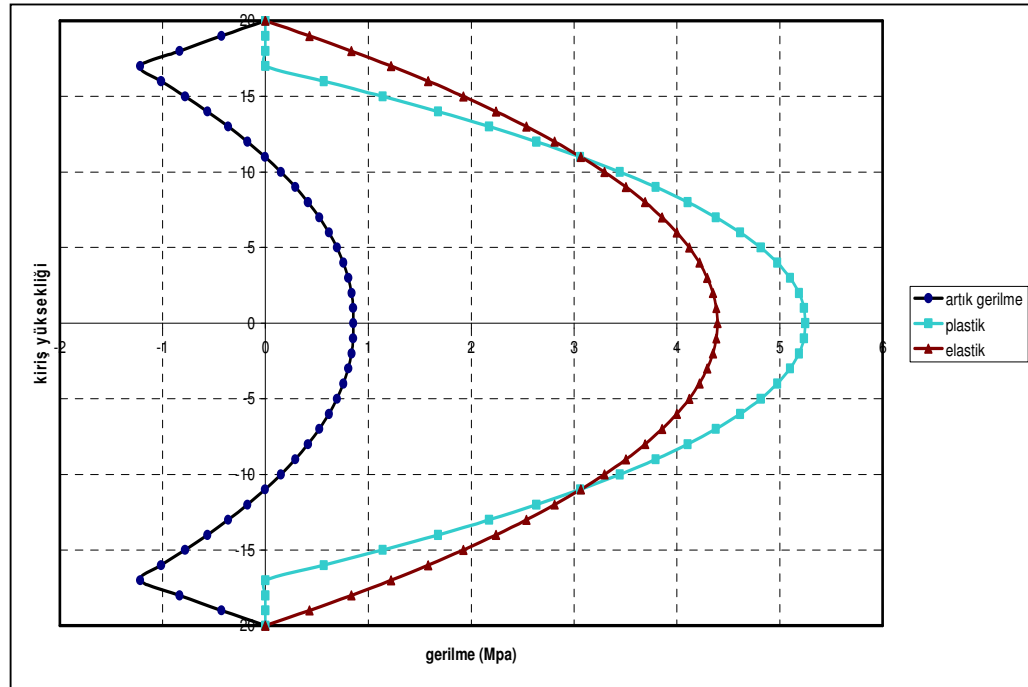


Şekil 1. 39. $\theta=45^\circ$ ve $x=252$ mm deki normal gerilmeler

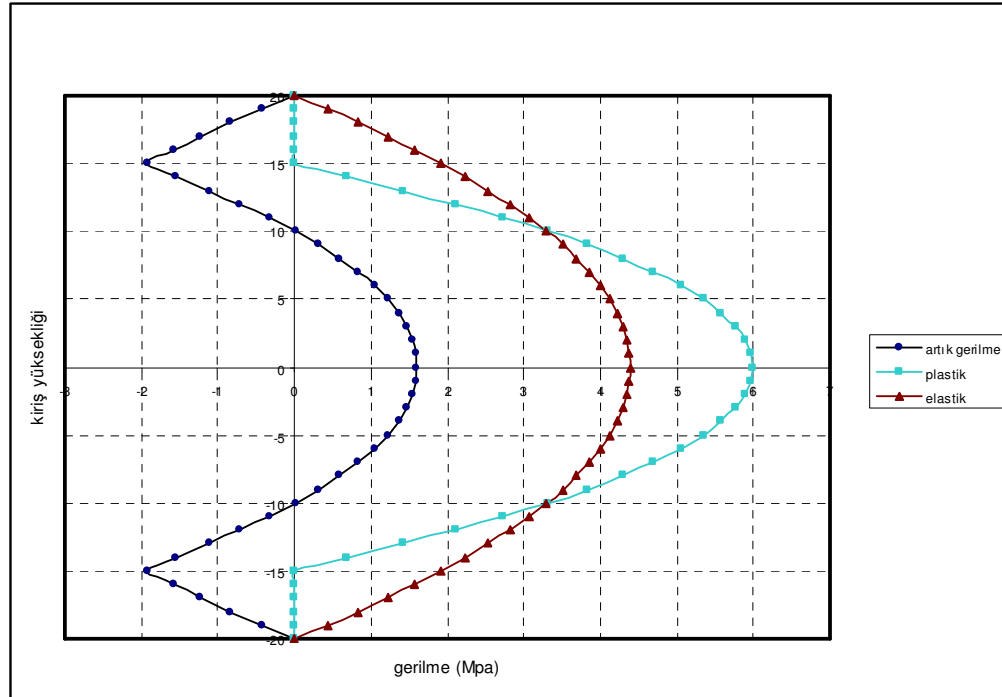


Şekil 1. 40. $\theta=45^\circ$ ve $x=272$ mm deki normal gerilmeler

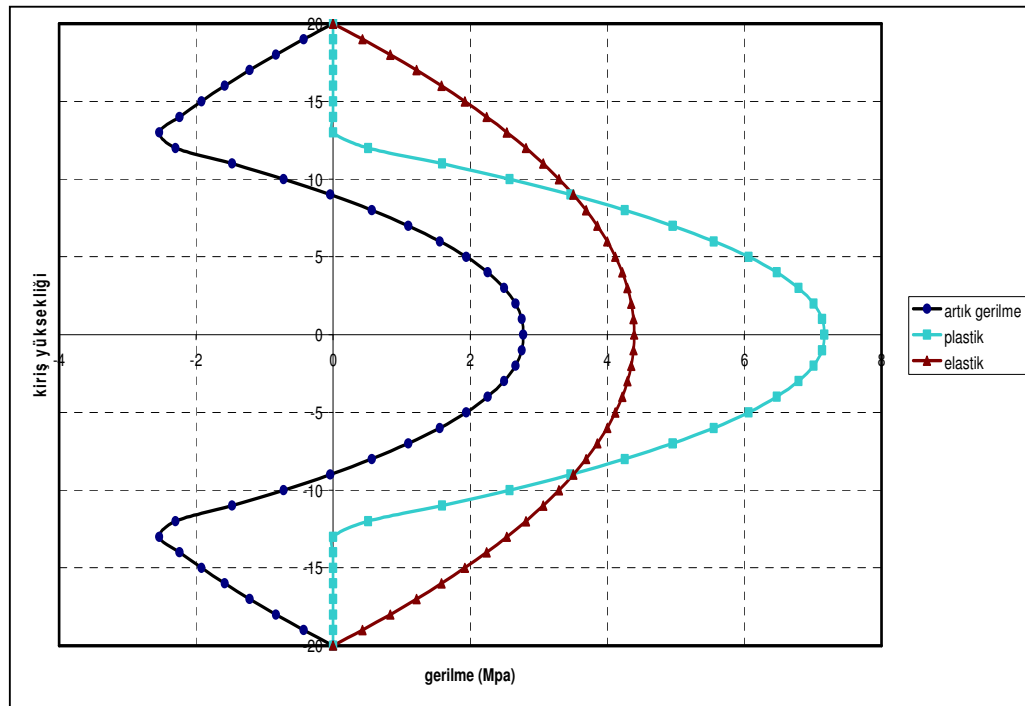
EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 41. $\theta=45^\circ$ takviye açısındaki kayma gerilmeleri ($x=197$ mm)Şekil 1. 42. $\theta=45^\circ$ takviye açısındaki kayma gerilmeleri ($x=212$ mm)

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

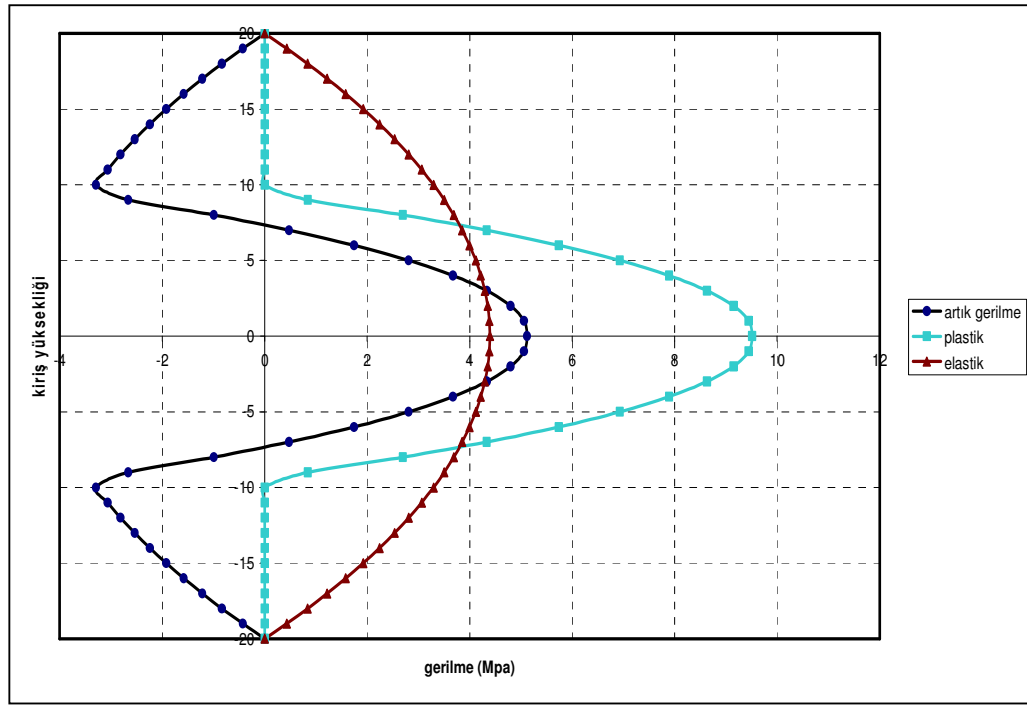


Şekil 1. 43 $\theta=45^\circ$ takviye açısındaki kayma gerilmeleri ($x=227$ mm)

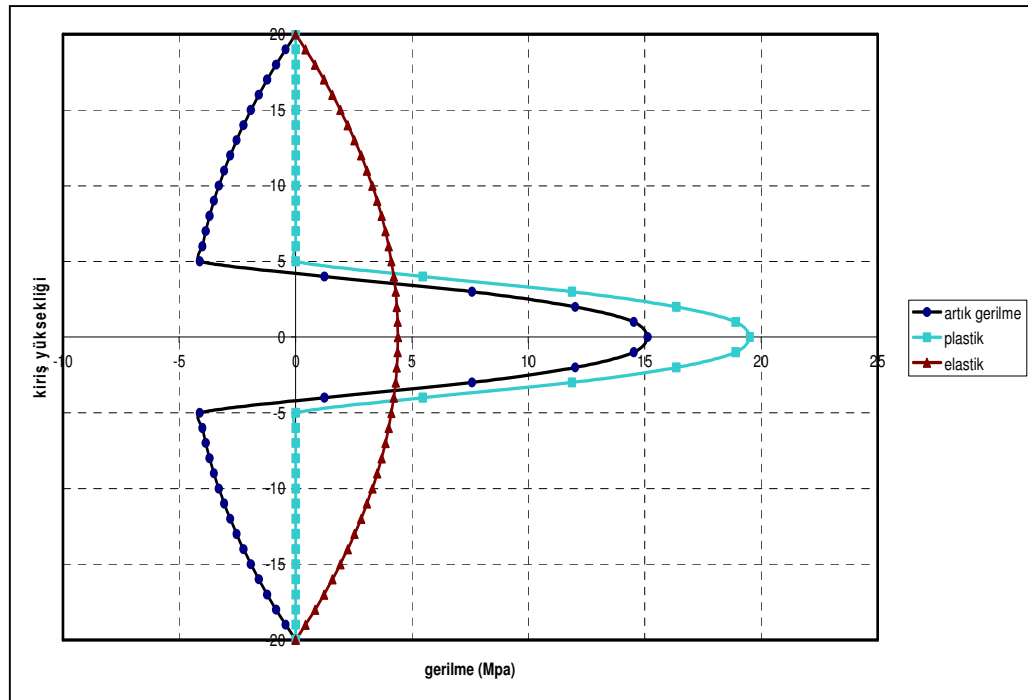


Şekil 1. 44 $\theta=45^\circ$ takviye açısındaki kayma gerilmeleri ($x=242$ mm)

