

**ÇELİK FİBER TAKVİYELİ ALÜMİNYUM METAL MATRİKSLİ  
KOMPOZİT PLAKALARIN ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ**

**Alper ATMACA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2006  
ANKARA**

Alper ATMACA tarafından hazırlanan ÇELİK FİBER TAKVİYELİ ALÜMİNYUM METAL MATRİKSİLİ KOMPOZİT PLAKALARIN ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarız.

Yrd. Doç. Dr. O. Selim TÜRKBAS  
Tez Yöneticisi

Doç.Dr.Halil AYKUL  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Üye : Prof. Dr. Faruk MENDİ

Üye : Doç. Dr. Halil AYKUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. O. Selim TÜRKBAS

Tarih : 14/06/2006

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.

Alper ATMACA

**ÇELİK FİBER TAKVİYELİ ALÜMİNYUM METAL MATRİKSİLİ  
KOMPOZİT PLAKALARIN ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Alper ATMACA**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Mayıs 2006**

**ÖZET**

Bu çalışma üç aşamadan oluşmuştur. İlk olarak metal matriksli kompozit yapı elde edilmiştir. Kompozit yapının matriks malzemesi alüminyum ve fiber malzemesi çelik teldir. Çelik teller matriks üzerine tek ekseninde yerleştirilmiştir. Matriks ve fiber arasında bağ oluşturmak amacıyla epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçinenin jelleşmesi (sertleşmesi) için kompozit yapı 80 °C 'de 1 saat fırında pişirilmiştir. Bu üretim yöntemi sıcak presleme yöntemine göre daha basittir. Bu yöntemde, alüminyumun oksijene olan yüksek afinitesi bir dezavantaj oluşturmamaktadır. Daha sonra basit çekme deneyleri yapılarak kompozit yapıya ait mühendislik sabitleri ve mekanik özellikler bulunmuştur. Fiber oranı arttıkça kompozit malzemenin çekme dayanımı artmıştır. Yapılan deneyler sonucunda reçinenin kompozit malzemenin dayanımına bir katkısının olmadığı ancak çok iyi bir yapıştırıcı olduğu tespit edilmiştir. Son olarak ta ANSYS paket programı kullanılarak elasto-plastik gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, (0/90 °)<sub>2</sub> simetrik çapraz takviyeli ve (15/-15 °)<sub>2</sub>, (30/-30 °)<sub>2</sub>, (45/-45°)<sub>2</sub> simetrik açılı takviyeli alüminyum metal matrisli tabakalı kompozit plaklar için elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Simetrik tabakalı plaklar, plağın bütün kenarları x ve y doğrultularında hareket

edemeyecek şekilde basit olarak mesnetlenmiştir. Analizde akma kriteri olarak Tsai-Hill teorisi kullanılmıştır. Ayrıca sıcak presleme sonucu elde edilen kompozit malzeme için gerilme-gerinme diyagramları da ekler kısmında sunulmuştur.

**Bilim Kodu** : 914.1.073  
**Anahtar Kelimeler** : Kompozit malzeme, elasto-plastik gerilme analizi, epoksi reçine, sonlu eleman yöntemi, ANSYS  
**Sayfa Adedi** : 106  
**Tez Yöneticisi** : Yrd. Doç. Dr. O. Selim TÜRKBAŞ  
**Tez Yöneticisi** : Doç. Dr. Halil AYKUL

**ELASTO-PLASTIC STRESS ANALYSIS OF STEEL FIBRE  
REINFORCED ALUMINIUM METAL MATRIX COMPOSITE PLATES  
(M.Sc. Thesis)**

**Alper ATMACA**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
May 2006**

**ABSTRACT**

This study consists of three stages. First of all, metal matrix composite structure is obtained. Aluminium is used as matrix material and steel is used as fibre material in the composite structure. Steel fibres are uniaxially oriented on the matrix. Epoxy resin is used to form a bound between matrix and fibre. Composite structure is annealed in the furnace at 80 °C for an hour to harden the resin. This manufacturing method is more simple than hot pressing. In this method, high affinity of aluminium to oxygen doesn't cause a disadvantage. Afterwards, engineering constants and mechanical properties of the composite structure is obtained with simple tension tests. Tensile strength of the composite material is increased with the increasing fibre ratio. The tests show that resin has no contribution in the strength of composite material, but it is a very effective adhesive. Finally, elasto-plastic stress analysis is realised with ANSYS packet program. In the study, elasto-plastic stress analysis is carried out for symmetric cross-ply  $(0/90^\circ)_2$  and angle-ply  $(15/-15^\circ)_2$ ,  $(30/-30^\circ)_2$ ,  $(45/-45^\circ)_2$ , steel fibre reinforced aluminium metal matrix composite laminated plates. The symmetrical laminated plates are simply supported from all its edges. Tsai-Hill theory is used in the analysis for yield criterion. Furthermore, stress-

strain diagrams of hot pressed composite material are presented in the appendix section.

**Science Code : 914.1.073**

**Key Words : Composite material, elasto-plastic stress analysis,  
epoxy resin, finite element method, ANSYS**

**Page Number : 106**

**Advisers : Yrd. Doç. Dr. O. Selim TÜRKBAS**

**Advisers : Doç. Dr. Halil AYKUL**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bana yol gösteren tez danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. O.Selim TÜRKBAŞ ve Doç. Dr. Halil AYKUL'a, yardımlarını esirgemeyen dostlarım Araş. Gör. M. Emin ERDİN'e, Araş. Gör. İbrahim BİLİCİ 'ye, Araş. Gör. Cengiz BAYKASOĞLU'na ve çalışmalarım boyunca bana destek olan aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                   | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                                        | iv           |
| ABSTRACT .....                                                                    | vi           |
| TEŞEKKÜR.....                                                                     | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                 | ix           |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                         | xii          |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                           | xiii         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                     | xiv          |
| 1. GİRİŞ .....                                                                    | 1            |
| 2. KOMPOZİT MALZEMELER .....                                                      | 6            |
| 2.1. Tanımı ve Özellikleri .....                                                  | 6            |
| 2.2. Klasik Laminasyon Teorisi .....                                              | 6            |
| 2.3. Anizotropik Malzemeler İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıkları .....      | 7            |
| 2.4. Ortotropik Malzemelerde Düzlem Gerilme .....                                 | 12           |
| 2.5. Keyfi Tabakalı Kompozit Malzemede Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıkları..... | 15           |
| 2.6. Bileşke Kuvvetler ve Momentler .....                                         | 19           |
| 3. MEKANİK ÖZELLİKLERİN BULUNMASI.....                                            | 25           |
| 3.1. Malzeme Bilgisi .....                                                        | 25           |
| 3.1.1. Matriks malzemesi .....                                                    | 25           |
| 3.1.2. Fiber malzemesi.....                                                       | 26           |
| 3.1.3. Epoksi reçine .....                                                        | 27           |

**Sayfa**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. Kompozit Yapının Elde Edilmesi .....                           | 28 |
| 3.2.1. Kritik fiber hacmi.....                                      | 29 |
| 3.3. Malzeme sabitleri ve mekanik özelliklerinin bulunması .....    | 31 |
| 3.3.1. $E_1$ 'in bulunması.....                                     | 31 |
| 3.3.2. Poisson oranının bulunması .....                             | 33 |
| 3.3.3. $E_2$ 'nin bulunması .....                                   | 34 |
| 3.3.4. $G_{12}$ Kayma modülünün bulunması .....                     | 36 |
| 3.3.5. Normal gerilmelerin bulunması.....                           | 37 |
| 3.3.6. Kayma Gerilmesinin bulunması.....                            | 38 |
| 3.3.7. k ve n değerlerinin bulunması .....                          | 38 |
| 4. ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ .....                             | 41 |
| 4.1. Giriş .....                                                    | 41 |
| 4.2. Akma Kriterleri .....                                          | 41 |
| 4.2.1. Tsai-Hill teorisi.....                                       | 42 |
| 4.2.2. Tsai-Wu teorisi .....                                        | 44 |
| 4.3. Başlangıç Gerilmesi Metodu .....                               | 45 |
| 4.4. Sonlu Elemanlar Metodu.....                                    | 48 |
| 4.4.1. Giriş.....                                                   | 48 |
| 4.4.2. Sonlu elemanlar metodunun plak analizinde kullanılması ..... | 49 |
| 4.5. ANSYS Bilgisayar Programı.....                                 | 55 |
| 4.5.1. Giriş.....                                                   | 55 |
| 4.5.2. Elasto-plastik gerilme analizi .....                         | 56 |
| 5. SONUÇLAR .....                                                   | 58 |

|                                                          | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| 6. KAYNAKLAR .....                                       | 60           |
| EKLER .....                                              | 63           |
| EK-1 Gerilme-gerinme diyagramları.....                   | 64           |
| EK-2 ANSYS'te yapılan analize ait ekran görüntüleri..... | 73           |
| EK-3 Maksimum ve minimum gerilmeler.....                 | 97           |
| EK-4 Belirli noktalara göre gerilmeler.....              | 99           |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                           | 106          |
| .                                                        |              |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Love notasyonu.....                                                       | 8     |
| Çizelge 3.1. Matriks malzemesinin kimyasal özellikleri .....                           | 26    |
| Çizelge 3.2. Matriks malzemesinin mekanik özellikleri.....                             | 26    |
| Çizelge 3.3. Fiber malzemesinin mekanik özellikleri .....                              | 26    |
| Çizelge 5.1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve mühendislik<br>sabitleri ..... | 55    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Eksen takımları arasındaki ilişki.....                                           | 15    |
| Şekil 2.2. Bir plağa etkiyen kuvvet ve momentler.....                                       | 21    |
| Şekil 3.1. Metal matriksli kompozit malzemenin yapısı .....                                 | 29    |
| Şekil 3.2. Matriks ve fiberin gerilme-gerinme ilişkisi .....                                | 30    |
| Şekil 3.3. $E_1$ için yükleme yöntemi .....                                                 | 32    |
| Şekil 3.4. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak $E_1$ 'in<br>değişimi.....        | 32    |
| Şekil 3.5. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak poisson<br>oranının değişimi..... | 33    |
| Şekil 3.6. $E_2$ için yükleme yöntemi .....                                                 | 34    |
| Şekil 3.7. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak<br>$E_2$ 'nin değişimi.....       | 35    |
| Şekil 3.7 Kompozit malzemede kayma ve dönme.....                                            | 36    |
| Şekil 3.9. Çekme deney numunesi.....                                                        | 37    |
| Şekil 3.10. Kayma gerilmesi için numune .....                                               | 38    |
| Şekil 3.11. $\sigma$ ve $\epsilon_p$ değerleri .....                                        | 39    |
| Şekil 3.12. $\log(\sigma/\sigma_0)$ - $\log \epsilon$ grafiği.....                          | 40    |
| Şekil 4.1. Tek yönlü fiber takviyeli bir tabaka ve asal koordinat eksenleri ....            | 42    |
| Şekil 4.2. Başlangıç gerilmesi metodu .....                                                 | 43    |
| Şekil 4.3. Yükleme şekli .....                                                              | 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                             |
| $\sigma$             | Normal gerilme                           |
| $\sigma_y, \sigma_0$ | Akma gerilmesi                           |
| $\epsilon$           | Şekil değiştirme                         |
| $\nu$                | Poisson oranı                            |
| $\gamma$             | Kayma şekil değiştirme                   |
| $\tau$               | Kayma gerilmesi                          |
| $h$                  | Plaka kalınlığı                          |
| $\Pi$                | Toplam potansiyel enerji                 |
| $k$                  | Şekil değiştirme sertleşmesi parametresi |
| $K_x, K_y, K_z$      | x, y, z yönündeki eğrilikler             |
| $K_b$                | Eğilme rijitlik matrisi                  |
| $K_s$                | Kayma rijitlik matrisi                   |
| $M$                  | Eğilme momenti                           |
| $n$                  | Şekil değiştirme sertleşmesi üssü        |
| $N_x, N_y, N_{xy}$   | Kuvvet bileşenleri                       |

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklama</b>                                             |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|
| $Q_{ij}$        | Rijitlik dönüşümü                                           |
| $S$             | Kayma gerilmesi                                             |
| $S_{ij}$        | Uygunluk matrisi                                            |
| $[\tau]$        | 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- eksen yönündeki şekil değiştirme alanı                   |
| $X$             | $0^\circ$ 'de akma mukavemeti                               |
| $Y$             | $90^\circ$ 'de akma mukavemeti                              |
| $z_k$           | Referans düzleminin k. tabakanın üst yüzeyine olan uzaklığı |
| $z_{k-1}$       | Referans düzleminin k. tabakanın alt yüzeyine olan uzaklığı |
| $d\lambda$      | Plastik çarpan                                              |

## 1.GİRİŞ

Son yüzyılda teknolojinin gelişimi büyük bir ivme kazanmıştır. Doğadan elde edildiği halde kullanılan malzemeler bu gelişime ayak uyduramamış ve malzeme konusunda yeni arayışlar zorunluluk halini almıştır. Gelişen teknolojinin malzeme ihtiyacını karşılayabilmek için iki yada daha fazla malzemenin makro seviyede birleştirilmesi ile oluşan ve kendisini oluşturan malzemelerin üstün özelliklerine sahip karma bir yapı geliştirilmiştir. Kompozit olarak adlandırılan bu karma yapının çeşitleri ve kullanım alanları hızla artmaktadır.

Metal matriksli kompozitler; yüksek mukavemet, aşınma ve korozyon direnci, yorulma ömrünün uzun olması, düşük yoğunluk ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda korumalarından dolayı geniş uygulama alanına sahiptirler. Günümüzde kompresörler, diskler, pervaneler, vanalar, jet motoru rotorları metal matriksli kompozitlerden başarılı olarak üretilebilmektedir. Silisyum karbür parçacık takviyeli alüminyum (SiCp/Al) kompozitleri tenis racketleri ve golf sopalarının yapımında kullanılmakta olup motor parçaları ve pistonların üretiminde ise daha çok silisyum karbür kılcal kristal (whisker) takviyeli alüminyum (SiCw/Al) kompozitleri kullanılmaktadır. Uçak kanatları panelleri içinde silisyum karbür kılcal kristal (SiCw) takviyeli alüminyum kompozitler kullanılarak %20-40 arasında hafiflik sağlanmaktadır. Metal matriksli kompozitlerin uçak iskeletleri ve gövdesinin yapımında kullanılması ile de benzer azalmalar elde edilmektedir. Tek silindirli dizel motorlarında kullanılan dökme demir silindirli döküm alüminyum grafit kompozit pistonlar, yakıt tüketimini ve sürtünmeden kaynaklanan güç kaybını azaltmaktadır. Daha düşük yoğunluğu nedeniyle alüminyum-grafit kompozitler içten yanmalı motorların toplam ağırlığını da azaltmaktadır. Olta ve tenis racketlerinin yapımında karbon fiber takviyeli kompozitler tercih edilmektedir. Ayrıca diğer mühendislik malzemelerine göre daha yüksek mekanik sönümlene özellikleri nedeniyle uzay mekiği yapımında da metal matriksli kompozitler kullanılmaktadırlar. Gaz türbini ve uçak motorlarının kompresör pervanesi ve



disklerinin yapımında, yüksek sıcaklık direnci nedeniyle titanyum esaslı kompozitler kullanılmaktadır. Uçak sanayiinde, piston, buji kolları ve yayların yapımında ise düşük yoğunluğu, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek rijitlik özelliğinden dolayı magnezyum esaslı kompozitler tercih edilmektedir. Bunun yanısıra dayanım/özellik ağırlık ve elektrik iletkenliği/özellik ağırlığı oranlarının yüksek olması atmosfere ve diğer ortamlara karşı yüksek korozyon direnci göstermeleri nedeniyle Al esaslı kompozitler çok yaygın kullanım alanına sahiptirler [1].

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 [2,3].

Asal malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile tabakalı kompozitlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Tabakalı kompozitler matriks içerisine rastgele yönelmiş fiberler, tek yönlü fiberler veya farklı fiber takviyeli tabakalardan oluşabilir. Tabakalı kompozit plakların elastik gerilme analizi için klasik laminasyon teorisinden yararlanılır.