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

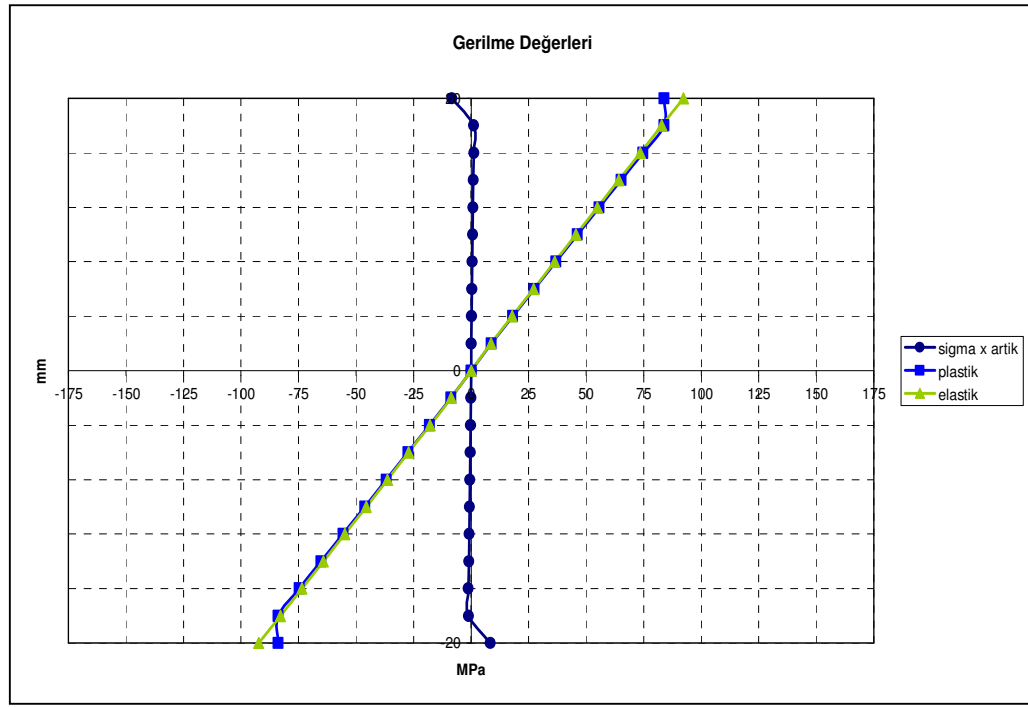


Şekil 1. 45. $\theta=45^\circ$ ve $x=257$ mm deki kayma gerilmeleri

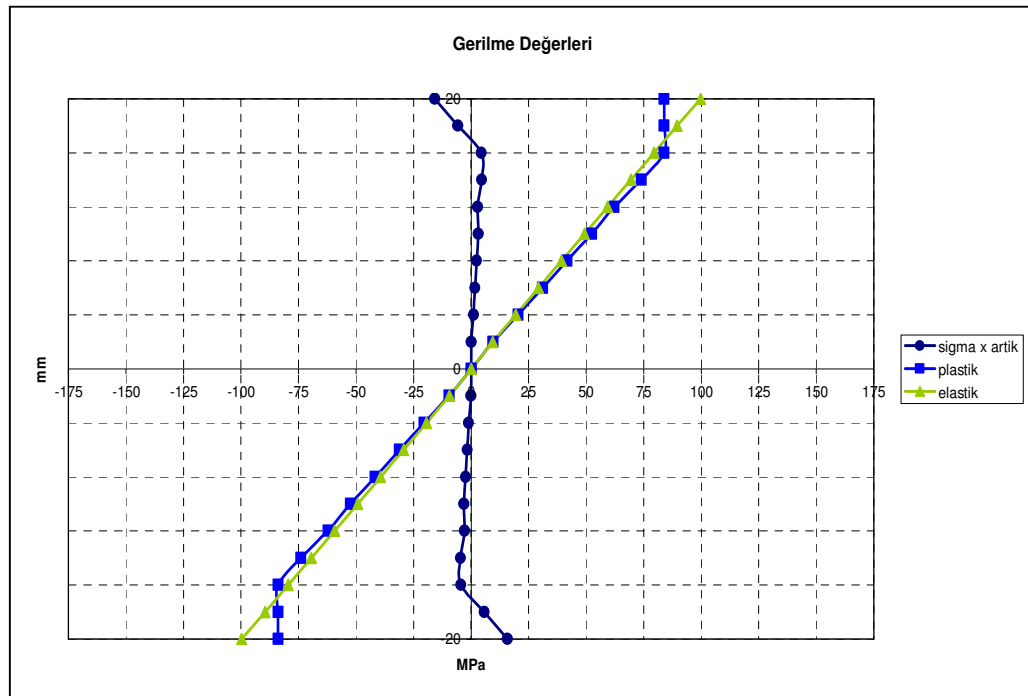


Şekil 1. 46. $\theta=45^\circ$ ve $x=272$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

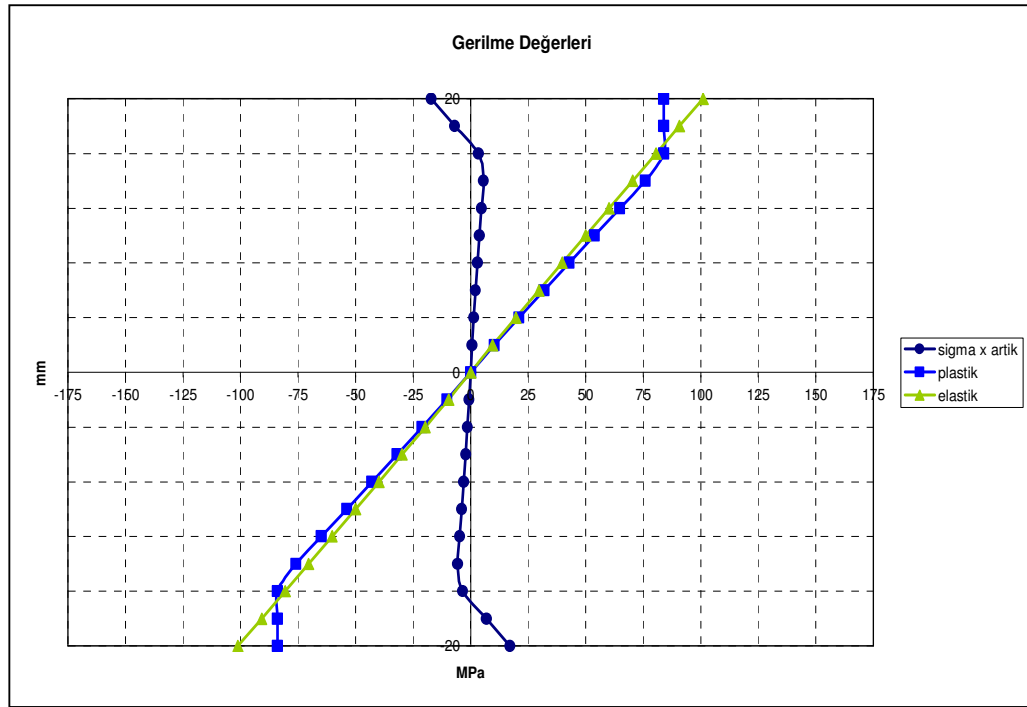


Şekil 1. 47. $\theta=60^\circ$ ve $x=208$ mm deki normal gerilmeler

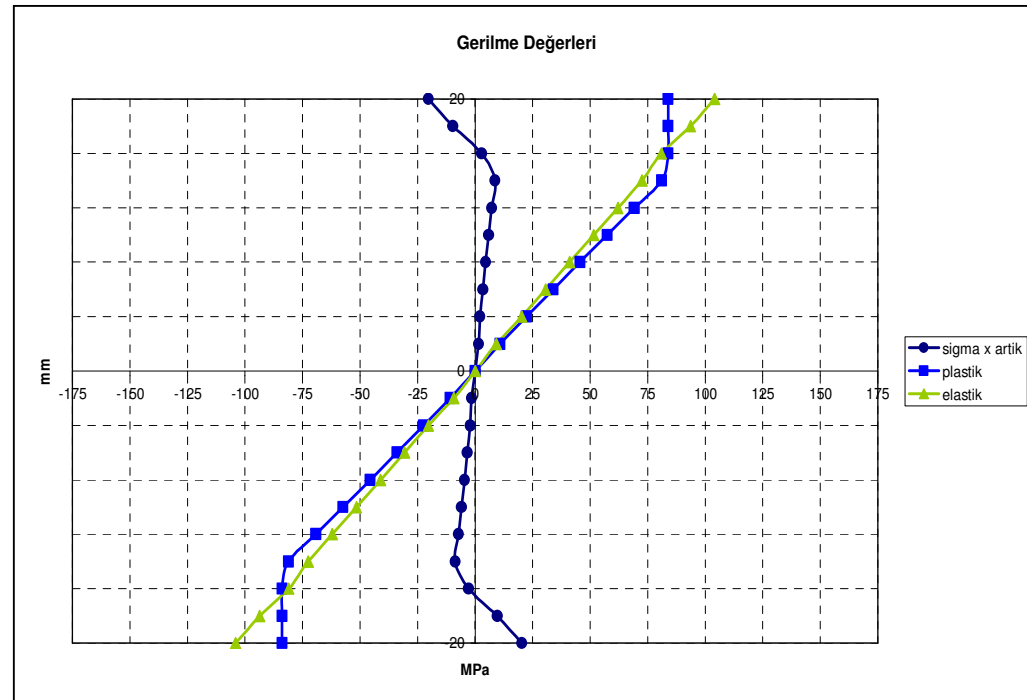


Şekil 1. 48. $\theta=60^\circ$ ve $x=225$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

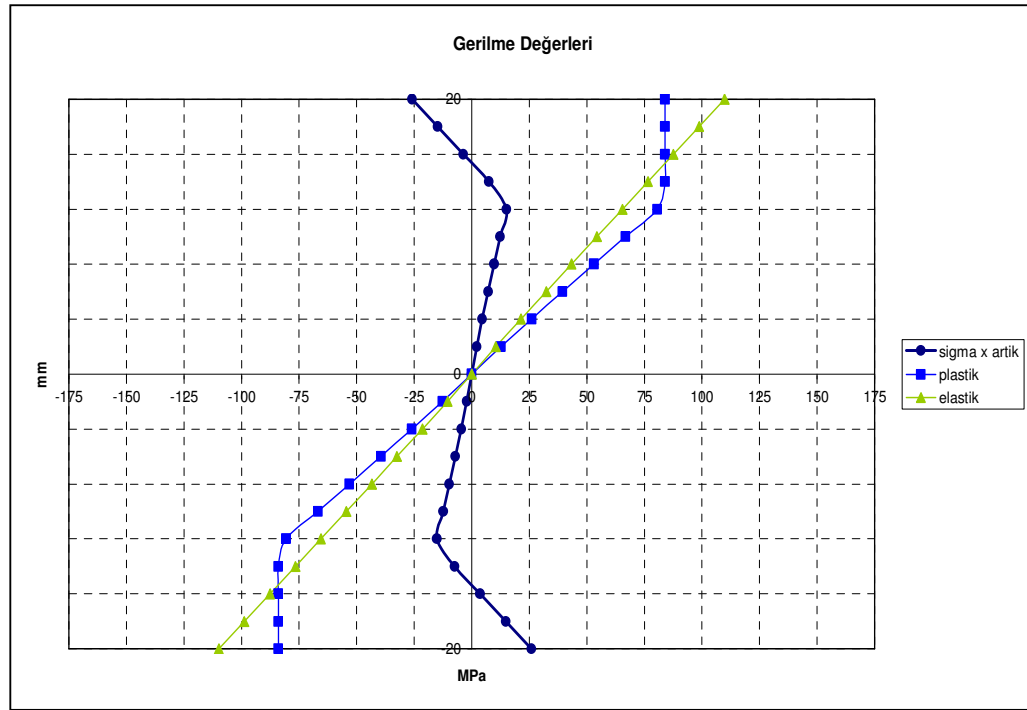


Şekil 1. 49. $\theta=60^\circ$ ve $x=228$ mm deki normal gerilmeler

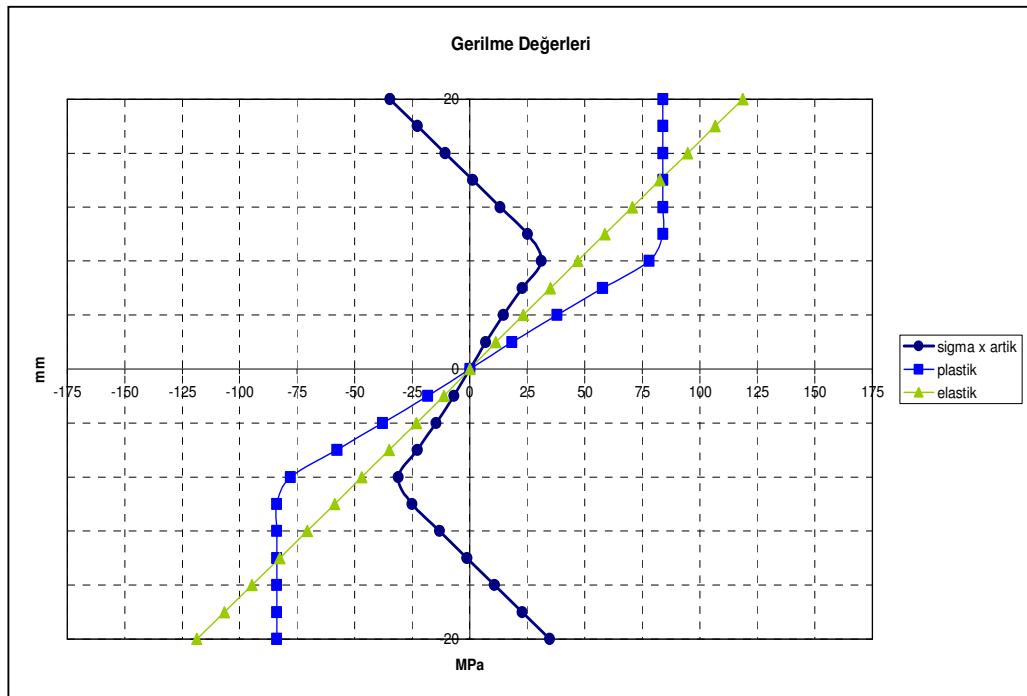


Şekil 1. 50. $\theta=60^\circ$ ve $x=235$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

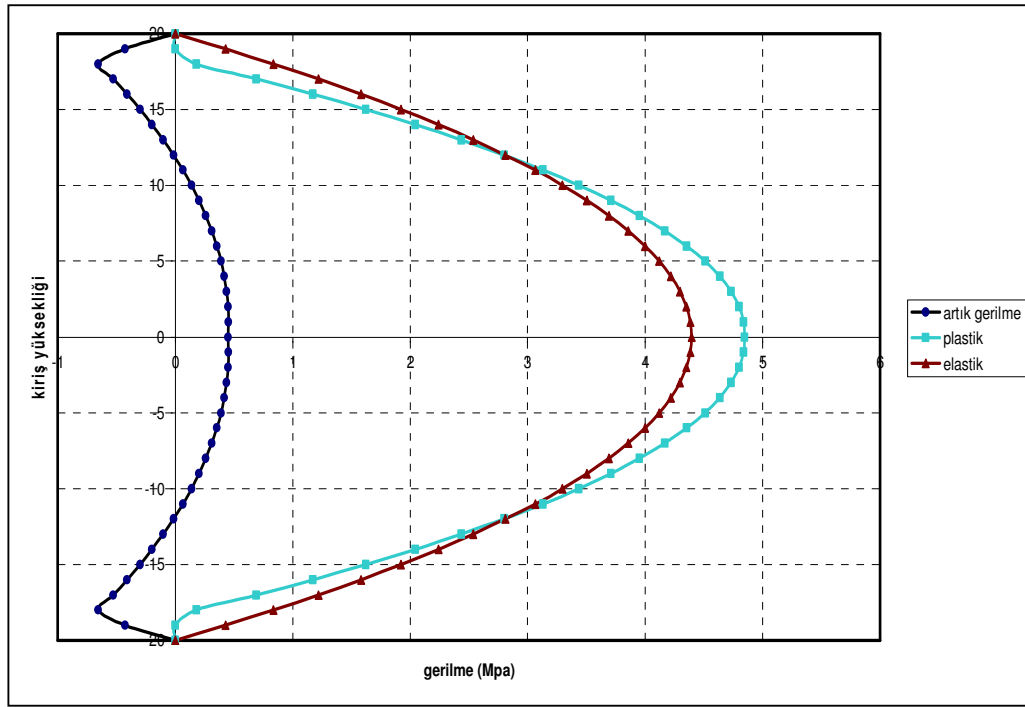


Şekil 1. 51. $\theta=60^\circ$ ve $x=248$ mm deki normal gerilmeler

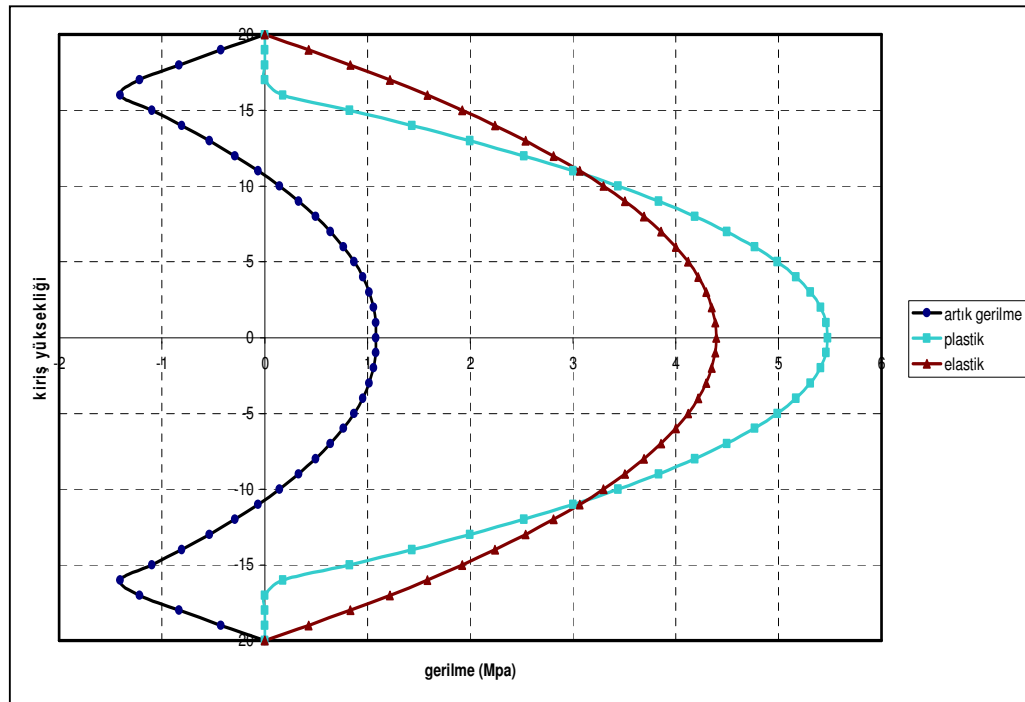


Şekil 1. 52. $\theta=60^\circ$ ve $x=268$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

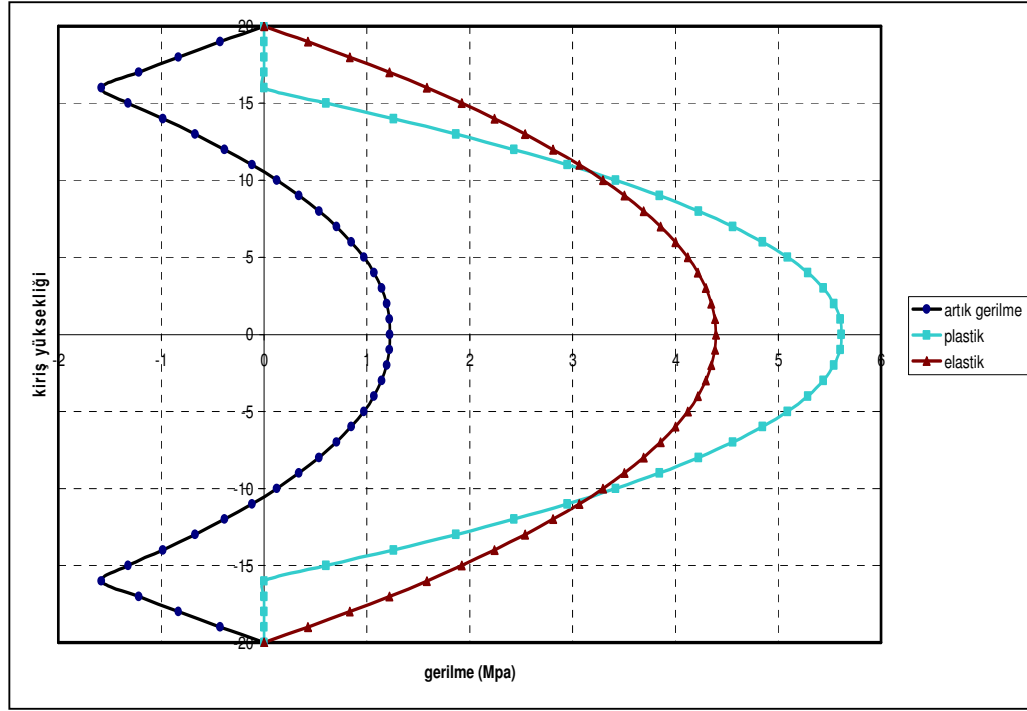
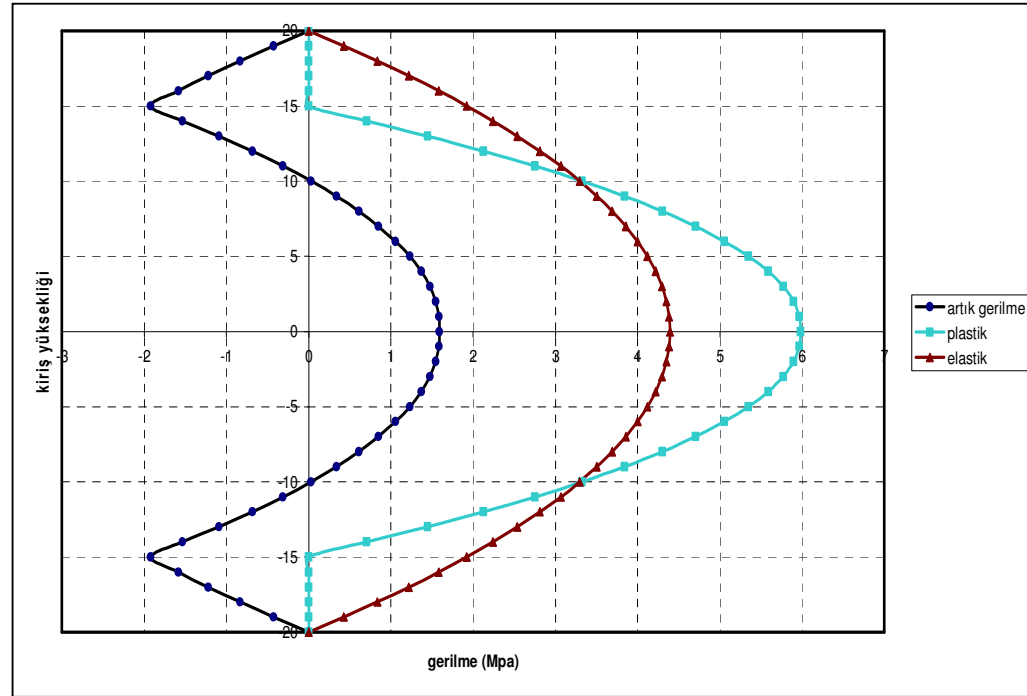