Sayman (1998), 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 [4].

Daining vd. (1996), metal matriksli kompozit malzemelerin elasto-plastik gerilme-şekil değıştirme davranışlarını sonlu eleman metodu kullanarak araştırmışlardır [5].

Arslan ve Kaman (2002), polyester reçine kullanılan alüminyum matriksli petek yapılı kompozitlerin üretim teknikleri ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır [6].

Akbulut ve Sayman (2001), yaptıkları çalışmada ortasında karesel boşluk bulunan kompozit plakaların düzlem-içi yükler altındaki burkulma davranışını incelemişlerdir. Değişik yükleme şartları, sınır şartları ve plaka kalınlıkları için sonlu eleman metodu kullanarak gerçekleştirdikleri analizler sonucu tek eksenli basmada en yüksek dayanım elde edildiğini tespit etmişlerdir [7].

Sayman vd. (2002), yaptıkları çalışmada çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriksli kompozit plakaların elasto-plastik davranışını Değıştirilmiş 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 [8].

Aykul vd. (2000), 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 [9].

Karakuzu ve Özcan (1996), yaptıkları çalışmada tekil dik yüklü metal matriksli bir kompozit kirişin elasto-plastik gerilme analizini analitik yöntemle Tsai-Hill kriterine göre gerçekleştirmişlerdir [10].

Karakuzu vd. (2001), yaptıkları çalışmada ortasında dairesel boşluk bulunan çelik fiber takviyeli termoplastik tabakalı plakaların statik düzlem-içi yükleme şartlarında elasto-plastik davranışını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre tabakalı plakaların yük taşıma kapasitesi tabakaların aynı doğrultuda tekrar yüklenmesi neticesinde artmaktadır [11].

Kaya vd. (2002), yaptıkları çalışmada malzemeler üzerine açılan deliklerin sıcaklık değişimlerinden doğan gerilmeleri ne şekilde etkilediğini analitik yöntem ve sonlu eleman metodu kullanarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre delik çapı arttıkça maksimum gerilmeler düşmekte ve levhanın iç bölgelerine doğru yayılmaktadır [12].

Güldü vd. (2003), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerde gerilme konsantrasyonunu incelemişler ve takviye doğrultusunda gerilme konsantrasyon değerinin en küçük olduğunu tespit etmişlerdir [13].

Sayman (2004), yaptığı çalışmada alüminyum metal matriksli ve boşluklu bir ortotropik diskin termal gerilme analizini analitik olarak ve sonlu eleman metodu kullanarak gerçekleştirmiş ve iki yöntem arasında uyumlu sonuçlar elde etmiştir [14].

Arslan vd. (1999), yaptıkları çalışmada eksenel yüklü çentikli kompozit levhada elasto-plastik gerilme analizi gerçekleştirmişlerdir [15].

Sayman ve Aykul (2001), 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 [16].

Yapılan bu çalışmanın amacı; Kompozit malzemelerin plastik davranışını tespit etmektir. Plastik davranış tarzını bulabilmek için sonlu elemanlar metodu ve ANSYS bilgisayar programı kullanılarak elasto-plastik gerilme

analizi yapılmıştır. Elasto-plastik gerilme analizi için gerekli verileri elde edebilmek için kompozit malzeme üretilmiş ve basit çekme deneyi yapılmıştır. Ayrıca kompozit malzeme, sıcak presleme ve reçineli olmak üzere iki farklı metotla üretilmiş ve bu metotlar arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Bu çalışmada öncelikle metal matrisli kompozit yapı elde edilmiştir. Matris malzemesi alüminyum, takviye malzemesi de çelik teldir. Matris ve takviye fazlar arasında bağ oluşturmak için epoksi reçine kullanılmıştır.

Daha sonra çekme deneyi yapılarak, kompozit yapının mekanik özellikleri ve mühendislik sabitleri bulunmuştur.

En son olarak ta sonlu elemanlar metodu ve ansys bilgisayar paket programı kullanılarak elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Akma kriteri olarak Tsai-Hill teorisi kullanılmıştır.

## **2. KOMPOZİT MALZEMELER**

### **2.1. Tanımı ve Özellikleri**

Kompozit malzeme, iki yada daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro seviyede birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler olarak adlandırılır. Bir kompozit malzeme genellikle düşük dayanıma sahip reçine veya metalik matriks ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır.

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matriks malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak, kısa ve uzun elyaflar, kılcal kristaller ve parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matriksin rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Matriksin fonksiyonu ise takviye elemana yük ve gerilimi iletmek ve takviye elemanı bir arada tutmaktır. Ayrıca matriks fazı, takviye elemanı çevresel etkilerden de korur.

Kompozit malzemeler genellikle matriks malzemesine göre plastik, metal ve seramik matriksli olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Ayrıca takviye elemanlarına görede kompozit malzemeler, elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı olmak üzere gruplandırılabilir.

Kompozit malzemelerde, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzemede toplanması önemli avantaj meydana getirir.

### **2.2. 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 [4,5]:

- 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 sürekli.
- Düzlemsel yer değiştirmeler plak kalınlığı boyunca lineer olarak değişir. Yani x ve y yönlerindeki u ve v yer değiştirmeleri z'in lineer fonksiyonudur.
- Şekil değiştirme-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri lineerdir.
- Plağın orta düzlemine dik düzlem, plak şekil değiştirse dahi orta düzlem dik kalır. Yani orta düzlem dik düzlemlerde kayma olmaz.

### 2.3. Anizotropik Malzemeler İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıları

Bütün doğrultularda özellikleri birbirinden farklı olan malzemeler anizotropik olarak tanımlanır. Bu hal malzemeler için en genel haldir. Anizotropik malzemelerde genelleştirilmiş Hooke kanunu gerilme-şekil değiştirme bağıntıları şu şekilde yazılabilir [6].

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

Burada  $\sigma_{ij}$  gerilme tansörü ,  $\epsilon_{kl}$  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

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

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 Değişirme                               |                      |
|-----------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------|
| Tansör Notasyonu                        | Kısaltılmış Notasyon | Tansör Notasyonu                              | Kısaltılmış Notasyon |
| $\sigma_{11}$                           | $\sigma_1$           | $\epsilon_{11}$                               | $\epsilon_1$         |
| $\sigma_{22}$                           | $\sigma_2$           | $\epsilon_{22}$                               | $\epsilon_2$         |
| $\sigma_{33}$                           | $\sigma_3$           | $\epsilon_{33}$                               | $\epsilon_3$         |
| $\tau_{23} = \sigma_{23} = \sigma_{32}$ | $\sigma_4$           | $\gamma_{23} = \gamma_{32} = 2 \epsilon_{23}$ | $\epsilon_4$         |
| $\tau_{31} = \sigma_{31} = \sigma_{13}$ | $\sigma_5$           | $\gamma_{31} = \gamma_{13} = 2 \epsilon_{31}$ | $\epsilon_5$         |
| $\tau_{12} = \sigma_{12} = \sigma_{21}$ | $\sigma_6$           | $\gamma_{12} = \gamma_{21} = 2 \epsilon_{12}$ | $\epsilon_6$         |

Gerilme-şekil değişirme 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 değişirme 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;

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_4 = \gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \varepsilon_5 = \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \\ \varepsilon_6 &= \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\end{aligned}\quad (2.5)$$

şeklindedirler. 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  $\sigma_i$  gibi bir gerilme bu malzemede  $d\varepsilon_i$  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;

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

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

$$dw = C_{ij}\varepsilon_j d\varepsilon_i \quad (2.7)$$

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

$$w = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_j \varepsilon_i \quad (2.8)$$

veya farklı bir yaklaşımla;

$$w = \frac{1}{2} C_{ji} \varepsilon_i \varepsilon_j \quad (2.9)$$



olarak elde edilir. Burada görüldüğü gibi şekil değiştirme enerjisi elastik malzemenin tamamı için iki farklı denklemlerle ifade edilebilir. Bu farklı denklemlerin ayrı ayrı kısmi türevleri alınır 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;

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

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.

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

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

Aynı işlemlerle  $S_{ij}$  elastiklik matrisinde  $C_{ij}$  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:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

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

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.

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

Elastiklik matrisi de benzer şekilde yazılabilir:

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

#### 2.4. 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 [6].

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

ortotropik malzemelerde şekil değiştirmeler Eş. 2.21'den yazılırsa,

$$\epsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 \quad (2.22)$$

denklemini düzlem gerilme hali için,

$$\gamma_{12} = \epsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2$$

$$\gamma_{23} = \epsilon_4 = S_{44}\sigma_4 = S_{44}\tau_{23} = 0 \quad (2.23)$$

$$\gamma_{13} = \epsilon_5 = S_{55}\sigma_5 = S_{55}\tau_{13}$$

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

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

Eş. 2.24'de elastiklik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilmek istendiğinde,

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

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.25)$$

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

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

Eş. 2.25'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:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

Burada rijitlik matrisinin elemanları elastiklik matrisinin elemanları cinsinden,

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{12} - S_{12}^2} & Q_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\
Q_{12} &= \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} & Q_{66} &= \frac{1}{S_{66}}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

veya aynı elemanlar mühendislik sabitleri cinsinden,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \tag{2.28}$$

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,

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \tag{2.29}$$

şeklinde yazılabilir. Burada elemanlar;

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

Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ise;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \tag{2.30}$$

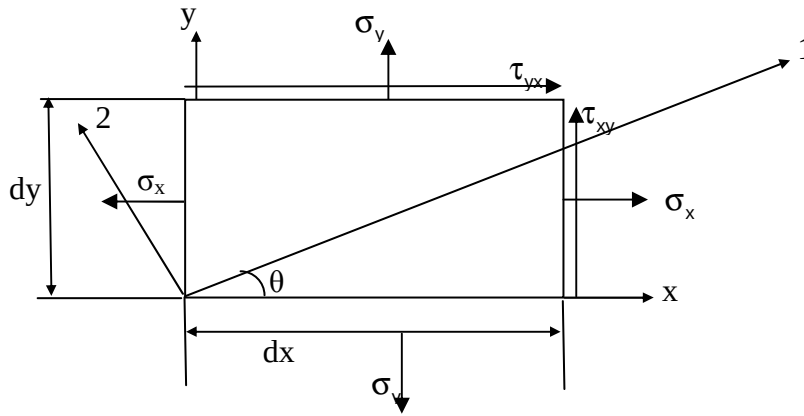
şeklinde yazılabilir. Buradaki elemanlarda Eş. 2.25 ve Eş. 2.28'den yararlanılarak elde edilebilir.

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

$$Q_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad , \quad Q_{12} = \frac{\nu E}{1-\nu^2} \quad , \quad Q_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.31)$$

## 2.5. Keyfi Tabakalı Kompozit İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Bağlılıları

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



Şekil 2.1. 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:

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

$$\tau_{12} = \sigma_x (\sin \theta \cos \theta) + \sigma_y (\sin \theta \cos \theta) + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2.32)$$

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

Bu denklemden faydalananarak  $[T]$  transformasyon matrisi,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.34)$$

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

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  $\theta$  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:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.35)$$

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

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

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} \quad (2.38)$$

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

1, 2 ve x, y eksenlerinin birbirleri ile çakışır durumda bulunması halinde Eş. 2.35'deki  $[T]^{-1}$  denklemi ile de şekil değiştirmeler cinsinden ifadesi yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

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



$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.40)$$

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

$$= [T]^{-1} [Q] [R] [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.41)$$

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

$$[R][T][R]^{-1} = [T]^T \quad (2.42)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.43)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

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:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.45)$$

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. 2.24'ü başlangıç olarak alıp;

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^T [S] [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.47)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{26} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

ifadesi basamak basamak yapılacak işlemle bulunur. Burada;

$$[R] [T]^{-1} [R]^{-1} = [T]^T \quad (2.49)$$

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

## 2.6. Bileşke kuvvetler ve momentler

Tabakalı bir plaktaki gerilmeler her tabakada farklıdır. Bu nedenle bir plâğın kesitine etkiyen kuvvet ve momentleri eşdeğer bir sistemle ele almak daha

uygundur. Bir plağa etkiyen bileşke kuvvetler her bir tabakadaki gerilmelerin plak kalınlığı boyunca integre edilmesi ile elde edilir [20].

$$N_x^k = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_x)_k dz \right\}$$

$$N_y^k = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_y)_k dz \right\} \quad (2.50)$$

$$N_{xy}^k = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\tau_{xy})_k dz \right\}$$

Benzer olarak bileşke momentler ise tabakadaki gerilmelerin tabakanın orta düzleme olan uzaklığıyla çarpımının plak kalınlığı boyunca integre edilmesi ile bulunur.

$$M_x^k = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_x)_k z dz \right\}$$

$$M_y^k = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\sigma_y)_k z dz \right\} \quad (2.51)$$

$$M_{xy}^k = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} (\tau_{xy})_k z dz \right\}$$

Burada  $h$ =plak kalınlığı

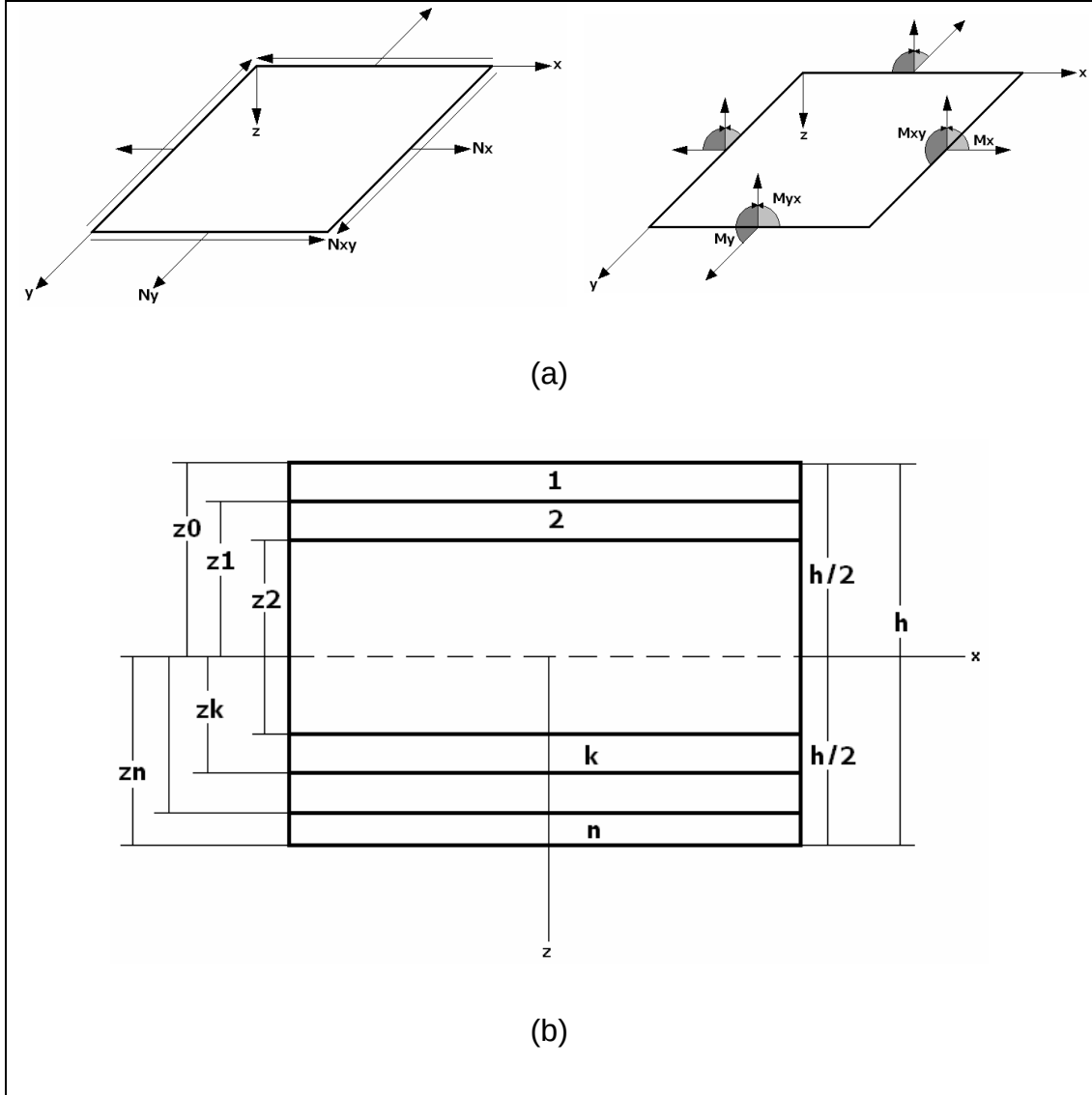
$N_x^k$  ,  $N_y^k$  =plak enine kesitinin birim genişliği başına etkiyen normal kuvvetler

$N_{xy}^k$  =plak enine kesitinin birim genişliği başına etkiyen kayma kuvveti

$M_x^k$  ,  $M_y^k$  = birim genişlik başına etkiyen eğilme momentleri

$M_{xy}^k$  = birim genişlik başına etkiyen burulma momentleri

$z_k$  ve  $z_{k-1}$  = k. tabakaya ait z doğrultusundaki kalınlık koordinatlarıdır.