Şekil 1. 53. $\theta=60^\circ$ ve $x=208$ mm deki kayma gerilmeleri

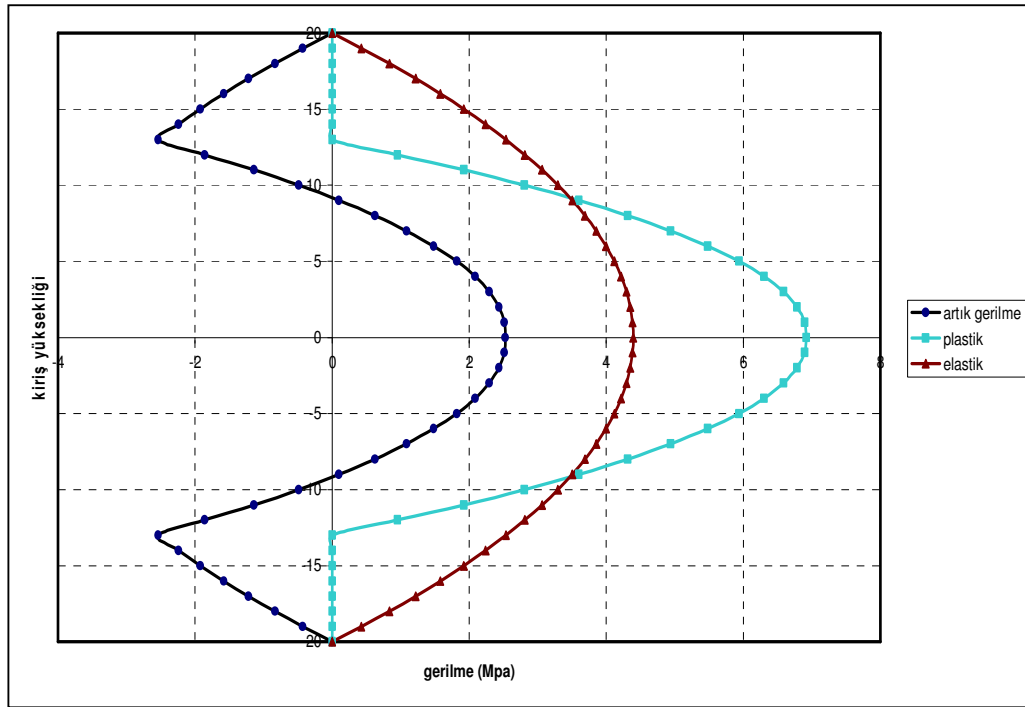
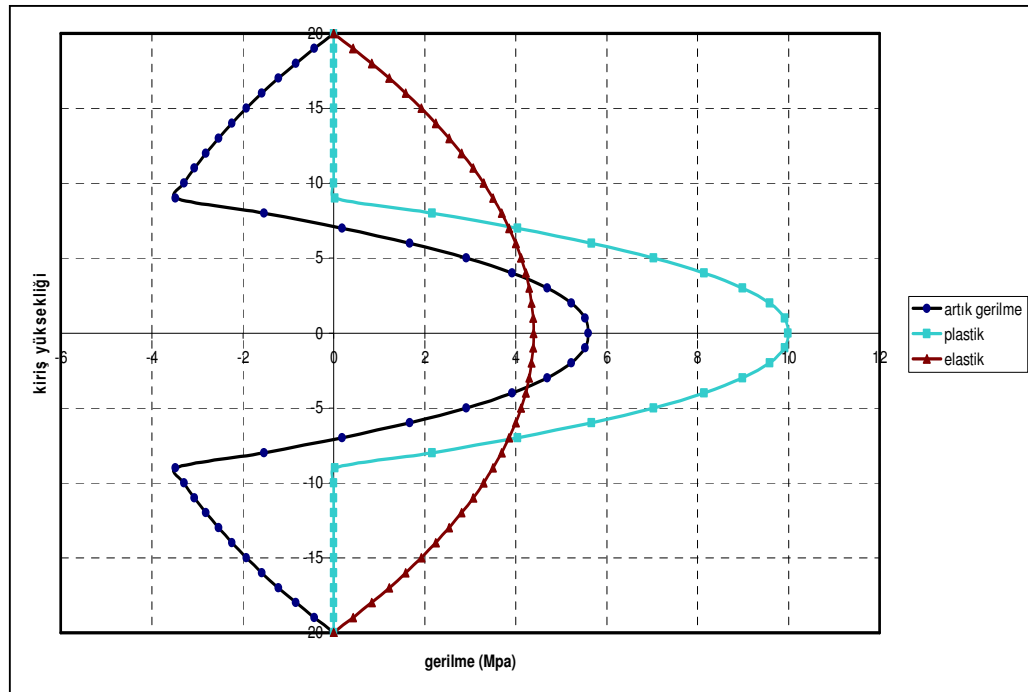


Şekil 1. 54. $\theta=60^\circ$ ve $x=225$ mm deki kayma gerilmeleri

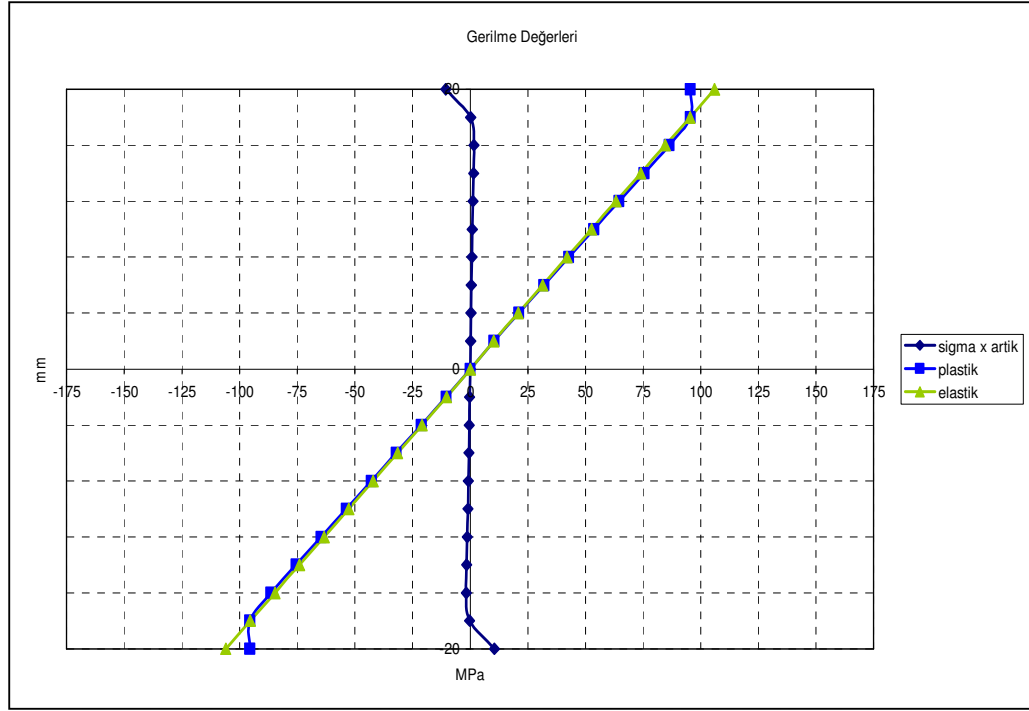
EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 55. $\theta=60^\circ$ ve $x=228$ mm deki kayma gerilmeleriŞekil 1. 56. $\theta=60^\circ$ ve $x=235$ mm deki kayma gerilmeleri

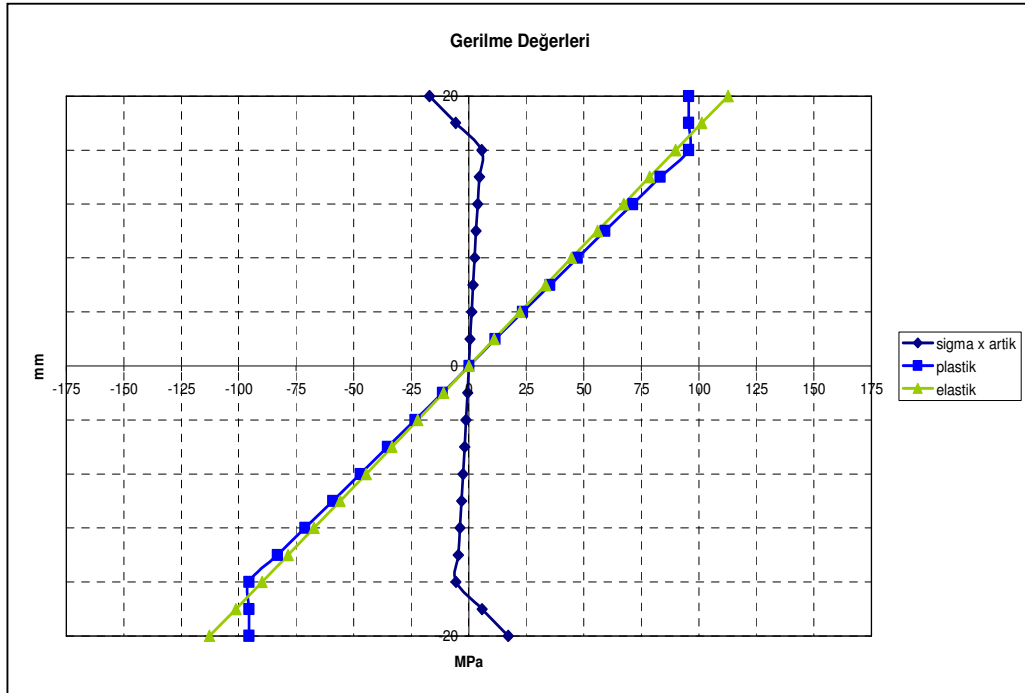
EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 57. $\theta=60^\circ$ ve $x=248$ mm deki kayma gerilmeleriŞekil 1. 58. $\theta=60^\circ$ ve $x=268$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

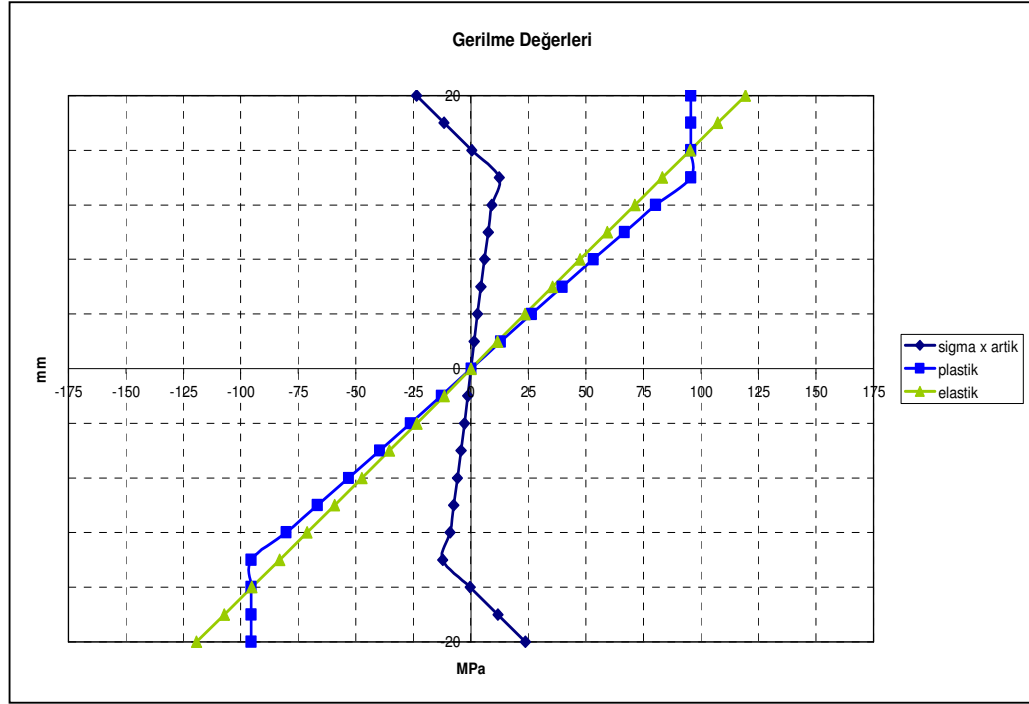


Şekil 1. 59. $\theta=75^\circ$ ve $x=240$ mm deki normal gerilmeler

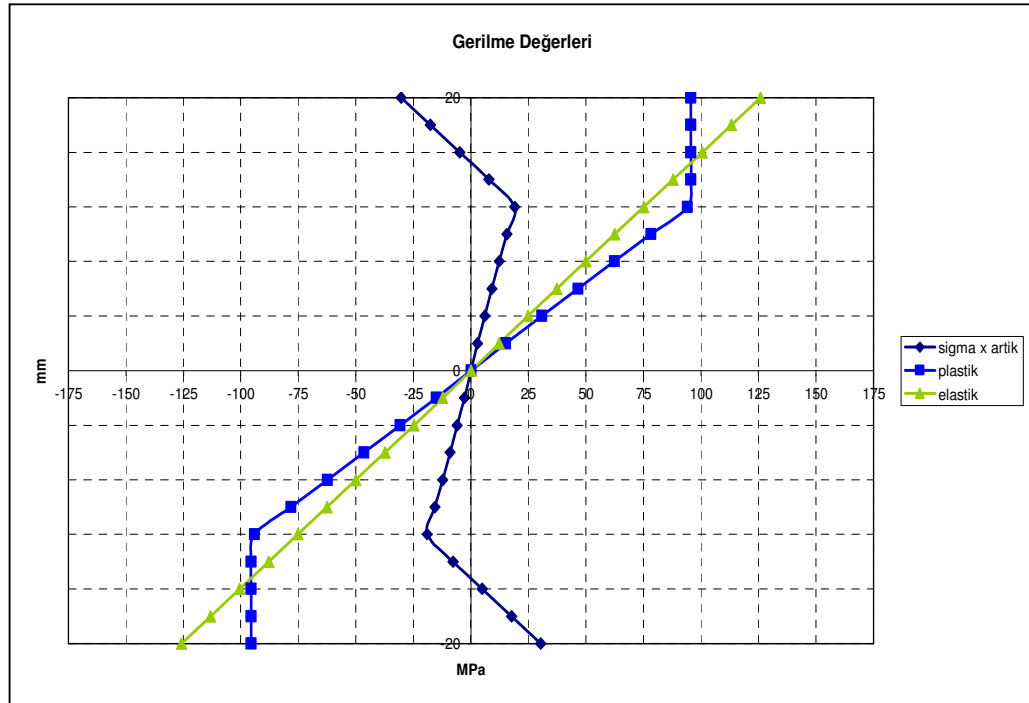


Şekil 1. 60. $\theta=75^\circ$ ve $x=255$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

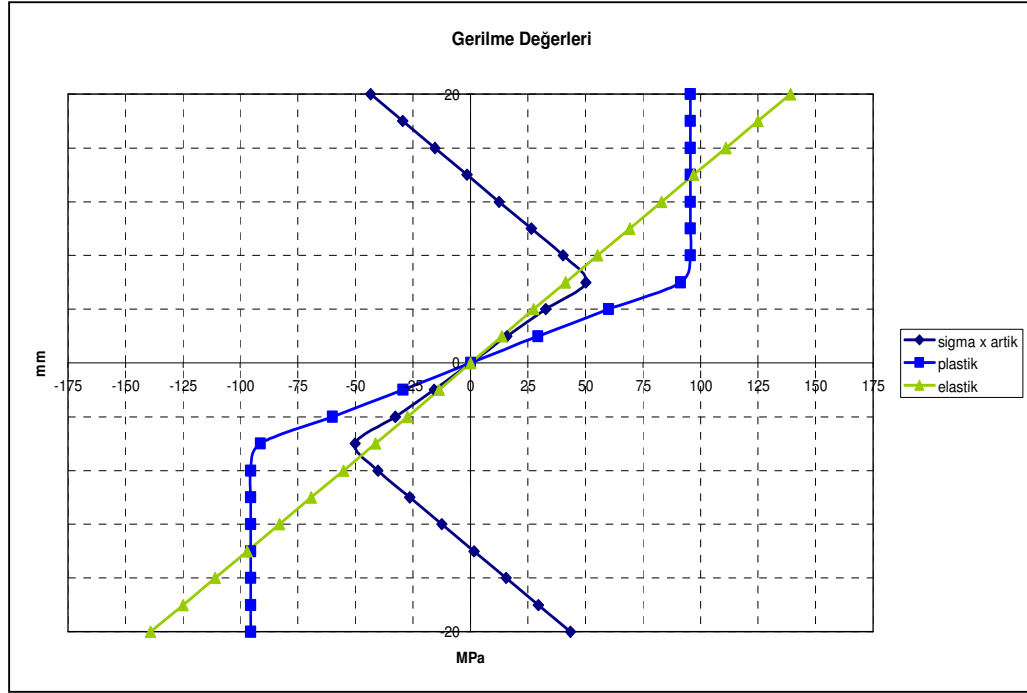


Şekil 1. 61. $\theta=75^\circ$ ve $x=270$ mm deki normal gerilmeler

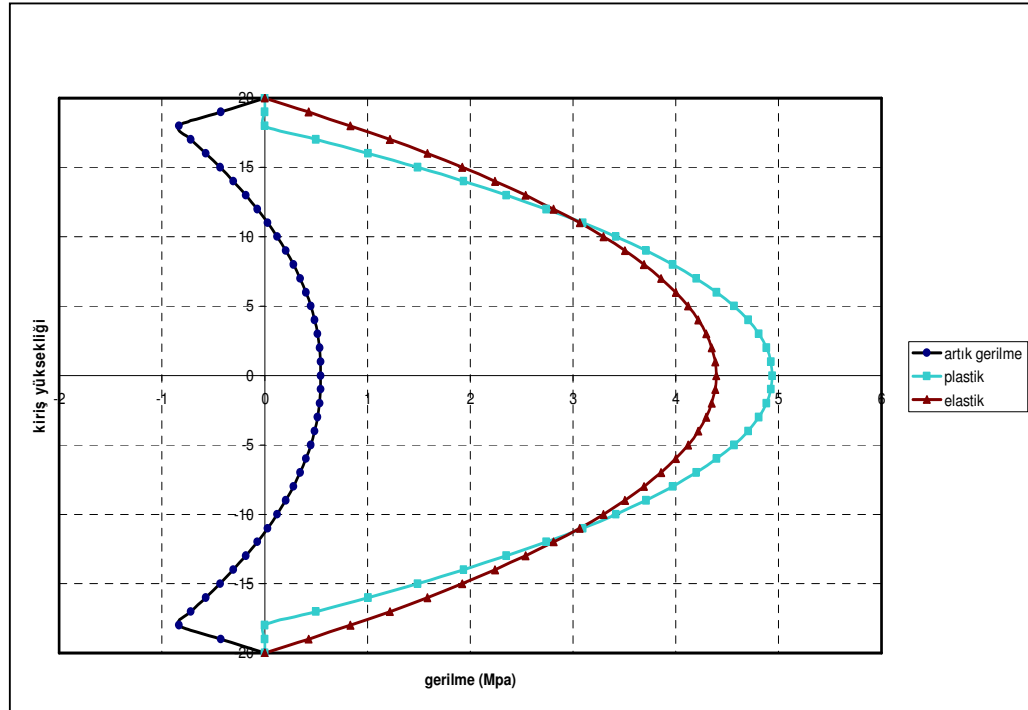


Şekil 1. 62. $\theta=75^\circ$ ve $x=285$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

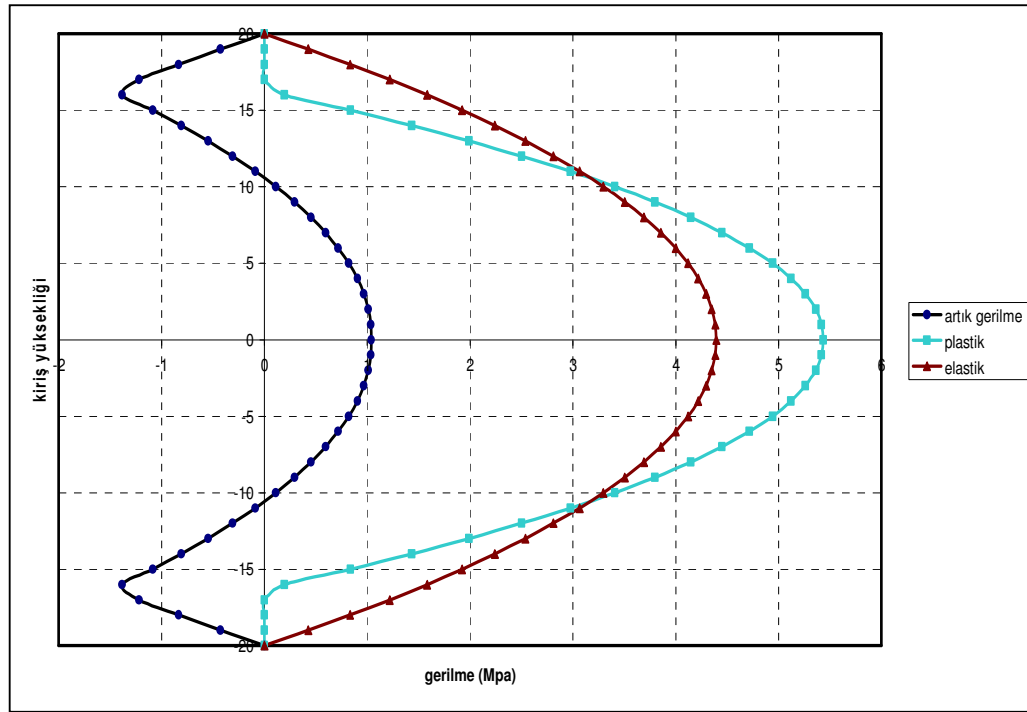
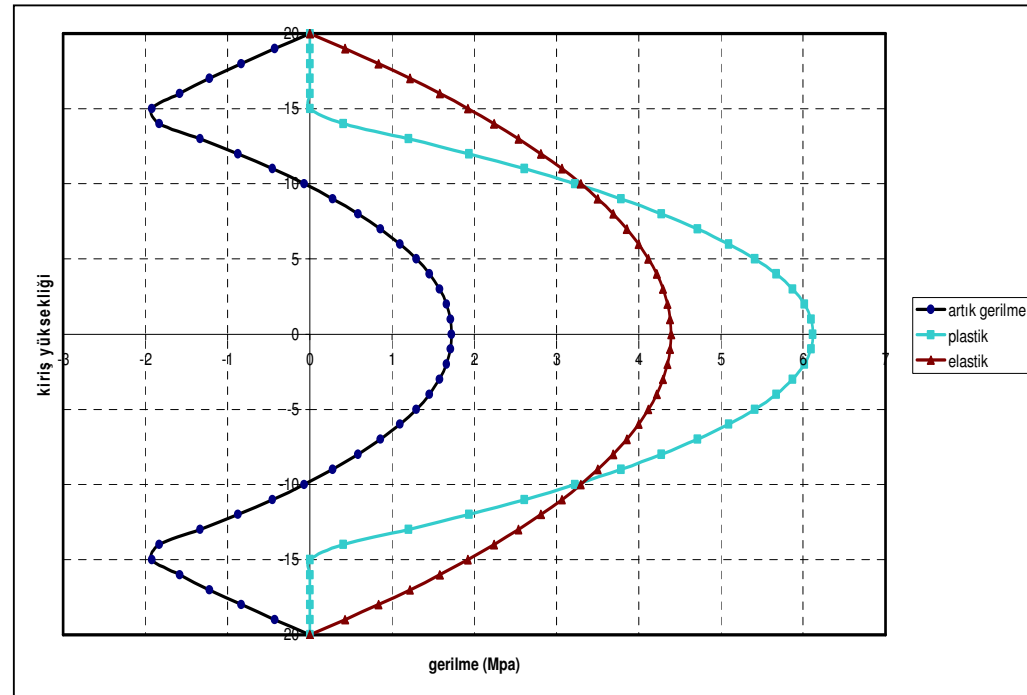