Şekil 2.2. (a) Bir plağa etkiyen bileşke kuvvet ve momentler  
(b) n tabakalı bir plağın geometrisi

Tabakalı bir plak için toplam kuvvet ve moment bileşenleri her bir tabakanın kuvvet ve momentlerinin toplamından elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (2.52)$$

Eş. 2.52 , Eş. 2.45'de yerine yazılırsa bileşke kuvvet ve momentler,

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

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (2.53)$$

olarak elde edilir.  $\bar{Q}$  rijitlik matrisi bir tabaka için sabit olduğundan dolayı integral dışına alınabilir. Ayrıca  $\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, K_x, K_y$  ve  $K_{xy}$  orta düzleme ait değerlerdir ve z'nin fonksiyonu değildirler. Bu nedenle bu değerler sadece bir tabaka için değil bütün tabakalar için sabit kalacağından toplam işareti dışına alınabilir:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{z_{k-1}}^{z_k} dz \right] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{z_{k-1}}^{z_k} z dz \right] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{z_{k-1}}^{z_k} z dz \right] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \\
&+ \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{z_{k-1}}^{z_k} z^2 dz \right] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.54)
\end{aligned}$$

Bu bağıntıyı A, B ve D matrisleri yardımıyla daha basit bir şekilde aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \\
\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.55)
\end{aligned}$$

Burada,

$A_{ij}$ = uzama rijitliği

$B_{ij}$ = birleşme rijitliği

$D_{ij}$ = eğilme rijitliği ve  $i, j = 1, 2, \dots, 6$

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1})$$

$$B_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2.56)$$

Şeklinde tanımlanır. Kuvvet ve moment bileşenleri matris şeklinde;

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.57)$$

olarak yazılabilir. Eş. 2.53'den görüldüğü gibi  $[A]$  uzama rijitliği,  $[N]$  düzlemsel kuvvetleri ile orta düzleme ait  $\{\epsilon^0\}$  şekil değiştirmeleri arasında,  $[D]$  eğilme rijitliği de  $[M]$  momentleri ile  $\{K\}$  eğrilikleri arasında bağıntı kurar.  $[B]$  birleşme rijitliği ise  $[N]$  düzlemsel kuvvetleri ile  $\{K\}$  eğriliklerini ve  $[M]$  momentleri ile  $\{\epsilon^0\}$  orta düzleme ait şekil değiştirmeleri birleştirir. Dolayısıyla  $[B]$  matrisi eğilme ile uzama arasındaki ilişkiyi temsil eder.

### **3. METAL MATRİKSLİ KOMPOZİTİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BULUNMASI**

#### **3.1. Malzeme Bilgisi**

Kompozit malzeme; İki yada daha fazla farklı malzemenin makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan yapıdır. Bu yapı genel olarak matriks ve fiber olmak üzere iki fazdan oluşur. Matriks ve fiberin birbiriyle uyumlu malzemelerden seçilmesi gerekir. Bu çalışmada matriks malzemesi olarak alüminyum ve fiber olarakta çelik tel kullanılmıştır. Ayrıca fiber ve matriks arasında bağ oluşturmak amacıyla epoksi reçine kullanılmıştır.

##### **3.1.1. Matriks malzemesi**

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, ıkhıme dayanıklılık, iyi ısı iletkenliğı, soğukta şekil değıştirme kabiliyeti gibi iyi özelliklerinin yanı sıra, düşük mukavemet, bazık 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 diğerk etkilerden 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 paketleme malzemesi olarak, mutfak ve ev aletlerinde, kablolarda, kondansatörlerde, kaplama malzemesi olarak ve alüminyum boyalarda kaplama olarak kullanılır [10].



Özel tasarımlar için alüminyum alaşımları da geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmada kullanılan matriks malzemesinin kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıda Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Matriks malzemesinin kimyasal özellikleri

| 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) | $\delta 5(\%)$ | $\rho$ (gr/dm <sup>3</sup> ) |
|--------|--------|--------|--------|----------------|------------------------------|
| 104    | 104    | 70     | 26     | 30-38          | 2.7                          |

### 3.1.2. Fiber malzemesi

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. Kullanılan malzeme çekme dayanımı 1000 Mpa olan bisiklet fren telidir. Çelik tel ince tellerin üst üste sarılması ile elde edilmiştir. Sonuçlar bölümünde verilen çelik tel’ e ait çekme eğrisinin zikzaklı olmasının sebebi çekme sırasında ince tellerin tek tek kopmasıdır.

Çizelge 3.3. Fiber malzemesinin mekanik özellikleri

| X(MPa) | Y(MPa) | E(GPa) | $\rho$ (gr/dm <sup>3</sup> ) |
|--------|--------|--------|------------------------------|
| 675    | 675    | 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 [6].

Bu çalışmada kullanılan reçine Paksoy marka epoksi reçinedir. Kullanılan reçine solvent içermeyen epoksi esaslı , iki komponentli bir yapıştırıcıdır.

Polistren blokların, yüzeylerin, sac, ahşap ve polyester satırlara çok iyi yapışmasını sağlar. İki komponentlidir. 50/50 oranında karıştırılır. Karışımın yoğunluğu  $1,50 \frac{gr}{cm^3}$  (20 °C 'de), viskozitesi 7500-10500 m.Pas dır.200 gr lık karışımın 20 °C 'de ömrü 60 ile 100 dakika arasındadır. Oda sıcaklığında tam sertleşme süresi ise yaklaşık 1 haftadır.

#### Avantajları

- 1.Solvent içermez
- 2.Yüksek darbe mukavemetine sahiptir.
3. İyi yapıştır
4. A ve B bileşenlerinin yoğunluğu aynı olduğundan kullanım kolaylığı sağlar.

Bu çalışmada reçine şu şekilde uygulandı. Oda sıcaklığında A ve B bileşenleri ayrı ayrı kendi ambalajında karıştırıldı. Ayrı bir kaba eşit miktarda A ve B bileşenleri konarak tekrar karıştırıldı (yaklaşık 3 dakika). Yapıştırılacak

yüzeyler temizlendi. Üretici firma tavsiyelerine uygun hazırlanmış karışım, yüzeylere sürülerek yapıştırma işlemi gerçekleştirildi.

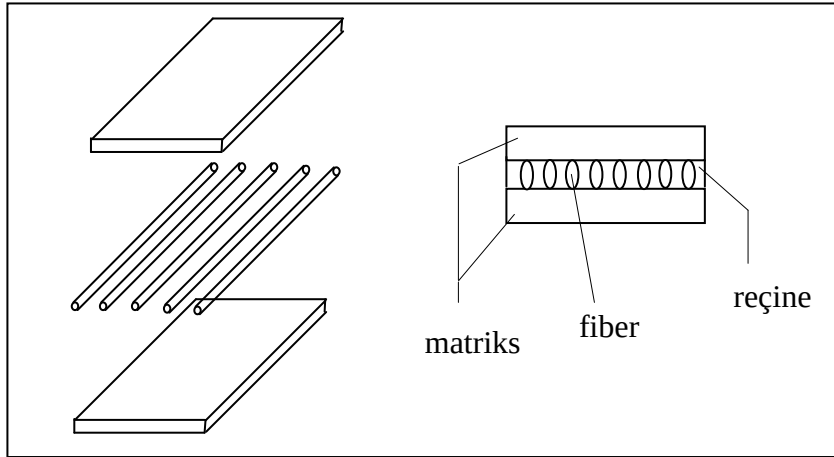
### 3.2. Kompozit Yapının Elde Edilmesi

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında üstün mekaniksel özelliklere sahip oluşu son yıllarda bunların üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Fakat bu kompozitlerin üretim maliyeti hala çok yüksek ve problemler mevcuttur. Yüksek teknolojilere ulaşmak ancak çok özel kabiliyetleri olan malzemelerin bulunması ve üretilmesi ile mümkündür. Genellikle metal matriksli kompozit malzemelerin üretiminde alüminyum, magnezyum, çinko ve nikel gibi malzemeler matriks olarak kullanılırken, silisyum karbür, grafit, alüminyum oksit ve tungsten gibi malzemeler de takviye olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzeme üretilirken birbirleri ile uyumlu malzemelerin seçimi kadar uygun üretim metodu seçimi de önemlidir [1].

Metal matriksli kompozit üretim metodlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır.

1. Sıvı metal emdirmesi (infiltrasyon)
2. Sıkıştırılmalı veya dövme döküm tekniği
3. Sıvı metal karıştırılması
4. Hızlı katılaşma yöntemi
5. Yarı katı karıştırma
6. Toz metalurjisi tekniği
7. Sıcak presleme

Bu çalışmada üretim şu yöntemle gerçekleştirildi. Alüminyum levhanın üzerine epoksi reçine sürüldü ve reçine üzerine çelik tel fiberler yerleştirildi. Üzerlerine diğer alüminyum levha kondu ve yapıda hava kalmaması için el ile hafifçe bastırıldı. Daha sonra artan reçine temizlendi. Matris ve fiber arasında bağ oluşturmak için epoksi reçine 80 °C sıcaklıkta 1 saat pişirildi.



Şekil 3.1. Metal matriksli kompozit malzemenin yapısı

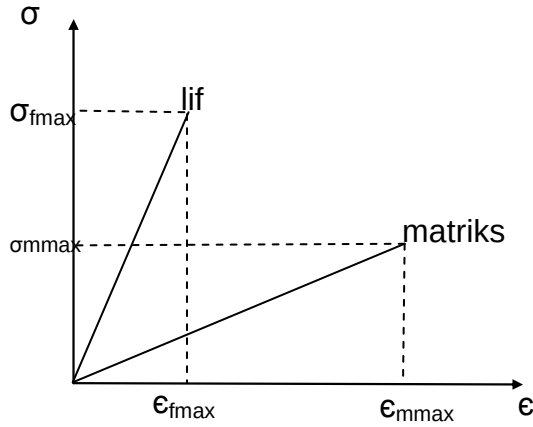
### 3.2.1. Kritik fiber hacmi

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

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

Şüphesiz kırılma limitleri üçüncü madde hiç gerçekleşmeyebilir. Benzer şekilde bir kırılma 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 kırılma limitleri olduğu durumda; Eğer lifler kompozit içinde belirli bir minimum miktardan fazla hacimsel konsantrasyona sahip ise gerilme sonucunda liflerin kendi gerilme limitlerine karşı gelen şekil değişikliklerine ulaşıldığında malzeme kırılır. Zira lifler matriksten daha kırılma limitleri, matriks kadar uzayamazlar. Böylece şekil değiştirme yönü ile lifler daha zayıf kalmaktadır



Şekil 3.2. 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.

### 3.3. Malzeme Sabitleri ve Mekanik Özelliklerin Bulunması

#### 3.3.1. $E_1$ 'in bulunması

Matriks ve lifler yükleme doğrultusunda şekilde görüldüğü gibi birleştirilmişlerse veya malzeme takviye doğrultusunda bir  $\sigma_1$  gerilmesinin etkisinde kalıyor ise, bu malzemeler seri haldedir denebilir [6]. Temel kabulde hem lifler hem de matriks aynı miktarda uzar( $\epsilon_1$ ).

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

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

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  $\sigma_1$  ile A ' nın çarpımı kadardır.

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

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

$$\sigma_f = E_f \epsilon_1$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_1$$

$$E_1 \epsilon_1 A = E_f \epsilon_1 A_f + E_m \epsilon_1 A_m \quad (3.9)$$

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

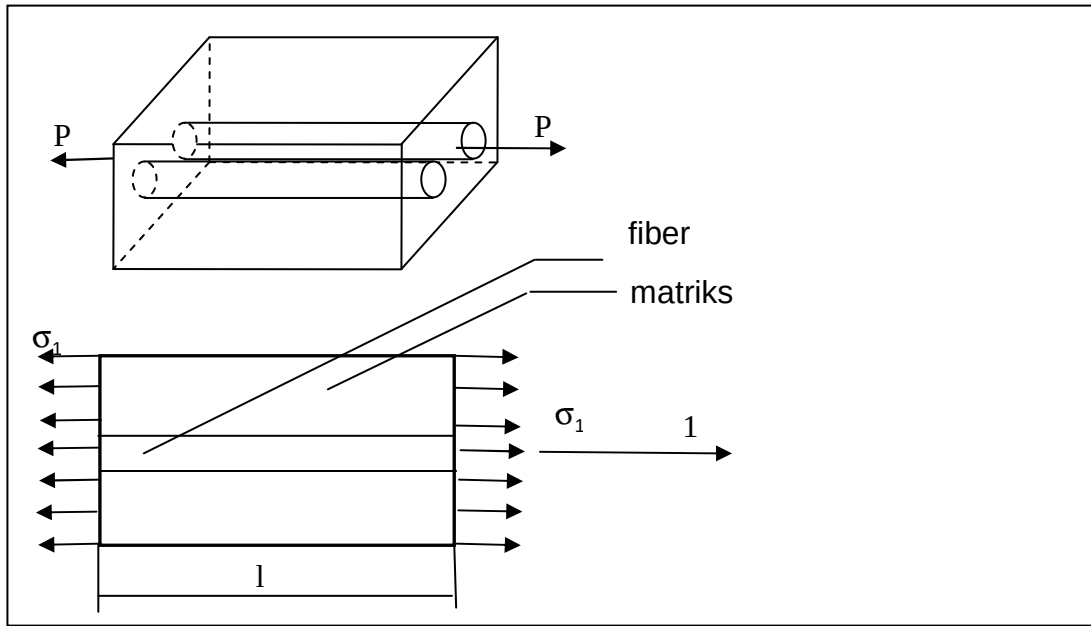
hacimsel konsantrasyon,

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

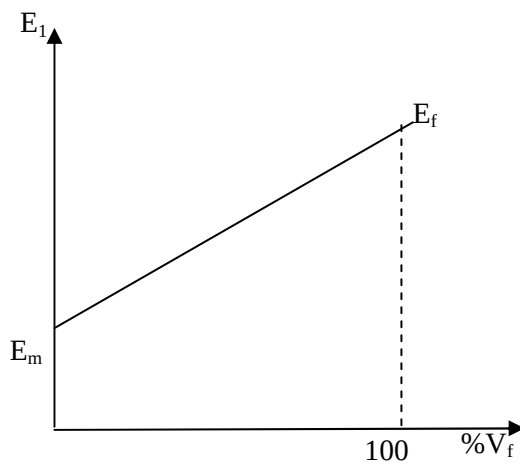
$$V_m = \frac{A_m}{A}$$

$$V_m + V_f = 1$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.11)$$



Şekil 3.3.  $E_1$  için yükleme yöntemi



Şekil 3.4. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak  $E_1$ ' in değişimi

### 3.3.2. Poisson oranının bulunması

$$v_{12} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (3.12)$$

$$\epsilon_2 = -\frac{\Delta h}{h} \quad (3.13)$$

$$h = -h\epsilon_2 = h\epsilon_1 v_{12} \quad (3.14)$$

$\Delta h$  diğer bir ifade şekli ile matriks ve fiberlerin kısaltmalarının toplamı olduğuna göre,

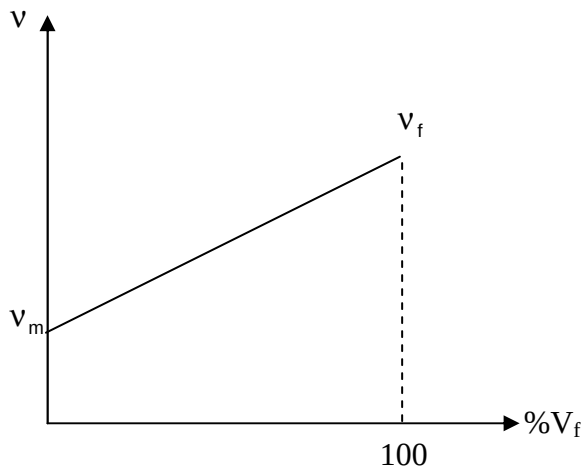
$$\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_f$$

$$\Delta h_m = hV_m \epsilon_1 v_m$$

$$\Delta h_f = hV_f \epsilon_1 v_f$$

$$h\epsilon_1 v_{12} = hV_f \epsilon_1 v_f + hV_m \epsilon_1 v_m$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (3.15)$$

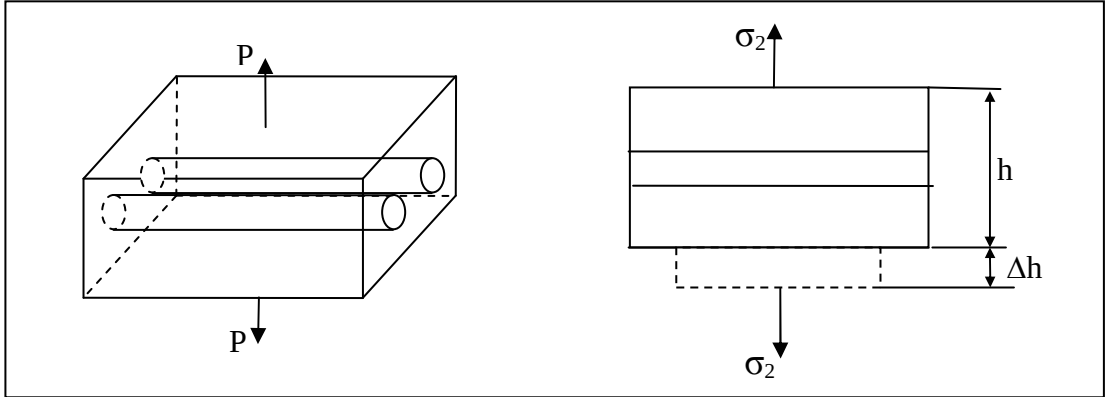


şekil 3.5. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak poisson oranının değişimi



### 3.3.3. $E_2$ 'nin bulunması

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



Şekil 3.6.  $E_2$  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.

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

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

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

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta h_f}{h_f} \Rightarrow \Delta h_f = \varepsilon_f h_f$$

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

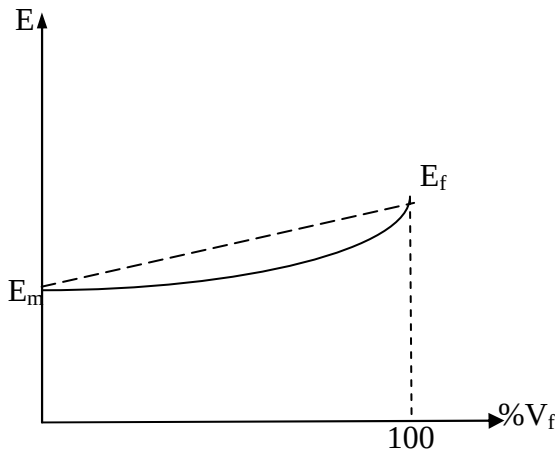
$$V_f = \frac{h_f}{h} \Rightarrow h_f = h V_f$$

$$\varepsilon_2 h = \varepsilon_m h V_m + \varepsilon_f h V_f$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$

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

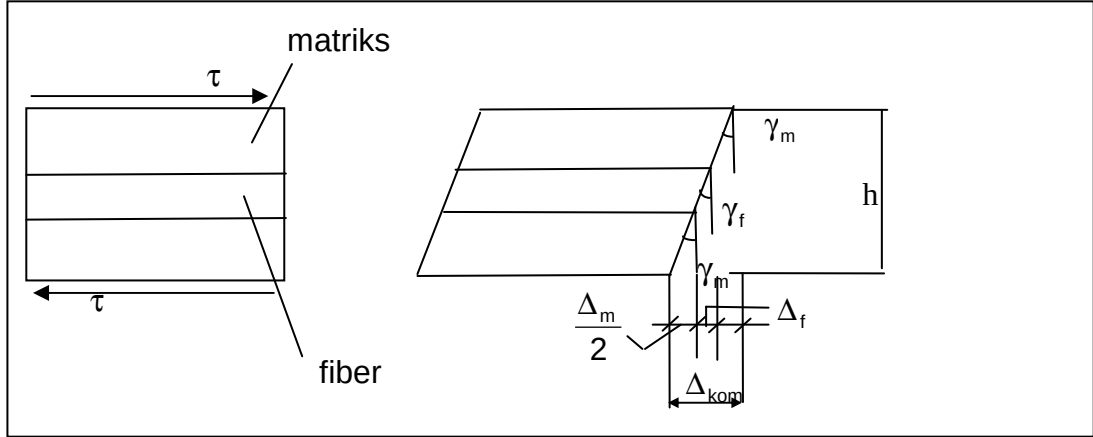
$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} V_m \quad (3.16)$$



Şekil 3.7. Fiberin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak  $E_2$ ' nin değişimi

### 3.3.4. $G_{12}$ Kayma modülünün bulunması

Kompozit malzemeden  $h$  kalınlığında ve  $L$  boyunda alınan deney parçalarına kayma gerilmeleri uygulandığında parçalar Şekil 3.8'de görüldüğü gibi değişikliğe uğrar ve  $\theta$  kadar bir dönme meydana gelir.



Şekil 3.8. Kompozit malzemede kayma ve dönme

Şekilde abartılarak çizilmiş olan dönme gerçekte çok azdır. Bu sebeple dönmeden sonra parça kalınlığının sabit kaldığı kabul edilir.  $\gamma_m$  matriksin  $\gamma_f$  fiberin  $\tau$  kayma gerilmesi altında dönme açılarıdır. Kompozit malzemeden alınan  $h$  kalınlığındaki parçalarda dönmeler çok az olduğundan dönme açılarının tanjantları raydan olarak açının kendisine eşittir.

$$\Delta_{kom} = h \cdot \gamma_{12}$$

$$\Delta_{kom} = \Delta_m + \Delta_f$$

$$\Delta_m = hV_m \gamma_m \quad , \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$

$$\Delta_f = hV_f \gamma_f \quad , \quad \gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad , \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f}$$

$$\Delta_{kom} = h\gamma_{12} = hV_m \gamma_m + hV_f \gamma_f$$

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

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

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_m} V_m + \frac{1}{G_f} V_f \quad (3.17)$$

### 3.3.5. Normal gerilmelerin bulunması

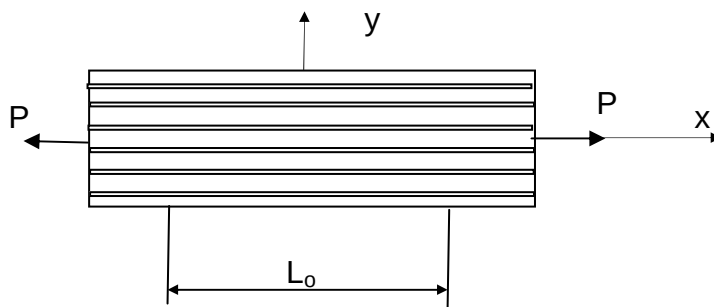
Kompozit yapının aksenal (X) ve eksene dik (Y) gerilmeleri TS 138 EN 10002-1 standardına göre alınmış numune (Şekil 3.9) ile yapılan basit çekme deneyi ile bulundu. Bulunan değerler sonuç kısmında verilmiştir.

Numune kalınlıkları 3 mm 'den büyük olduğu için ilk ölçü uzunluğu (çeneler arası mesafe)

$$L_o = k\sqrt{S_o} \quad (3.18)$$

bağıntısından bulundu.

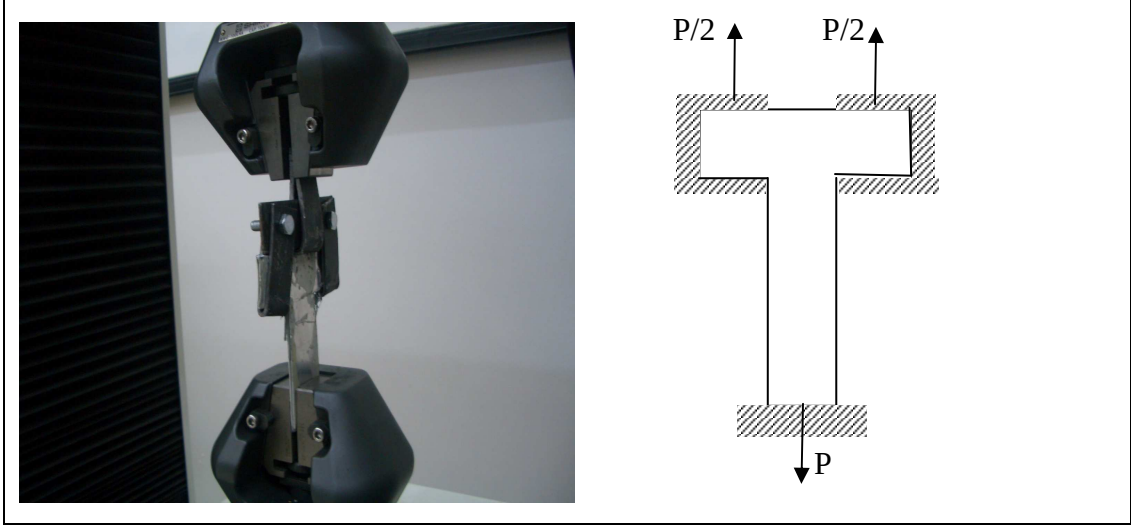
Burada k değeri 5,65 'dir.  $S_o$  ; kesit alanı ve  $L_o$ ; ilk ölçü uzunluğudur.



Şekil 3.9. 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 3.10. Kayma gerilmesinin bulunması için hazırlanan çekme deney numunesi

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.

### 3.3.7. k ve n değerlerinin bulunması

Burada k, şekil değiştirme sertleşmesi parametresi ve n, şekil değiştirme sertleşmesi üssü'dür. k ve n değerleri tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen çekme eğrisi yardımıyla bulunur.

Ludwik bağıntısı:

$\sigma = \sigma_0 + k\epsilon_p^n$  şeklindedir. Her iki tarafın kogaritması alınır

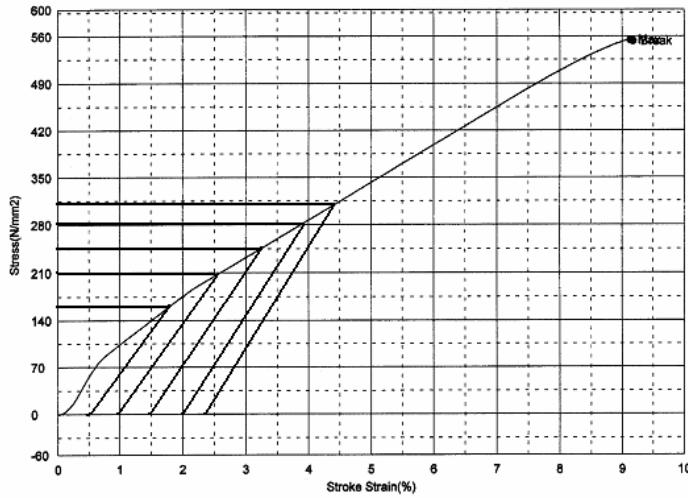
$\text{Log}(\sigma = \sigma_0 + k\epsilon_p^n)$  ve işlemler yapılırsa,

$\text{Log}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = \text{Log}k + n\text{Log}\epsilon_p$  elde edilir. Bu ifade  $y=ax+b$  ifadesine benzerdir. Bu

doğru denkleminde  $n$  eğimdir ve  $n\text{Log}\epsilon_p$  ifadesinin sıfır olduğu yerde,

$$\text{Log}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = \text{Log}k \quad (3.20)$$

olmaktadır. Böylelikle  $n$  ve  $k$  değerleri bulunmuş olur.

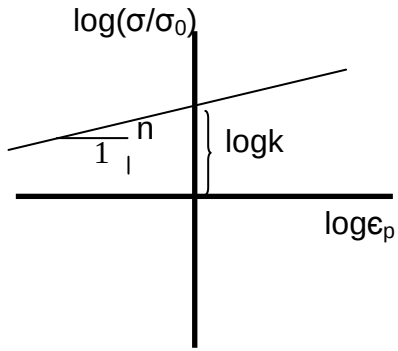


Şekil 3.11.  $\sigma$  ve  $\epsilon_p$  değerleri

Çekme eğrisinden Çizelge 3.4'deki gibi değerler elde edilir. Daha sonra bu değerlerin logaritmaları alınarak Şekil 3.12'deki gibi grafik oluşturulur.

Çizelge 3.4. Gerilme ve zorlanma değerleri

| Zorlanma         | Gerilme    |
|------------------|------------|
| $\epsilon_{p_1}$ | $\sigma_1$ |
| $\epsilon_{p_2}$ | $\sigma_2$ |
| $\epsilon_{p_3}$ | $\sigma_3$ |
| $\epsilon_{p_4}$ | $\sigma_4$ |
| $\epsilon_{p_5}$ | $\sigma_5$ |
| $\epsilon_{p_6}$ | $\sigma_6$ |
| $\epsilon_{p_7}$ | $\sigma_7$ |



Şekil 3.12.  $\log(\sigma/\sigma_0)$ -  $\log \epsilon$  grafiği

Şekil 3.12 ' den  $n$  ve  $k$  değerleri bulunabilir.

## 4. ELASTO-PLASTİK GERİLME ANALİZİ

### 4.1. Giriş

Malzemenin elasto-plastik durumu, belli bir gerilme değerine ulaşıldıktan sonra malzemenin gösterdiği davranışlar olarak karakterize edilir. Plastik deformasyonlar yük kalktıktan sonra geri dönmez.

Plastik deformasyonun (akmanın) başlangıcı bir akma kriteri tarafından belirlenir ve akma sonrası deformasyon malzeme rijitliğinin büyük bir düşüşü sonucunda meydana gelir [2, 3].

Plastik davranışlar zamana bağlı olmayan kalıcı şekil değiştirmeler olarak karakterize edilir. Bu şekil değiştirmeler malzemenin özelliğine göre belli bir gerilme değerine ulaşıldıktan sonra meydana gelir. Elasto-plastik incelemenin yapılabilmesi için üç şartın gerçekleşmesi gerekir [3]:

- a) Elastik şartlarda malzeme davranışını tarif etmek için gerilme ve şekil değiştirme arasında lineer bir ilişki olmalıdır.
- b) Plastik akmanın meydana geldiği noktada bir akma kriterinin göz önüne alınması gerekir.
- c) Akma başladıktan sonra gerilme ve şekil değiştirme arasında bir formülizasyona ihtiyaç vardır.

### 4.2. 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 olmasında 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 [6].



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.