Şekil 1. 64. $\theta=75^\circ$ ve $x=315$ mm deki normal gerilmeler

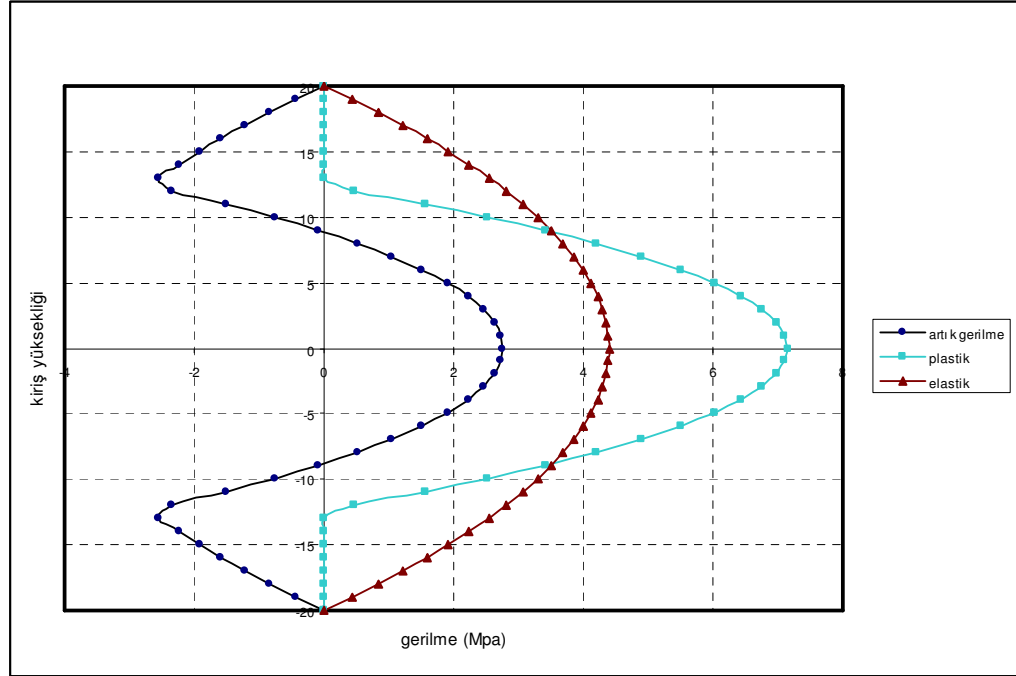


Şekil 1. 65. $\theta=75^\circ$ ve $x=335$ mm deki normal gerilmeler

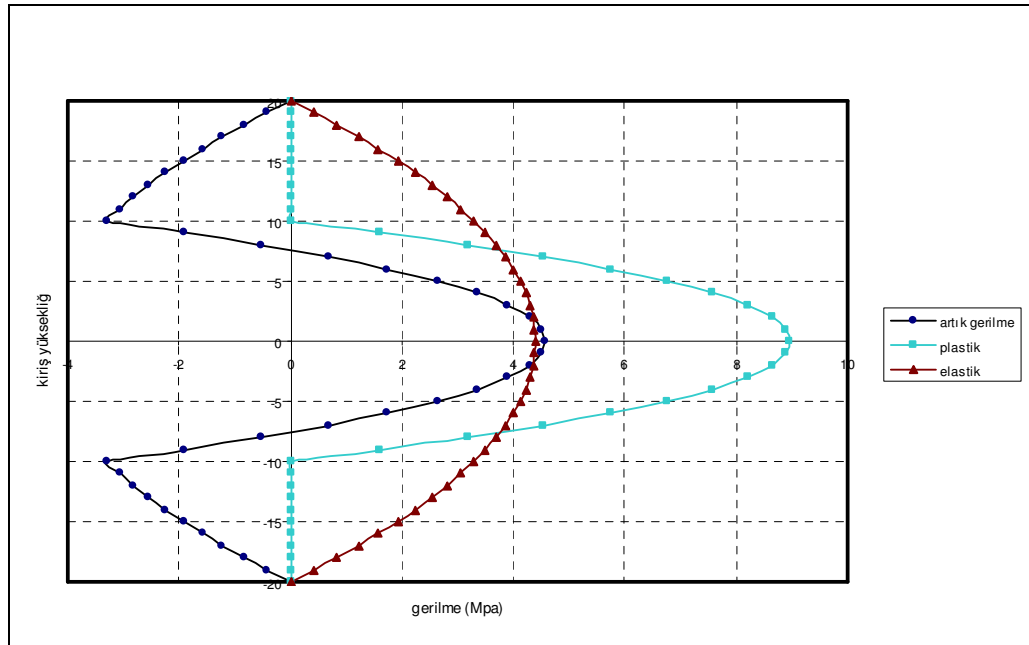
EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 66. $\theta=75^\circ$ ve $x=255$ mm deki kayma gerilmeleriŞekil 1. 67. $\theta=75^\circ$ ve $x=270$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

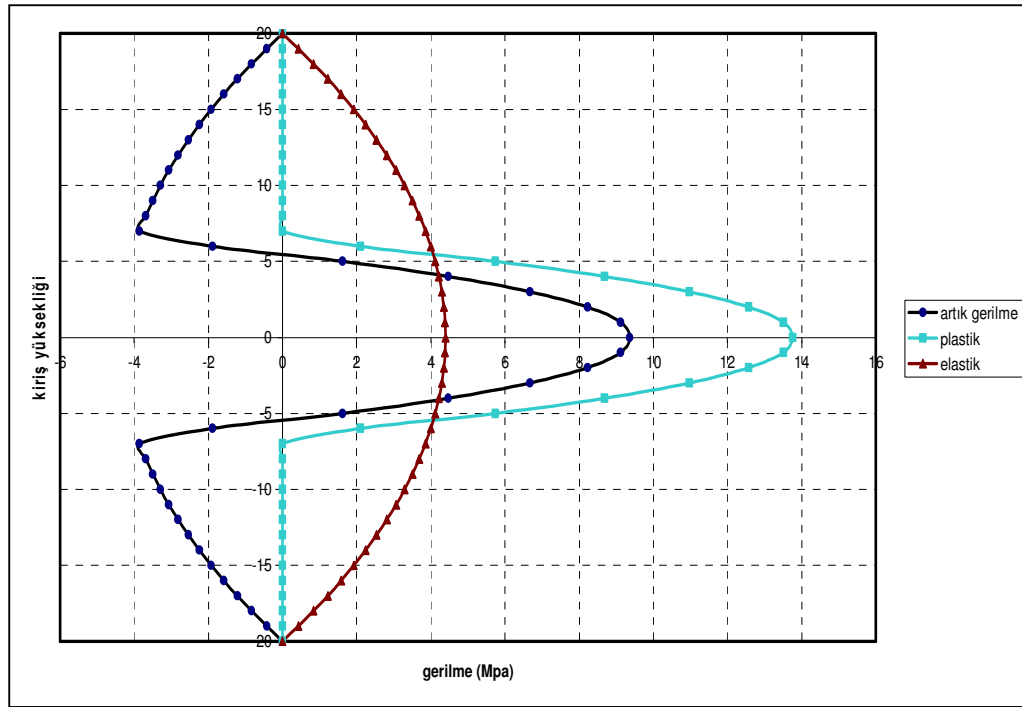


Şekil 1. 68. $\theta=75^\circ$ ve $x=285$ mm deki kayma gerilmeleri

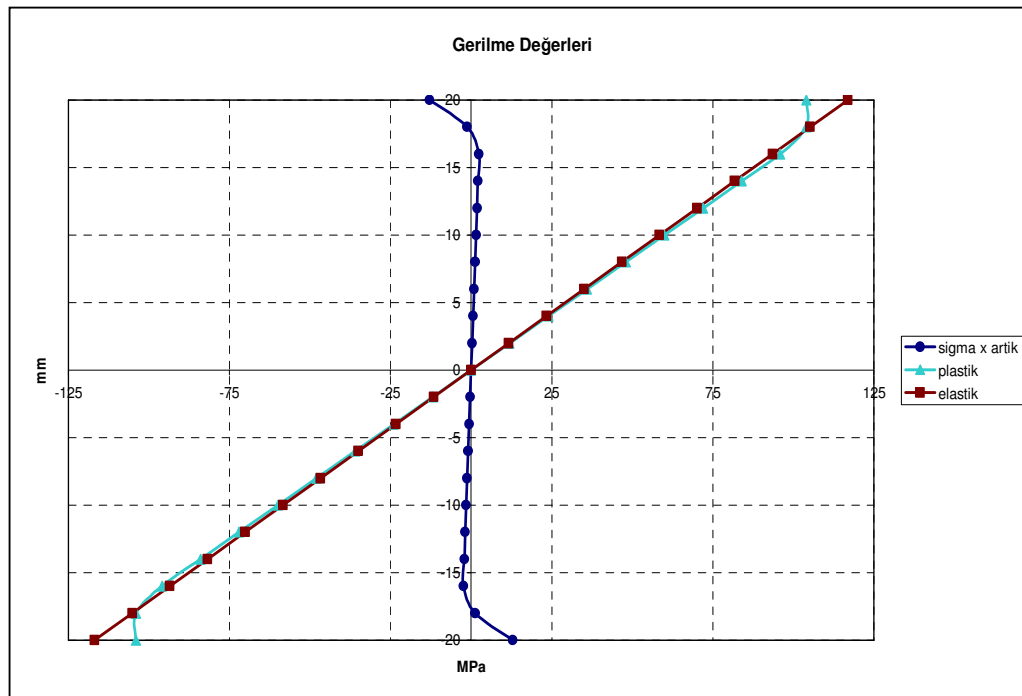


Şekil 1. 69. $\theta=75^\circ$ ve $x=300$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