#### 4.2.1. Tsai-Hill teorisi

İzotrop malzemeler için kullanılan Von-Mises akma teorisi [20];

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_y^2 \quad (4.5)$$

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;

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 \quad (4.6)$$

denklemleri ile ifade edilir [6]. Bu denklemler;

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

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;

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (4.7)$$

olur. Burada S kayma dayanımıdır. Benzer olarak sadece  $\sigma_1$  etki ediyorsa, diğer bütün gerilmeler sıfıra eşit olacağından Eş. 4.6;

$$G+H = \frac{1}{X^2} \quad (4.8)$$

Sadece  $\sigma_2$  etki ediyorsa;

$$F+H = \frac{1}{Y^2} \quad (4.9)$$

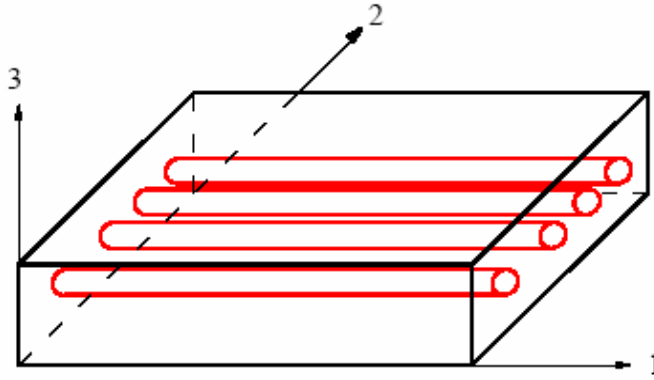
Eğer sadece  $\sigma_3$  etki ediyorsa;

$$F+G = \frac{1}{Z^2} \quad (4.10)$$

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,

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\ 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \end{aligned} \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilir [11].



Şekil 4.1. 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;

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (4.12)$$

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

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \frac{X^2}{Y^2}\sigma_2^2 + \frac{X^2}{S^2}\tau_{12}^2 = X^2 \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilebilir.

#### 4.2.2. Tsai-Wu teorisi

Bu teori anizotropik malzemeler için aşağıdaki akma formülü olarak verilmiştir.

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \quad (4.14)$$

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,

$$\begin{aligned} F_1 X_t + F_{11} X_t^2 &= 1 \\ F_1 X_c + F_{11} X_c^2 &= 1 \end{aligned} \quad (4.15)$$

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

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \\ F_{11} &= \frac{-1}{X_t X_c} \\ F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\ F_{22} &= \frac{-1}{Y_t Y_c} \\ F_6 &= 0 \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

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

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1 \quad (4.17)$$

ile ifade edilir.

### 4.3. Başlangıç Gerilmesi Metodu

Başlangıç gerilme yöntemi Zienkiewicz(1971) tarafından geliştirildi. Bu yöntemde elasto-plastik gerilme analizine başlamak için, elasto-plastik bölgelerdeki bir boyutlu çekme örneği kullanılır, daha sonra iki ve üç boyutlu gerilmelere geçilir [22].

Plastik bölgede gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Ludwik tarafından

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon_p^n \quad (4.18)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu bağıntı bir çok malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini hassas bir şekilde vermek için kullanılır.

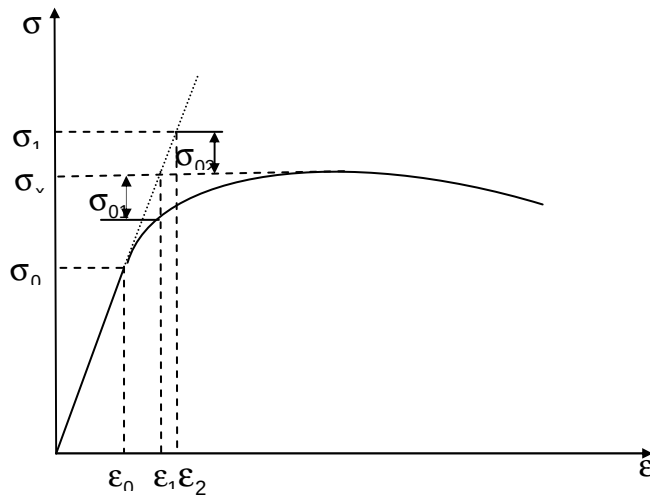
Çekme numunesi elastik bölgenin hemen üstüne ( $\varepsilon_{\text{toplam}} = \varepsilon_1$ ) yüklenir(Şekil 4.2).  $\sigma_x$  gerilmesi lineer olarak hesaplanır, böylece gerilme  $\sigma_{f1}$  aşağıda gösterilen şekilde verilmektedir.

$$\sigma_{01} = \sigma_x - \sigma_{f1} = \sigma_1 - \sigma_{f1}$$

$\sigma_{01}$  kullanılarak gerilmedeki artış değeri bulunur.

$$\sigma_2 = \sigma_x + \sigma_{01} \quad (4.19)$$

Bu  $\varepsilon_2$ 'ye karşılık gelir. En son denklemde  $\varepsilon_2$ 'deki gerçek gerilme ile  $\sigma_2$  arasındaki fark  $\sigma_{02}$ 'dir. Şekil deki gibi iterasyon adımları; plastik şekil değişiminin  $\varepsilon_n$  ve gerilmenin  $\sigma_x$  olmasını sağlar.



Şekil 4.2. Başlangıç gerilmesi metodu

Bu çalışmada iki boyutlu düzlemsel gerilme hali olduğu için Tsai-hill teorisine göre elde edilen gerilme eşdeğer gerilme olur. Eşdeğer gerilme düzlemsel gerilme durumunda ise,

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \frac{X^2}{Y^2}\sigma_2^2 + \frac{X^2}{S^2}\tau_{12}^2 = X^2 \quad (4.20)$$

O halde başlangıç gerilmesi bir boyutlu durumda plastik bölge için,

$$\sigma_0 = \sigma - \sigma_f \quad (4.21)$$

olarak ifade edilir.

Burada  $\sigma_f, \sigma, \varepsilon_{\text{toplam}}$  diyagramı tek eksenli yüklenmiş çekme örneğinden elde edilir. Fakat başlangıç gerilmesi aşağıdaki gibi matematiksel olarak tanımlanır.

$$\{\sigma_0\} = \{\sigma_{0x} \quad \sigma_{0y} \quad \tau_{0xy}\}^T \quad (4.22)$$

Burada  $\{\sigma_0\}$  bileşenleri elastik olarak hesaplanan gerilmeyle orantılıdır. Eş. 4.19'a göre ilgili eşdeğer gerilme değeri bir boyutlu durumda  $\{\sigma_0\}$ 'a eşittir.

$$\sigma_0 = \left\{ 0,5 \left( (\sigma_{0x} - \sigma_{0y})^2 + \sigma_{0x}^2 + \sigma_{0y}^2 \right) \right\} + 3\tau_{0xy}^2 \quad (4.23)$$

Başlangıç gerilmesine bağlı yükleme aşağıdaki gibidir.

$$\{F\}\sigma_0 = V[B]^T \{\sigma_0\}dV \quad (4.24)$$

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

$$\{\delta\}_1 = [K]^{-1}\{F\}_m \quad (4.25)$$

Deplasman vektörü;

$$\{\delta\}_1 = [K]^{-1}\{F\}_m$$

olur.

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

$$\{\sigma\}_n = [C][B]\{\delta\}_n \quad (4.26)$$

olarak bulunur.

#### 4.4. Sonlu Elemanlar Metodu

##### 4.4.1. Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi geniş bir alanı kapsayan mühendislik problemlerinin sayısal çözümünde güçlü bir araç haline geldi. Uygulama alanları otomotiv, uçak, bina ve köprü yapıların deformasyon ve gerilme analizinden, ısı akışı, akışkan akışı, sızıntı ve diğer akış problemlerinin alan analizine kadar olan bölgeyi kuşatır. Bilgisayar teknolojisi ve CAD sistemlerinin hızlı gelişimine paralel olarak karmaşık problemlerin modellenmesi kolaylaştı. Bu sayede ilk prototip inşa edilmeden önce bilgisayarda birkaç alternatif konfigürasyon denenebilir. Bütün bunlar, sonlu elemanlar yönteminin temel teorisini, modelleme tekniklerini ve hesaplama özelliklerini anlamak sureti ile gelişmelerle yarışmak gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu analiz metodunda bir sürekli ortamı tanımlayan kompleks bir bölge, sonlu elemanlar adı verilen basit geometrik şekillere bölünür. Malzeme özellikleri ve çözüm bağıntıları, bu elemanlar üzerinde düşünülür ve elemanı köşelerindeki bilinmeyen değerler cinsinden ifade edilir. Toplama işlemi, yükleme ve kısıtlamaların uygun bir şekilde göz önüne alınmasıyla bir denklemler sistemi elde edilir. Bu denklemlerin çözümü ise bize sürekli ortamın yaklaşık olarak davranışını verir [13].

Sonlu elemanlar modeli ile problem çözümü için aşağıdaki işlemler yapılmalıdır [14].

1. Cisim sonlu sayıda elemana ayrılır.
2. Her eleman için rijitlik matrisi oluşturulur.
3. Sınır şartları belirlenir.
4. x ve y doğrultularında yer değiştirmelerin sıfır olduğu noktalar belirlenir.
5. Hangi düğüm noktalarında kuvvet olduğu belirlenir.
6. Sistemin rijitlik matrisi belirlenir.
7. Yer değiştirme  $[K]\{\delta\} = \{P\}$  denklemi yardımı ile bulunur. (P: cisme uygulanan dış kuvvet, K: rijitlik matrisi,  $\delta$ : yer değiştirme )
8. Her bir eleman için gerilmeler bulunur.
9. Eşlenik gerilmeler hesaplanır.
10. Akma kontrolü yapılır.
11. Yeterli yakınsamanın görüldüğü yerlerde artık gerilmeler elde edilir.

#### 4.4.2. Sonlu elemanlar yönteminin plak analizinde kullanılması

Ortotropik bir tabaka için gerilme şekil değiştirme bağıntıları şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{44} & Q_{45} \\ Q_{54} & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

$Q_{ij}$  indirgenmiş direngenlik matrisinin elemanları olup  $C_{ij}$  elastik sabitleri ile  $\theta$  oryantasyon açısı tarafından belirlenir. Kayma deformasyon teorisi; deforme olmamış orta yüzeye normal bir hat üzerindeki plaka partiküllerinin deformasyon boyunca da doğru bir hat üzerinde kaldığını kabul eder. Fakat bu hattın deforme olmuş orta yüzeye normal doğrultuda kalması gerekmez.



Bu kabulü kullanarak x-y-z koordinatlarına sahip bir noktanın yerdeğiştirme bileşenleri, küçük deformasyonlar için şu şekildedir [13,16].

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) + z \cdot \psi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \cdot \psi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad (4.28)$$

burada  $u_0$ ,  $v_0$  ve  $w_0$  orta yüzeyin herhangi bir noktasındaki yerdeğiştirmeleri ve  $\psi_x, \psi_y$  sırasıyla orta düzlem normallerinin x ve y eksenleri etrafında dönmesini göstermektedir.

Ayrıca  $\psi_x = -\frac{\partial w}{\partial x}$  ve  $\psi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$  dir. Pozitif  $\psi_x$  x yönünde pozitif yer değiştirmeler doğurur, fakat pozitif  $\psi_y$  y doğrultusuna zıt yönde yer değiştirmeler doğurur.

Eğilme birim şekil değiştirmeleri plaka kalınlığı boyunca lineer olarak değişir, kesme birim şekil değiştirmelerinin ise kalınlık boyunca sabit kaldığı kabul edilmiştir [11,12,13].

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ -\frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} - \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad \text{veya} \quad \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial y} - \psi_y \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \psi_x \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Statik yüklemeye maruz tabakalanmış bir plakada toplam potansiyel enerji şu şekilde verilmiştir [11,12].

$$\Pi = U_b + U_s + V \quad (4.30)$$

burada  $U_b$  eğilme şekil değiştirme enerjisini,  $U_s$  kayma şekil değiştirme enerjisini ve  $V$  dış kuvvetlerin potansiyel enerjisini temsil etmektedir. Bu şekil değiştirme enerjileri şu şekilde ifade edilmektedir.

$$U_b = \frac{1}{2} \int_{-h/2}^{h/2} \left[ \int_A (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dA \right] dz$$

$$U_b = \frac{1}{2} \int_{-h/2}^{h/2} \left[ \int_A (\tau_{xz} \gamma_{yz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}) dA \right] dz \quad (4.31)$$

$$V = - \int_A w p dA - \int_{\partial R} (\bar{N}_n^b u_n^0 + \bar{N}_s^b u_s^0) ds$$

burada  $dA=dx.dy$ ,  $p$  birim alana gelen dik yöndeki yük miktarını,  $\bar{N}_n^b$  ve  $\bar{N}_s^b$  ler ise  $\partial R$  sınırı boyunca etki eden düzlemsel yükleri göstermektedir.

Birim uzunluğa gelen düzlemsel yükler  $N_x$ ,  $N_y$  ve  $N_{xy}$ , momentler  $M_x$ ,  $M_y$  ve  $M_{xy}$  şu şekilde belirtilir [11,13].

$$\begin{bmatrix} N_x & M_x \\ N_y & M_y \\ N_{xy} & M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} (1, z) dz \quad (4.32)$$

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} dz$$

Denklem  $\Pi$  'nin sabit veya minimum olmasını gerektirir.  $\Pi$  'nin ikinci türevi olan  $\pi$  sabit bir noktada pozitifdir [12].

Gösterilebilir ki Eş. 4.30 için toplam statik potansiyel enerji ve asal değişken teoremi aşağıdaki denge denklemlerini verir,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= 0 \\
\frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} &= 0 \\
\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \left( \bar{N}_1 \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{N}_{12} \frac{\partial w}{\partial y} \right)_{,x} + \left( \bar{N}_{12} \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{N}_2 \frac{\partial w}{\partial y} \right)_{,y} + p &= 0 \\
\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x &= 0 \\
\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y &= 0
\end{aligned} \tag{4.33}$$

burada alt indis olarak verilen virgüller kendisini takip eden değişkenlere göre kısmi türevi belirtmektedir.

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak toplam potansiyel enerji deplasman bileşenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir,

$$\Pi = \Pi(u_0, v_0, w, \psi_x, \psi_y) \tag{4.34}$$

Elde edilen bu lineer matematiksel denklem takımlarını ve iterasyon metodlarını kullanarak tabakalanmış bir plak için elasto-plastik çözüm elde edilir.

Deplasmanlar aşağıdaki matris formunda gösterilebilir;

$$[d] = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \\ \gamma_x \\ \gamma_y \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \\ \gamma_x \\ \gamma_y \end{bmatrix}_i \tag{4.35}$$

burada n toplam düğüm sayısını  $N_i$  ise i noktasındaki şekil fonksiyonunu temsil etmektedir.

Eş. 4.29'u kullanarak birim uzama ve şekil değiştirmeler arasındaki bağıntı matris formunda şu şekilde yazılabilir,

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_u \\ K_v \\ K_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 & 0 & 0 \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{1,x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1,y} \\ 0 & 0 & 0 & N_{1,y} & -N_{1,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \\ \psi_x \\ \psi_y \\ \psi_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

veya sembolik olarak,

$$\{\epsilon_{bi}\} = [B_{bi}][u_i] \quad (4.37)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $i$  düğüm numarasını ve virgüller kısmi türevi göstermektedir.

Birim kayma şekil değiştirmeleri ile deplasman bileşenleri arasındaki bağıntı matris formunda şu şekilde gösterilebilir,

$$\begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & N_{i,y} & 0 & -N_i \\ 0 & 0 & N_{i,x} & N_i & 0 \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \\ \psi_x \\ \psi_y \end{bmatrix}_i \quad (4.38)$$

veya sembolik olarak

$$\{\epsilon_{si}\} = [B_{si}][u_i] \quad (4.39)$$

şeklinde yazılabilir.

Plaka elemanlarının direngenlik matrisi minimum potansiyel enerji metodundan elde edilir [25]. Eğilme ve kesme direngenlik matrisleri şu şekildedir.

$$[K_b] = \int_A [B_b]^T [D_b] [B_b] dA$$

$$[K_s] = \int_A [B_s]^T [D_s] [B_s] dA \quad (4.40)$$

burada,

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

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

$$(A_{44}, A_{55}) = \int_{-h/2}^{h/2} (Q_{44}, Q_{55}) dz \quad (4.41)$$

$B_b$ ,  $B_s$  ve  $D_b$  ve  $D_s$  ler sırasıyla materyal matrisinin eğilme ve kayma kısımlarını gösterir.  $A_{45}$  ;  $A_{44}$  ve  $A_{55}$  'in yanında ihmal edilebilir [11] ve dikdörtgen kesitler için kayma düzeltme faktörleri şu şekilde verilebilir [26],  $k_1^2 = k_2^2 = 5/6$ .