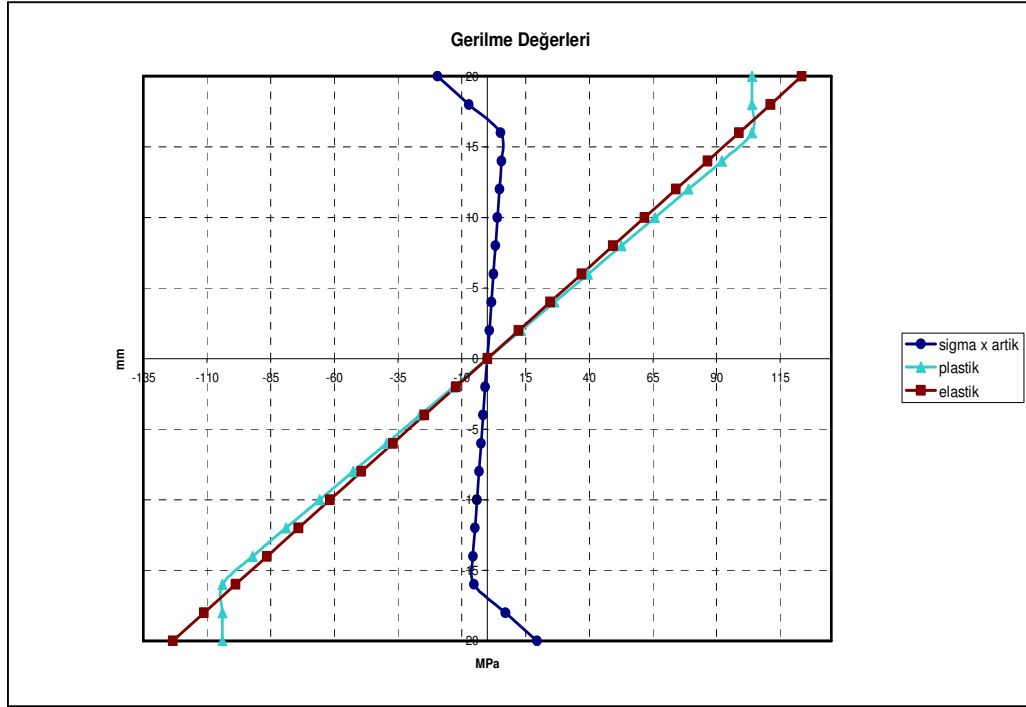


Şekil 1. 70. $\theta=75^\circ$ ve $x=315$ mm deki kayma gerilmeleri

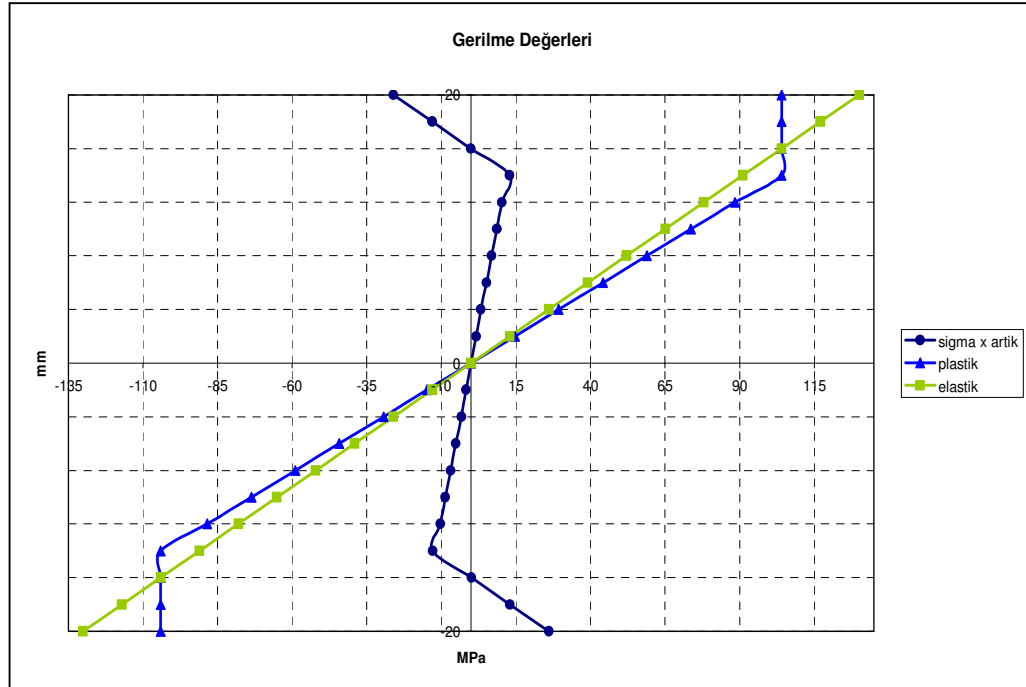


Şekil 1. 71. $\theta=90^\circ$ ve $x=226$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

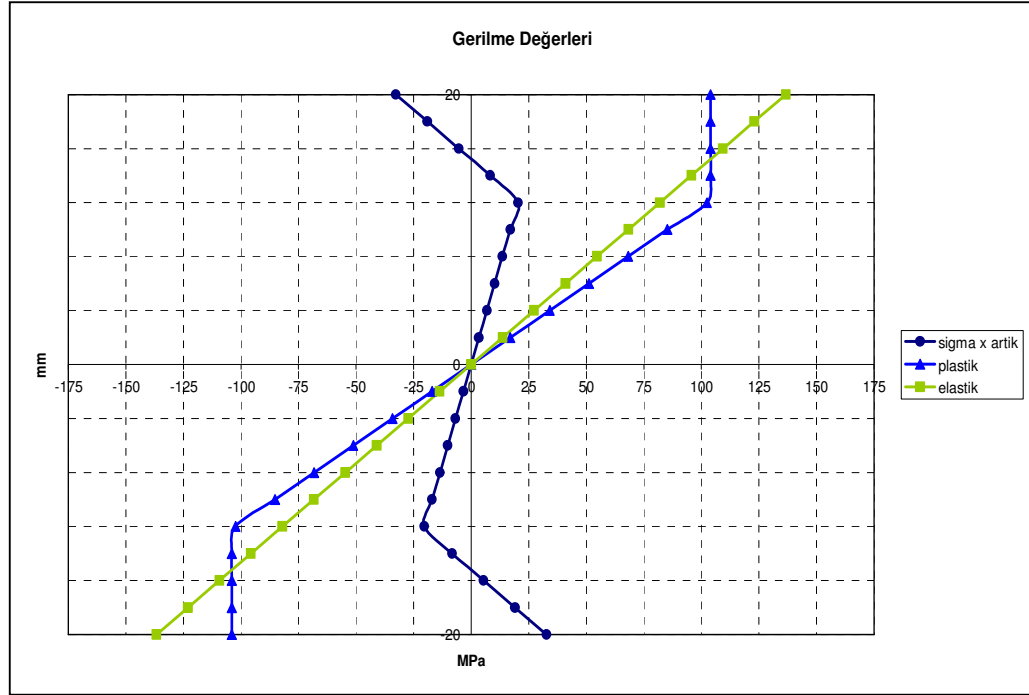


Şekil 1. 72. $\theta=90^\circ$ ve $x=281$ mm deki normal gerilmeler

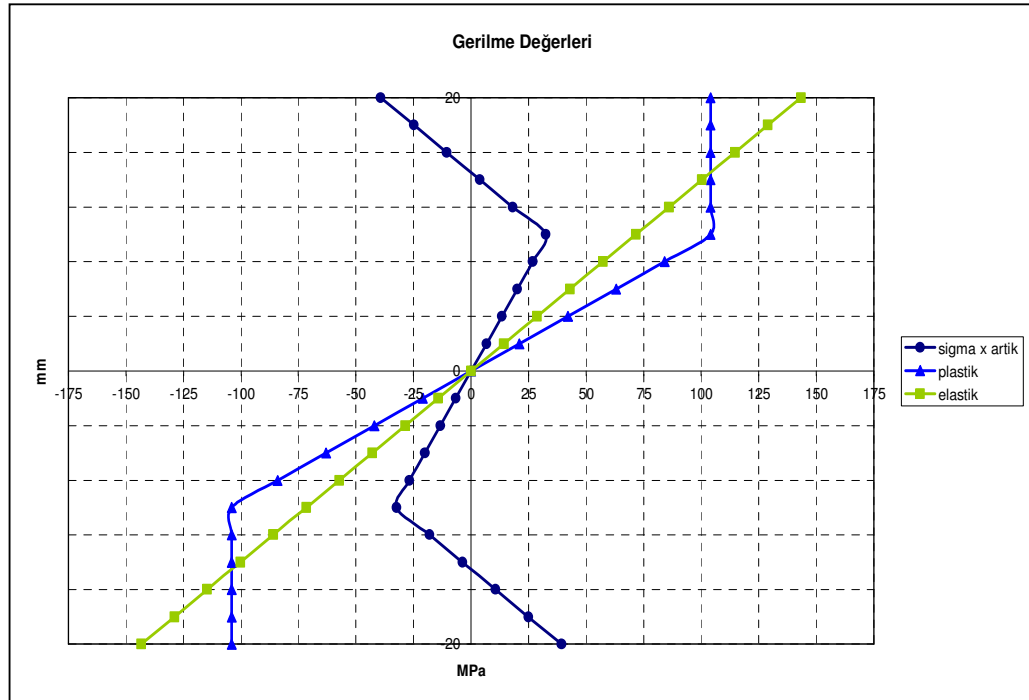


Şekil 1. 73. $\theta=90^\circ$ ve $x=296$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