Akma fonksiyonu şu şekilde ifade edilir,

$$f = \sigma_e - \sigma_0 \quad (4.38)$$

burada  $\sigma_e$  efektif gerilme ve  $\sigma_0$  akma gerilmesidir.

Böylece her bir düğüme karşılık gelen deplasmanlar hesaplanır. Her tabakanın birim şekil değiştirme bileşenleri Eş. 4.37 ve Eş. 4.39 kullanılarak bulunabilir ve ayrıca gerilme hesaplanıp malzemenin akma durumu kontrol edilebilir.

Burada hesaplanan gerilmeler genellikle gerçek gerilme değerleri ile uyuşmaz ve dengelenmemiş düğüm kuvvetleri ile eşdeğer düğüm kuvvetleri

hesaplanmalıdır. Her bir iterasyondaki gerilme değerlerine bağlı olan eşdeğer düğüm kuvvetleri şu şekilde hesaplanabilir,

$$\{R\}_e = \int_{vol} |B|^T |\sigma| dA = + \int_{vol} |B_b|^T |\sigma_b| dA + \int_{vol} |B_s|^T |\sigma_s| dA \quad (4.43)$$

Eşdeğer düğüm kuvvetleri bilindiğinde dengelenmemiş düğüm kuvvetleri,

$$\{R\}_u = \{R\}_a - \{R\}_e \quad (4.44)$$

kullanılarak bulunabilir. Burada  $R_u$  kuvvetteki değişim,  $R_a$  kabul edilen kuvvet ve  $R_e$  eşdeğer kuvvettir.

## 4.5. ANSYS Bilgisayar Programı

### 4.5.1. Giriş

Günümüzde mühendislik uygulamalarında karşımıza çıkan birçok problem hazırlanmış bilgisayar programları aracılığı ile analizler yapılarak çözülebilmektedir. Bilgisayar ortamında yapılan bu analizler işlemleri gerek hızlı ve düşük maliyetli olması gerekse gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılması nedeniyle mühendislikte vazgeçilmez hale gelmiştir.

İşte bu programlardan biri olan ANSYS, uzun bir geçmişi olan ve ülkemizde de son yıllarda, özellikle üniversiteler olmak üzere sanayide de kullanımı yaygınlaşmaktadır. ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle çeşitli konularda analiz yapan programdır. Bu konular:

- Yapısal analiz
- Termal analiz
- Elektromagnetik analiz
- Akışkan analiz

Sonlu elemanlar metodu, sürekliliğe sahip bir yapının çok sayıda elemana bölünerek incelenmesini mümkün kılar. Mühendislik problemlerinde, teorik hesaplamaların karmaşık yapıdaki modellere uygulanmasının zorluğundan

dolayı, inceleme (kabul gören tolerans sınırları içindeki hassasiyete) modelin belirli sayıdaki elemanlara bölünmesi ile yapılır. FEM ( Finite Element Method) programlarından ANSYS' in kullanılarak modelin tasarlanması ve belli geometrideki parçaların, değişik yükleme durumunda mukavemet analizleri, değişik sıcaklıklarda termodinamik davranışları ve çalışma esnasındaki titreşim özellikleri incelenerek konstrüksiyon yönlendirilebilir. Bu sayede çeşitli yükleme ve ortam şartlarında emniyetli bir biçimde çalışabilecek malzemeler minimum maliyetle üretilebilir.

#### **4.5.2. Elasto-Plastik gerilme analizi**

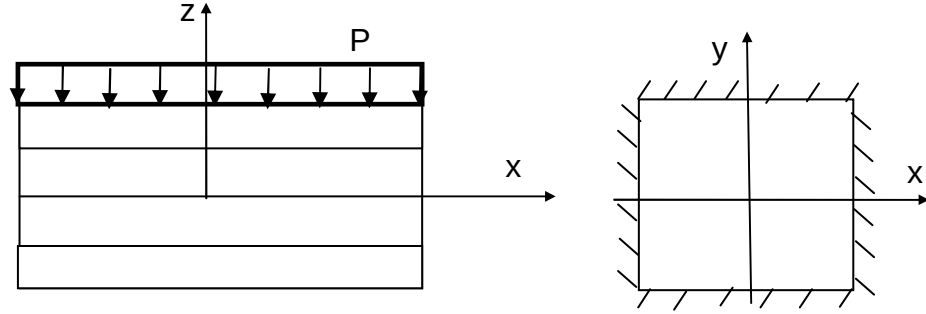
Genellikle mekanik sistemler elastik bölgede tasarlanır ancak malzemenin plastik davranışını bilmek onu daha güvenli kullanmayı sağlar. Malzemenin plastik bölgedeki ortalama davranış tarzını tespit edebilmek için elasto-plastik gerilme analizi yapılmalıdır.

Malzemeler için elastik bölgede meydana gelen şekil değişimleri yük kaldırıldığında ortadan kalkmaktadır ve gerilme ile birim uzama arasındaki ilişki lineerdir. Malzemenin elastik davranışını tespit etmek nispeten kolaydır. Sabit bir elastisite modülünden bahsedilir. Ancak plastik bölgede soğuk şekil değiştirme sertleşmesinden dolayı her yük durumu için farklı rijitlik değerleri oluşur. Malzeme tamamen eski haline dönemez. Bunun sonucu olarak artık gerilmeler oluşur. Elasto-plastik gerilme analizi daha komplekstir. Elasto-plastik gerilme analizi için çeşitli bilgisayar programlarından ve özel yöntemlerden yararlanılır.

Elasto-plastik gerilme analizi yapılabilmesi için malzemenin plastik davranış sergilemesi gerekir. Eğer malzeme plastik şekil değiştirmeden kırılıyor ise elasto-plastik gerilme analizi yapılamaz.

Bu çalışmada 50x50x3,2 mm ölçülerinde çelik fiberle takviye edilmiş alüminyum matriksli kompozit yapının ANSYS bilgisayar programı ile elasto-plastik gerilme analizi yapıldı. Köşelerinden basit mesnetli kompozit yapıya şekilde görüldüğü gibi basınç (P) uygulandı. Basınç yavaş yavaş artırılarak

plastik bölgeye geçildi. Bu işlem değişik takviye açıları için tekrarlandı.



Şekil 4.3. Yükleme şekli

Tabakalı yapı için bulunan analiz sonuçları ekler kısmında verilmiştir.



## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada  $(0/90)_2$ , simetrik-çapraz takviyeli ve  $(15/-15)_2$ ,  $(30/-30)_2$ ,  $(45/-45)_2$ , simetrik-açılı takviyeli alüminyum metal matriksli tabakalı kompozit plaklar için ANSYS bilgisayar programı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriksli tabakalı plakalar ısıtma ve presleme yapılmadan 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  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat süre ile pişirilmiştir.

Elde edilen kompozit yapının mekanik özellikleri Gazi Üniversitesi Çorum Mühendislik Fakültesi Makine laboratuvarında Shimadzu Autograph çekme cihazında yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Basit çekme deneyi ve teorik hesaplarla bulunan sonuçlar aşağıda Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve mühendislik sabitleri

|            |          |
|------------|----------|
| X          | 130 MPa  |
| Y          | 104 MPa  |
| S          | 49 MPa   |
| k          | 2570 MPa |
| n          | 0,62 MPa |
| $\nu_{12}$ | 0,33     |
| $G_{12}$   | 41 GPa   |
| $E_1$      | 110 GPa  |
| $E_2$      | 87 GPa   |

Bu çalışmada, 4 tabakalı alüminyum metal matriksli kompozit plak kullanılmıştır. Elasto-plastik gerilmeler ANSYS bilgisayar programı

kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışma ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Epoksi reçinenin kompozit malzemenin dayanımına etkisi ihmal edilecek kadar azdır. Reçinesiz alüminyum için çekme dayanımı 113 MPa'dır ve reçine kullanılan alüminyumda bu değer aynı kalmaktadır. Reçine sadece, matriksle fiber arasında bağ oluşturma görevi yapmıştır.

2. Yönlenme açısı tabakalı plaklarda gerilme değerlerini etkilemektedir [9].

3. Simetrik yönlenmede en büyük gerilme  $(0/90^\circ)_2$  takviye açısı, en küçük gerilme ise  $(0/15^\circ)_2$  takviye açısı durumunda meydana gelmiştir.

4. Antisimetrik yönlenmede en büyük gerilme  $(15/-15^\circ)_2$ , en küçük gerilme ise  $(0/90^\circ)_2$  takviye açısı durumunda meydana gelmiştir.

5. Simetrik  $(0/90^\circ)_2$  takviye açısı durumunda oluşan en büyük gerilme 798 MPa iken antisimetrik  $(0/90^\circ)_2$  takviye açısı durumunda 668.98 MPa'dır.

6. Antisimetrik yönlenme durumunda en küçük plastik bölge  $(15/-15^\circ)_2$  takviye açısı durumundadır.

7. Simetrik yönlenme durumunda en küçük plastik bölge  $(0/15^\circ)_2$  takviye açısı durumundadır.

8. Simetrik yönlenmede ilk akmanın sadece orta bölgede olacağı görülebilir, ancak antisimetrik yönlenmede orta bölge ile beraber köşelere yakın bölgelerde de akma başlamıştır [16].

9. Eğer yük adımları artırılırsa plastik gerilme bileşenleri de artar [4].

## KAYNAKLAR

1. Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", **Gazi Kitabevi**, Ankara, 327 (2000).
2. Mendelson, A., "Plasticity Theory and Application", **The Macmillan Company**, New York, 349 (1968).
3. Owen, D.R.J., Hinton, E., "Finite Elements in Plasticity", **Pineridge Press Limited**, Swansea, U.K., 593 (1980).
4. Sayman, O., "Elasto-plastic Stress Analysis in Stainless Steel Fiber Reinforced Aluminium Metal Matrix Laminated Plates Loaded Transversely", **Composite Structures**, 43:147-154 (1998).
5. 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).
6. Arslan, N., Kaman, M. O., "Alüminyum, Kağıt ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 4(2):113-123 (2002).
7. Akbulut, H., Sayman, O., "An Investigation on Buckling of Laminated Plates with Central Square Hole", **Reinforced Plastics and Composites**, 20(13):1112-1124 (2001).
8. Sayman, O., Ataş, 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).
9. Aykul, H., Ataş, 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).
10. 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).
11. Karakuzu, R., Ataş, C., Akbulut, H., "Elastic-Plastic Behavior of Woven-Steel-Fiber-Reinforced Thermoplastic Laminated Plates Under In-Plane Loading", **Composites Science and Technology**, 61:1475-1483 (2001).

12. Kaya, S., Dağhan, B., Uyaner, M., "Delikli İzotropik Levhalarda Termal Gerilme Analizi", **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 4(1):63-69 (2002).
13. Güldü, İ., Dağhan, B., Kaya, S., "Faturalı CTP Levhalarda Gerilme Konsantrasyonunun Araştırılması", **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 5(2):27-35 (2003).
14. Sayman, O., "Thermal Stress Analysis in an Aluminium Metal-Matrix Orthotropic Disc", **Reinforced Plastics and Composites**, 23(14):473-1479 (2004).
15. Arslan, N., Kaman, M. O., Pıhtılı, H., "Eksenel Yüklü Yarım Daire Çentikli Kompozit Levhalarda Elasto-Plastik Gerilme Analizi", **Bilim Günleri**, Denizli, 66-72 (1999).
16. 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).
17. Isaac, M.D., Ishai, O., "Engineering Mechanics of Composite Materials", **Oxford University Press**, New York, 395 (1994).
18. Aran, A., "Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler", **İTÜ Matbaası**, İstanbul, 95 (1990).
19. Sayman, O., Aksoy, S., "Kompozit Malzemeler" **Ege Üniversitesi Matbaası**, İzmir, 108 (1982).
20. 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).
21. Weissbach, W., "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", **Birsan Yayınevi**, İstanbul, 190 (1998).
22. Jones, R. M., "Mechanics of Composite Materials", **Taylor&Francis**, Philadelphia, 2nd Edition, 519 (1999).
23. Gibson, R.F., "Principles of Composite Material Mechanics", **McGraw-Hill**, Singapore, 425 (1994).
24. Tirupathi, R. C., Ashok, D. B., "Introduction to Finite Elements in Engineering", **Prentice-Hall Inc.**, New Jersey, USA, 100-111 (1991).
25. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", **Prentice-Hall Inc.**, New Jersey, USA, 65-75 (1982).

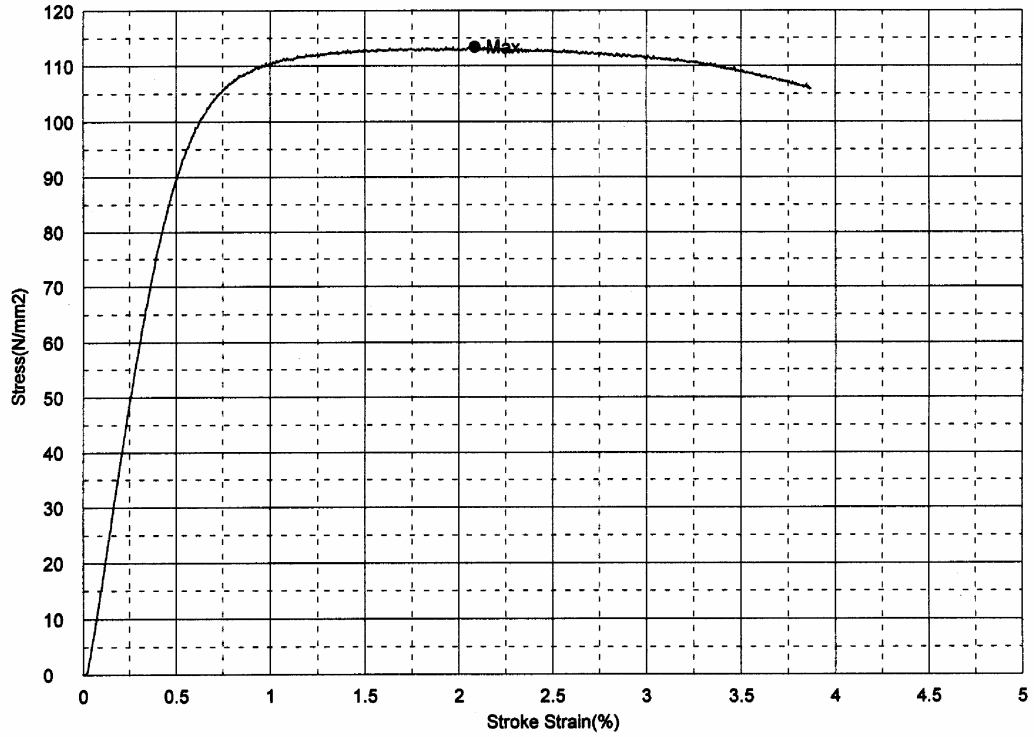
26. Lin, C. C., Kuo, C. S., "Buckling of Laminated Plates with Holes", ***Journal of Composite Materials***. 23, 536-553 (1989).

## EKLER

## EK-1 Gerilme-gerinme diyagramları

| Name      | YP_Force | Max_Force | Max_Stress | Break_Force | Break_Stress |
|-----------|----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| Parameter | 0,1 %/FS |           |            |             |              |
| Units     | kN       | kN        | N/mm2      | kN          | N/mm2        |
| 1 - 1     | --       | 6,04063   | 113,439    | --          | --           |

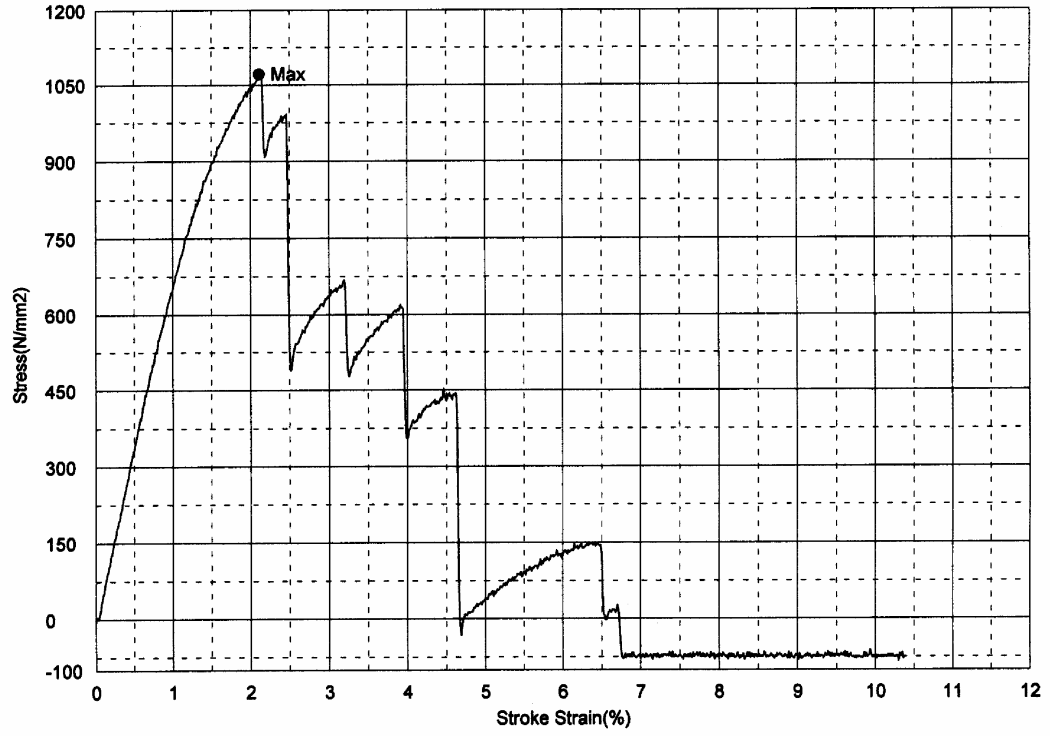
| Name  | Max_Disp | Max_Strain | Break_Disp | Break_Strain |
|-------|----------|------------|------------|--------------|
| Units | mm       | %          | mm         | %            |
| 1 - 1 | 1,70850  | 2,08354    | --         | --           |



Şekil 1.1. Alüminyum malzemenin gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

| Name  | Max_Force | Max_Disp | Max_Stress | Max_Strain |
|-------|-----------|----------|------------|------------|
| Units | kN        | mm       | N/mm2      | %          |
| 1 - 1 | 1,89375   | 1,11800  | 1071,64    | 2,10943    |



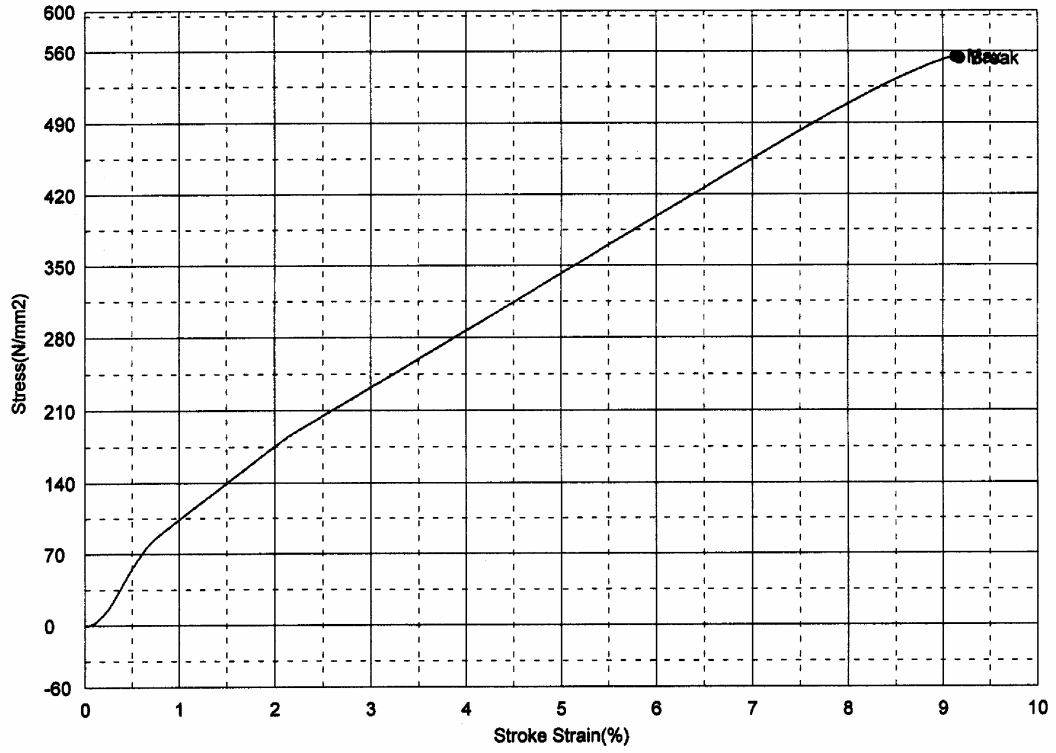
Şekil 1.2. Çelik tel için gerilme-gerinme diyagramı



## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

| Name  | Max_Force | Max_Stress | Break_Force | Break_Stress | Max_Disp |
|-------|-----------|------------|-------------|--------------|----------|
| Units | kN        | N/mm2      | kN          | N/mm2        | mm       |
| 1 - 1 | 56,7938   | 554,626    | 56,6375     | 553,101      | 6,84750  |

| Name  | Max_Strain | Break_Displacement | Break_Strain |
|-------|------------|--------------------|--------------|
| Units | %          | mm                 | %            |
| 1 - 1 | 9,13000    | 6,87800            | 9,17067      |

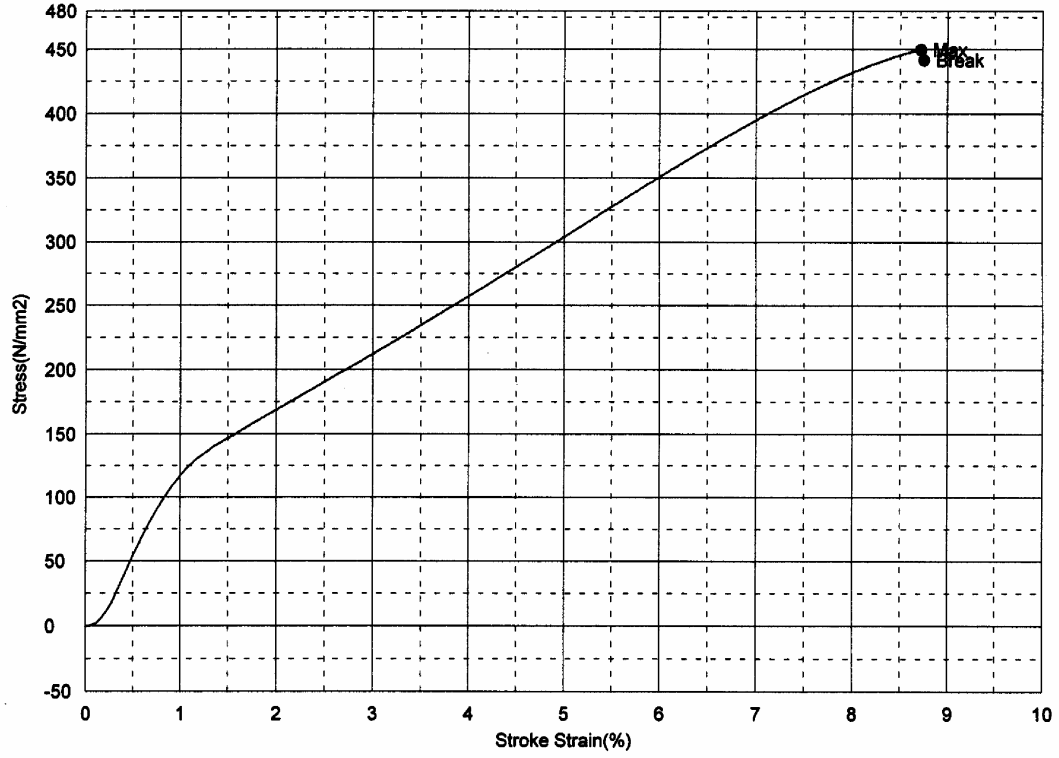


Şekil 1.3. %33 oranında fiber içeren kompozit yapı için gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

| Name      | YP_Stress | Max_Force | Max_Stress | Break_Force | Break_Stress |
|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|--------------|
| Parameter | 0,1 %/FS  |           |            |             |              |
| Units     | N/mm2     | kN        | N/mm2      | kN          | N/mm2        |
| 1 - 1     | --        | 37,1594   | 449,599    | 36,5062     | 441,697      |

| Name  | Max_Displacement | Max_Strain | Break_Displacement | Break_Strain |
|-------|------------------|------------|--------------------|--------------|
| Units | mm               | %          | mm                 | %            |
| 1 - 1 | 6,36400          | 8,71781    | 6,38800            | 8,75068      |

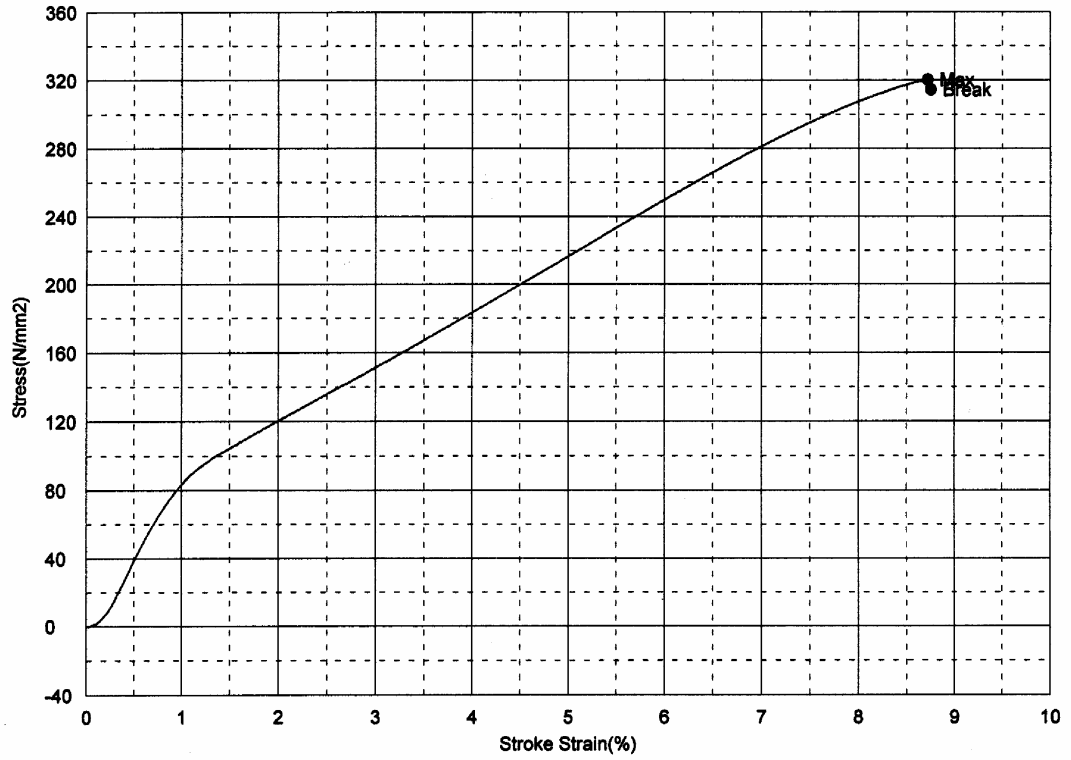


Şekil 1.4. %25 fiber içeren kompozit yapı için gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

| Name  | Max_Force | Max_Stress | Break_Force | Break_Stress | Max_Displacement |
|-------|-----------|------------|-------------|--------------|------------------|
| Units | kN        | N/mm2      | kN          | N/mm2        | mm               |
| 1 - 1 | 37,1594   | 320,339    | 36,5062     | 314,709      | 6,36400          |

| Name  | Max_Strain | Break_Displacement | Break_Strain |
|-------|------------|--------------------|--------------|
| Units | %          | mm                 | %            |
| 1 - 1 | 8,71781    | 6,38800            | 8,75068      |

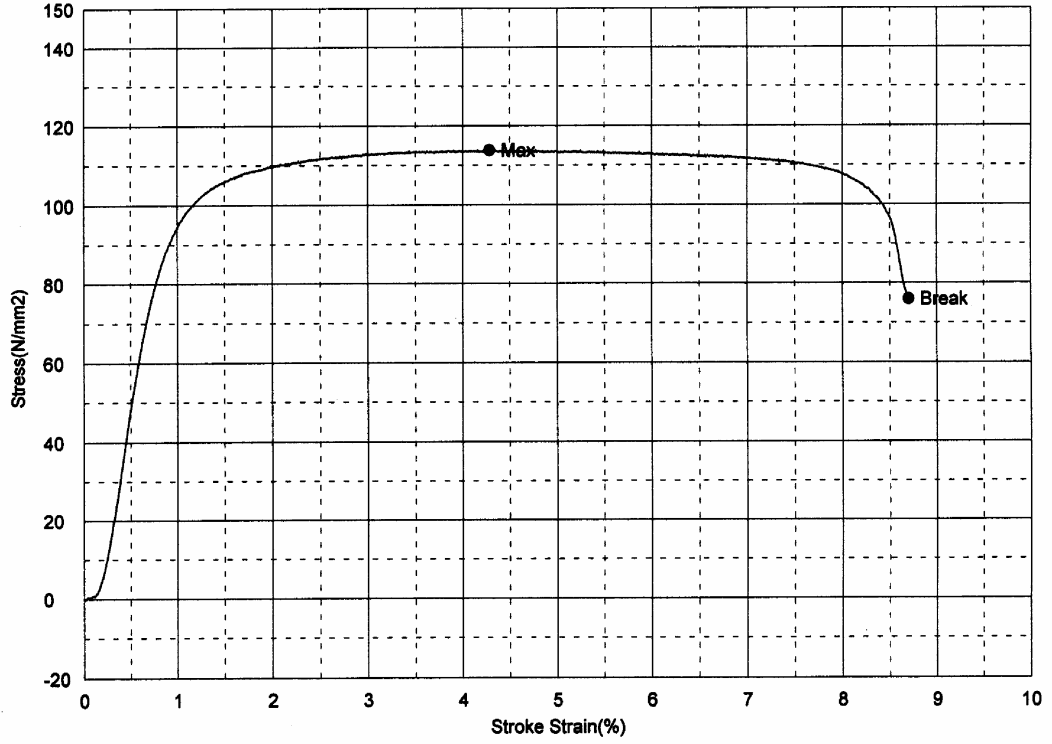


Şekil 1.5. %21 fiber içeren kompozit yapı için gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

| Name  | Max_Force | Max_Stress | Max_Strain | Break_Force | Break_Stress |
|-------|-----------|------------|------------|-------------|--------------|
| Units | kN        | N/mm2      | %          | kN          | N/mm2        |
| 1 - 1 | 7,51250   | 113,826    | 4,28077    | 5,01563     | 75,9943      |

| Name  | Break_Strain | Max_Disp | Break_Disp |
|-------|--------------|----------|------------|
| Units | %            | mm       | mm         |
| 1 - 1 | 8,69872      | 3,33900  | 6,78500    |