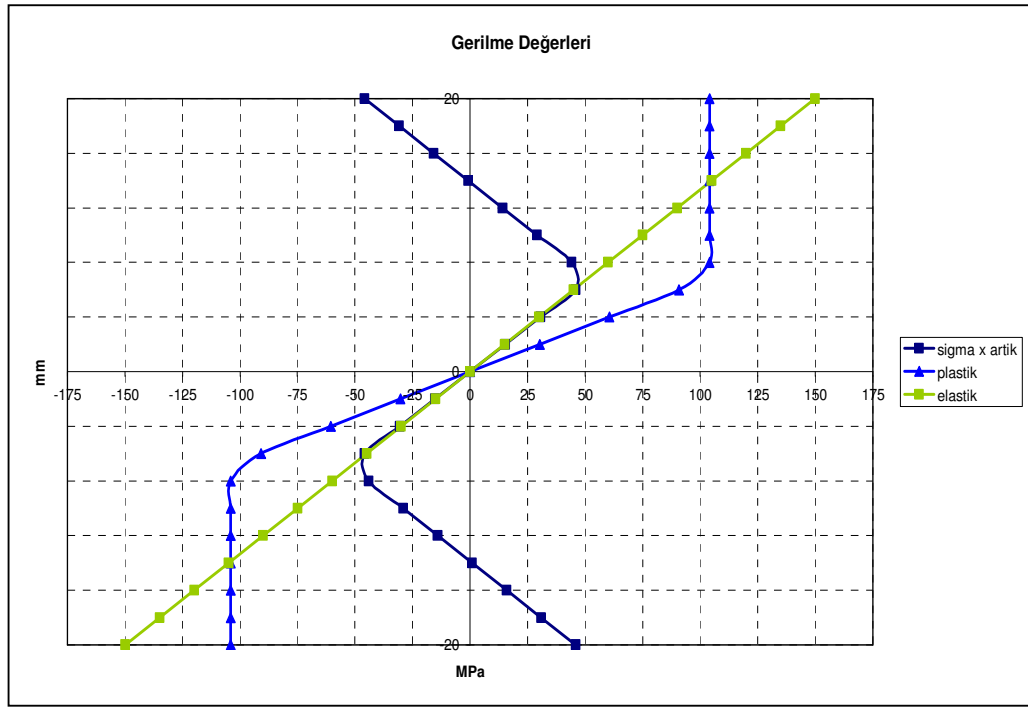


Şekil 1. 74. $\theta=90^\circ$ ve $x=311$ mm deki normal gerilmeler

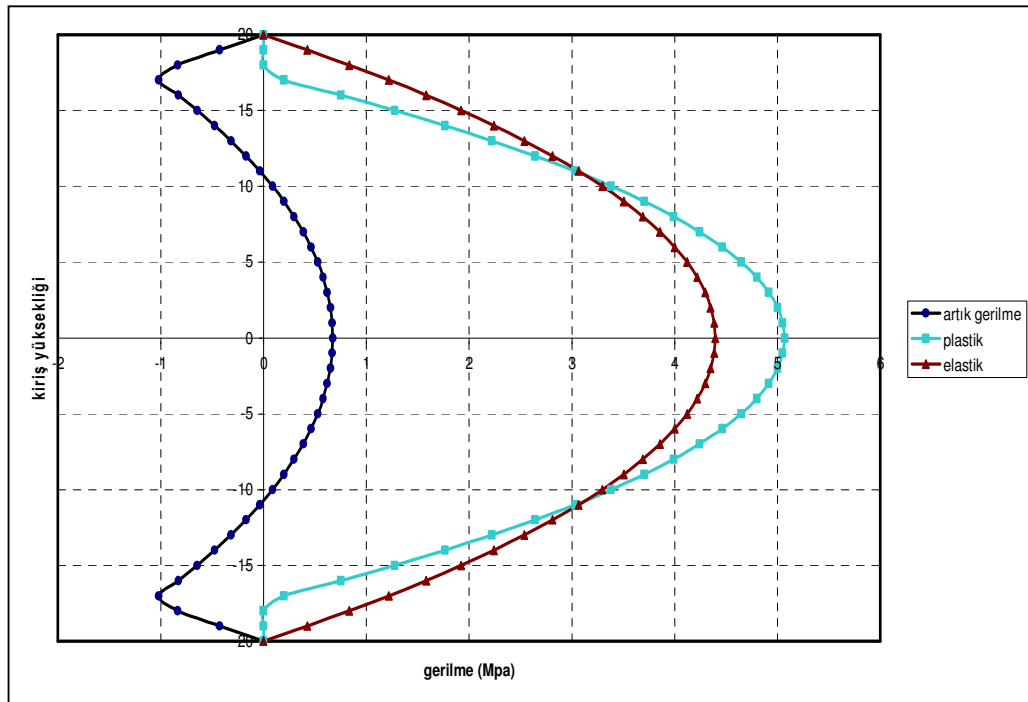


Şekil 1. 75. $\theta=90^\circ$ ve $x=326$ mm deki normal gerilmeler

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

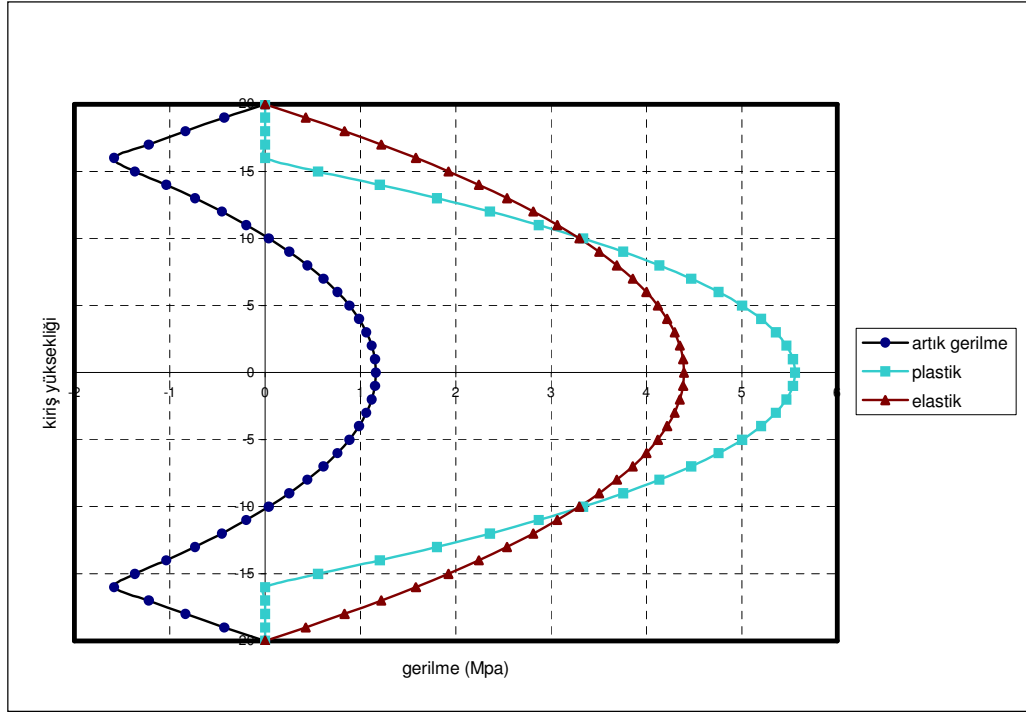
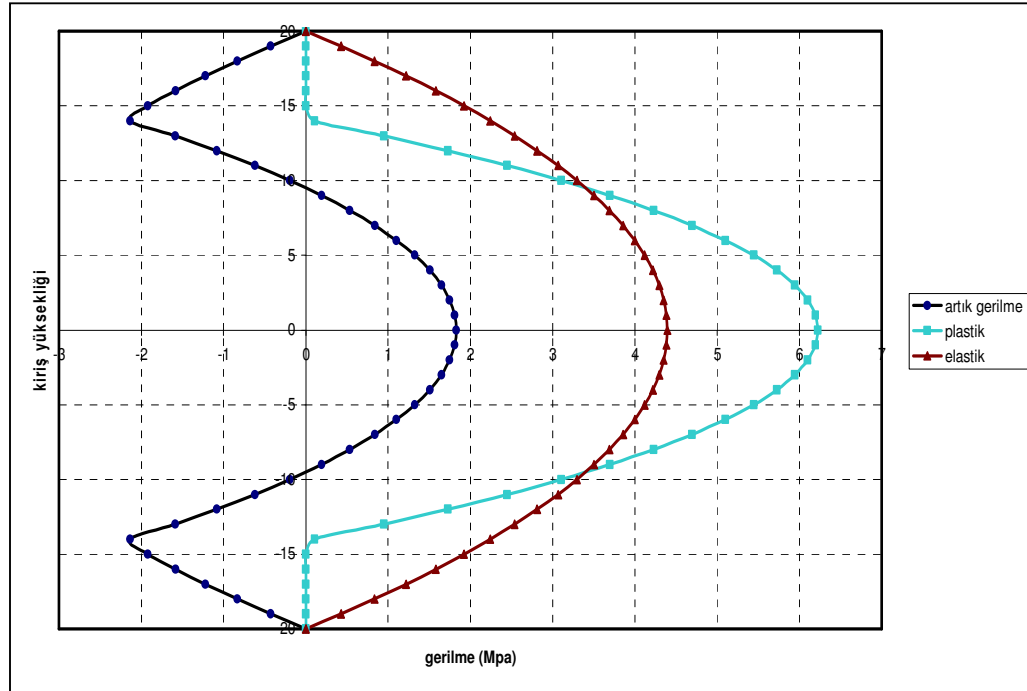


Şekil 1. 76. $\theta=90^\circ$ ve $x=341$ mm deki normal gerilmeler

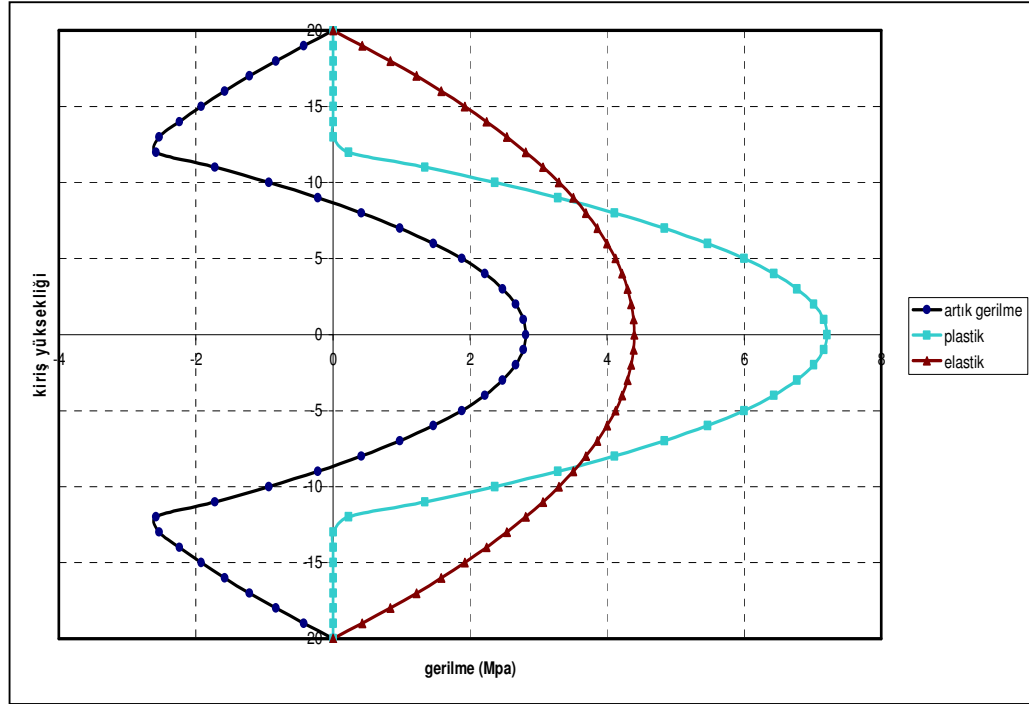
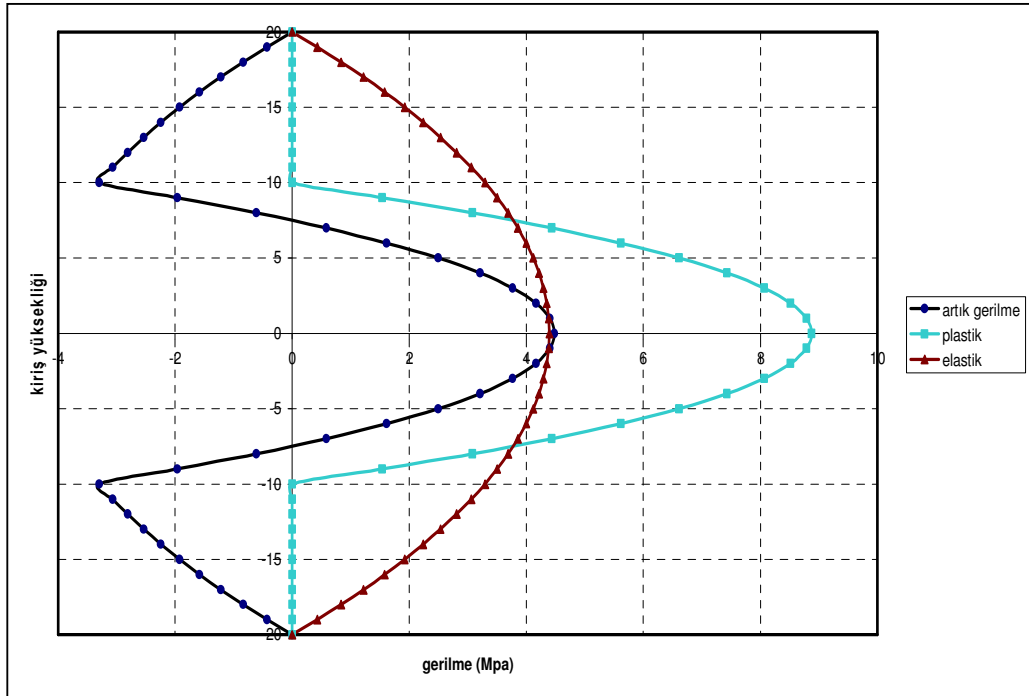


Şekil 1. 77. $\theta=90^\circ$ ve $x=226$ mm deki kayma gerilmeleri

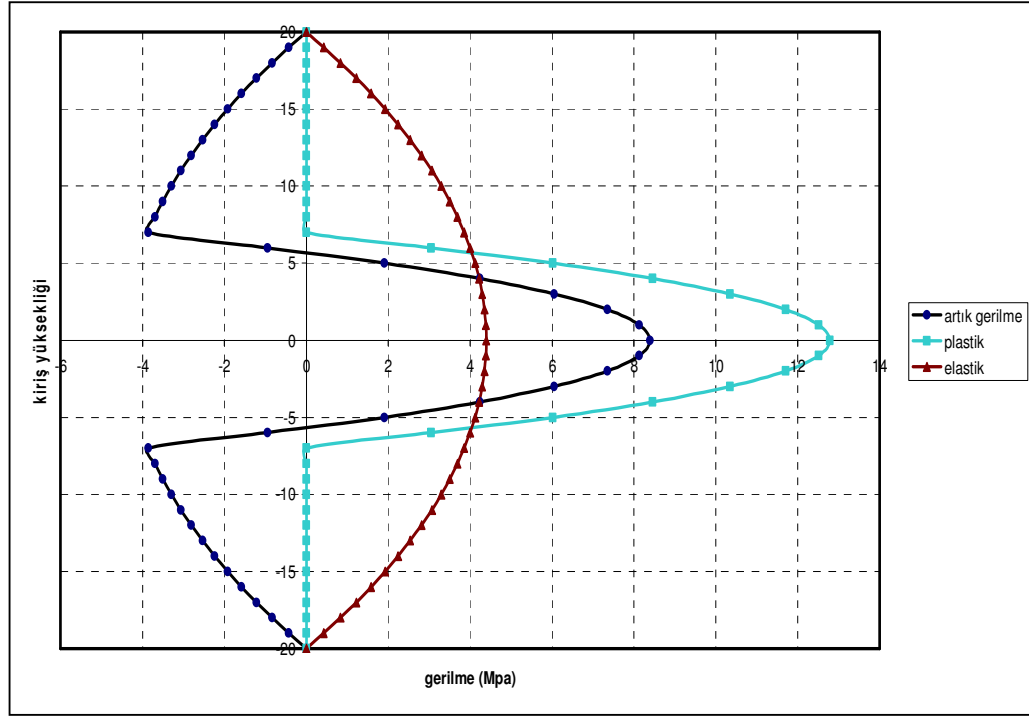
EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 78. $\theta=90^\circ$ ve $x=281$ mm deki kayma gerilmeleriŞekil 1. 79. $\theta=90^\circ$ ve $x=296$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 80. $\theta=90^\circ$ ve $x=311$ mm deki kayma gerilmeleriŞekil 1. 81. $\theta=90^\circ$ ve $x=326$ mm deki kayma gerilmeleri

EK-1 (Devam) Farklı fiber açısı ve mesafelerde elde edilen gerilme grafikleri

Şekil 1. 82. $\theta=90^\circ$ ve $x=341$ mm deki kayma gerilmeleri

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler:**

Soyadı, adı : ÖZDİLLİ, Özgür
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 22.12.1975, Çorum
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (364) 2273288
Faks : -
e-mail : oozdilli@hotmail.com

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	M.Ü.Teknik Eğitim Fakültesi	1998
Ön Lisans	G.Ü. Çorum M.Y.O.	1994
Lise	Endüstri Meslek Lisesi	1992

Yabancı Dil

İngilizce