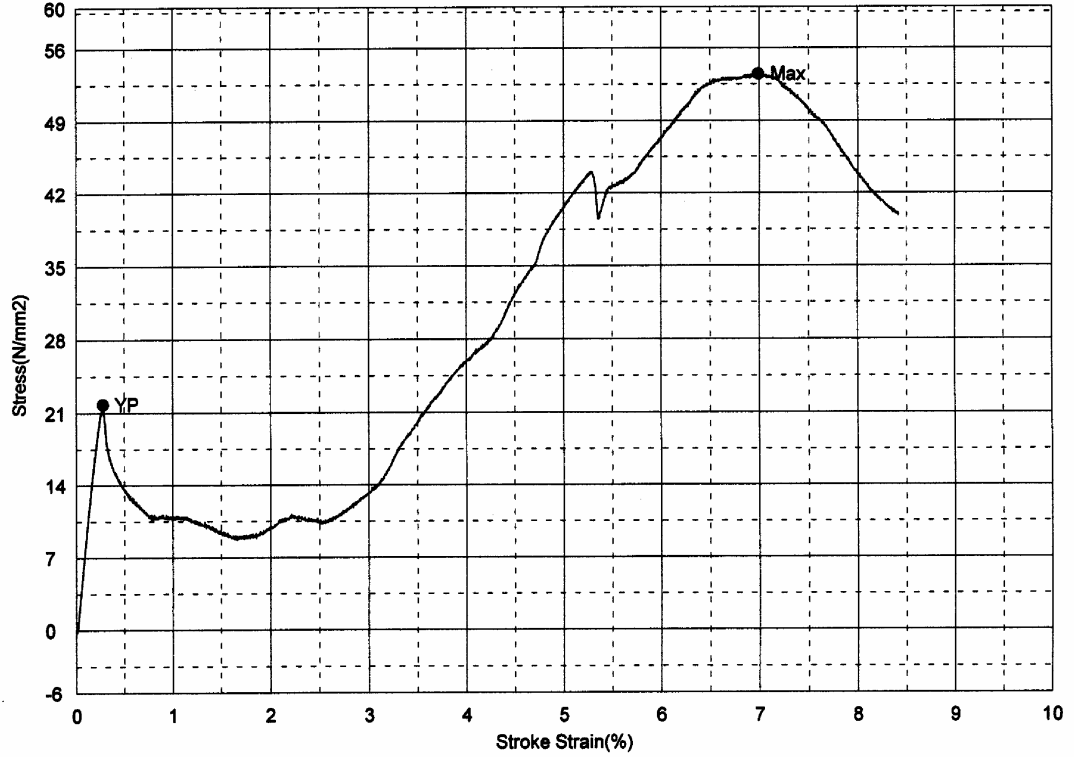


Şekil 1.6. Alüminyum ve reçine kullanılarak(fiber yok) elde edilen yapı için gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

| Name      | YP_Force | YP_Disp  | YP_Stress | YP_Strain | Max_Force |
|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Parameter | 0,1 %/FS | 0,1 %/FS | 0,1 %/FS  | 0,1 %/FS  |           |
| Units     | kN       | mm       | N/mm2     | %         | kN        |
| 1 - 1     | 2,14063  | ,25100   | 21,8431   | ,27889    | 5,24375   |

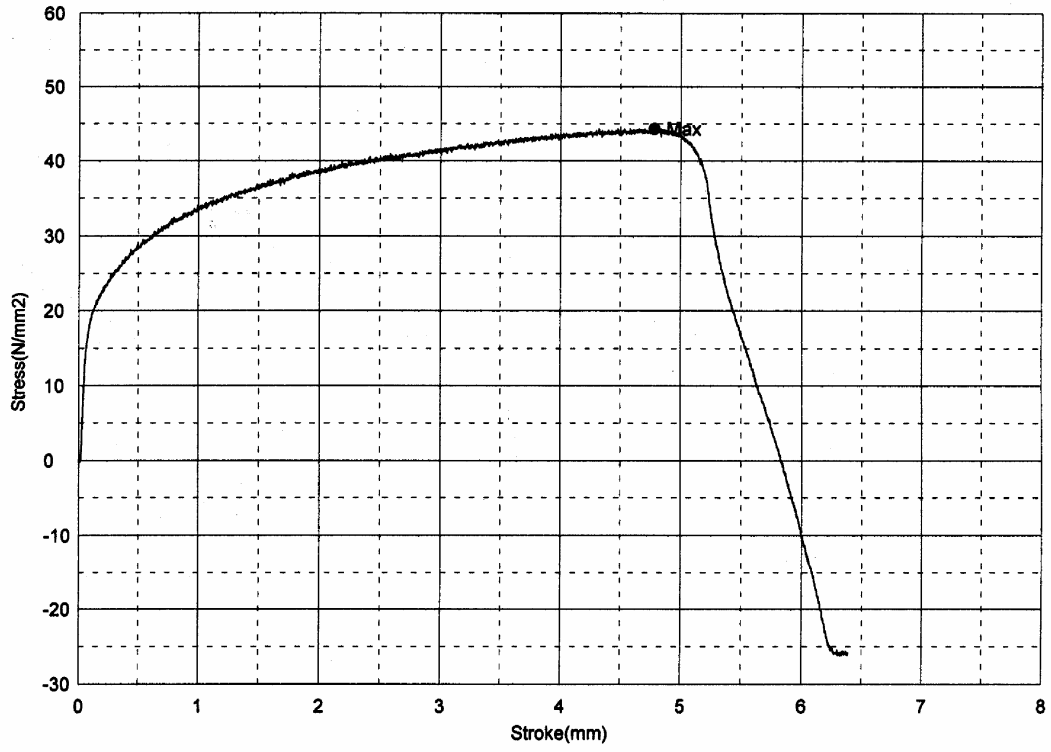
| Name  | Max_Disp | Max_Stress | Max_Strain |
|-------|----------|------------|------------|
| Units | mm       | N/mm2      | %          |
| 1 - 1 | 6,29000  | 53,5077    | 6,98889    |



Şekil 1.7. Kompozit malzemenin kayma dayanımını bulmak amacı ile hazırlanan numunenin gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

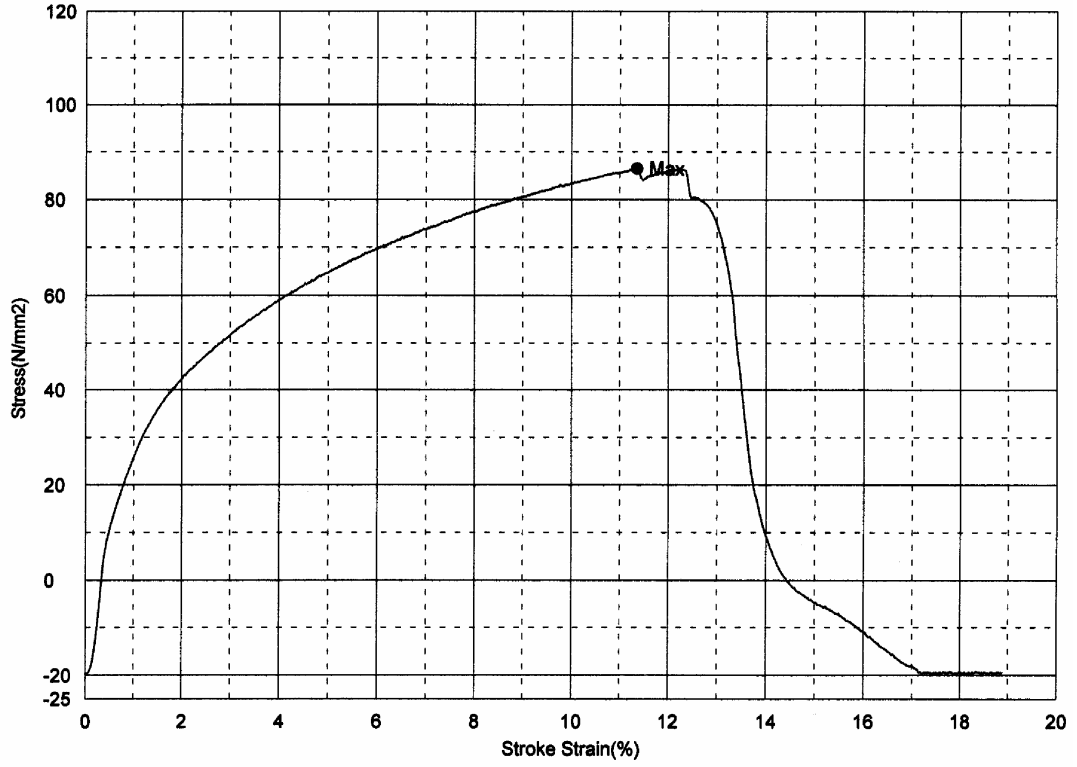
| Name  | Max_Force | Max_Stress | Max_Displacement | Max_Strain |
|-------|-----------|------------|------------------|------------|
| Units | kN        | N/mm2      | mm               | %          |
| 1 - 1 | 1,75625   | 44,3497    | 4,77800          | 9,95417    |



Şekil 1.8. 650 °C 'a kadar ısıtılıp 350 bar basınç uygulanan alüminyumun gerilme-gerinme diyagramı

## EK-1 (Devam) Gerilme-gerinme diyagramları

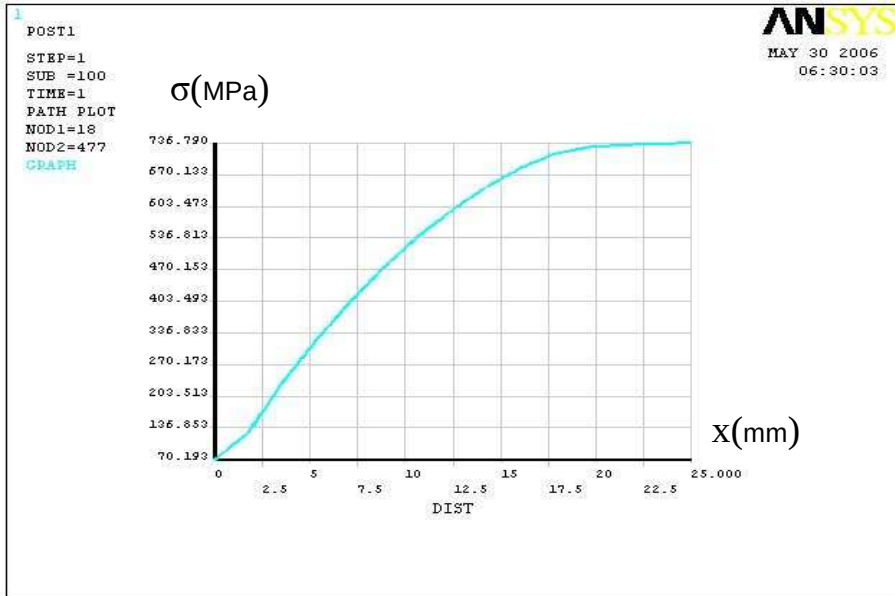
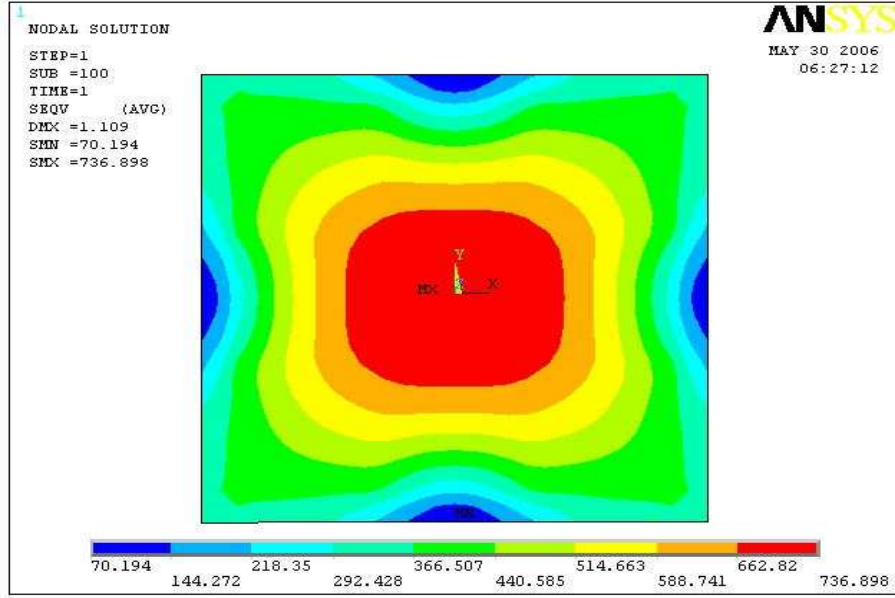
| Name  | Max_Force | Max_Disp | Max_Stress | Max_Strain |
|-------|-----------|----------|------------|------------|
| Units | kN        | mm       | N/mm2      | %          |
| 1 - 1 | 6,92500   | 5,56300  | 86,5625    | 11,3531    |



Şekil 1.9. 650 °C 'a kadar ısıtılıp 350 bar basınç uygulanan alüminyum ve çelik telden oluşan kompozit yapı için gerilme-gerinme diyagramı

EK-2 ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

100 iterasyon

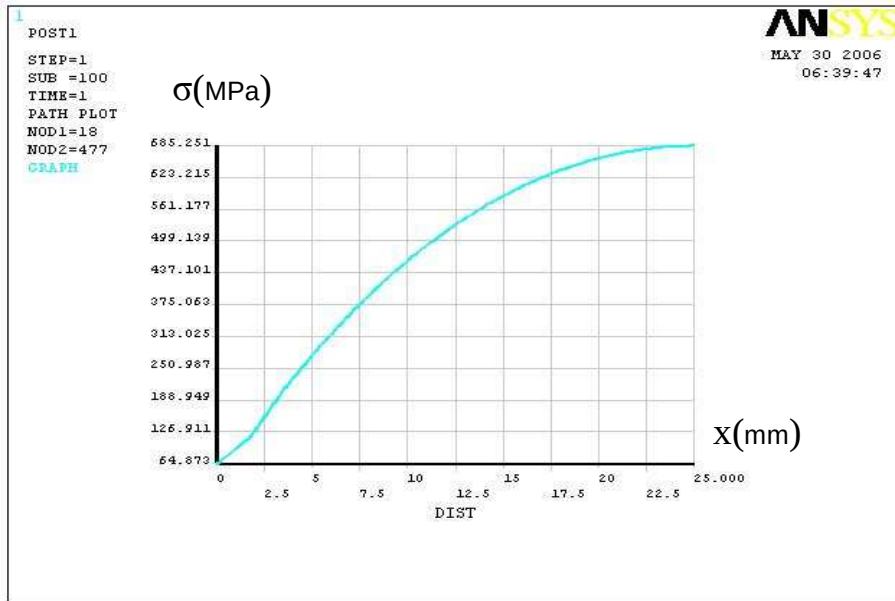
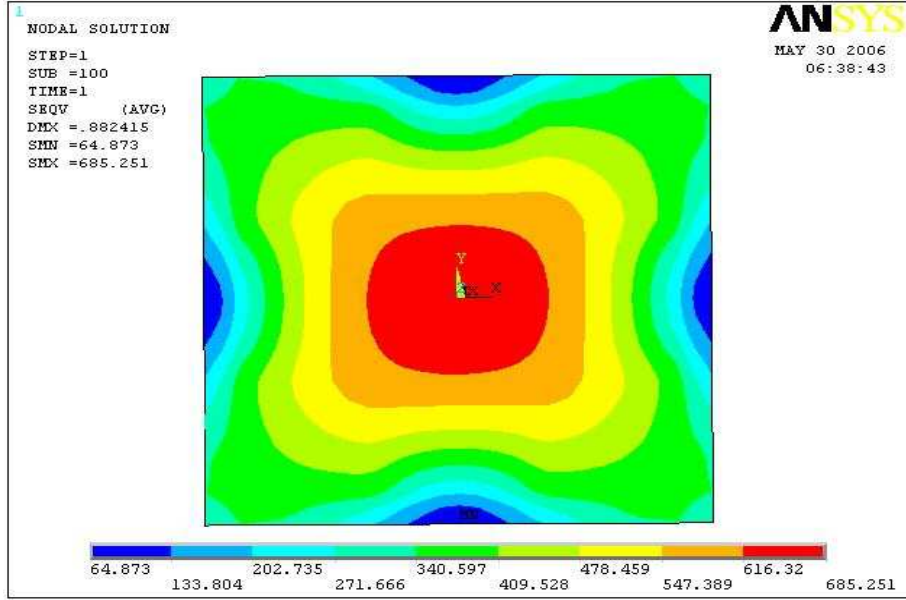


Şekil 2.1.  $(0/90^0)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı



EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

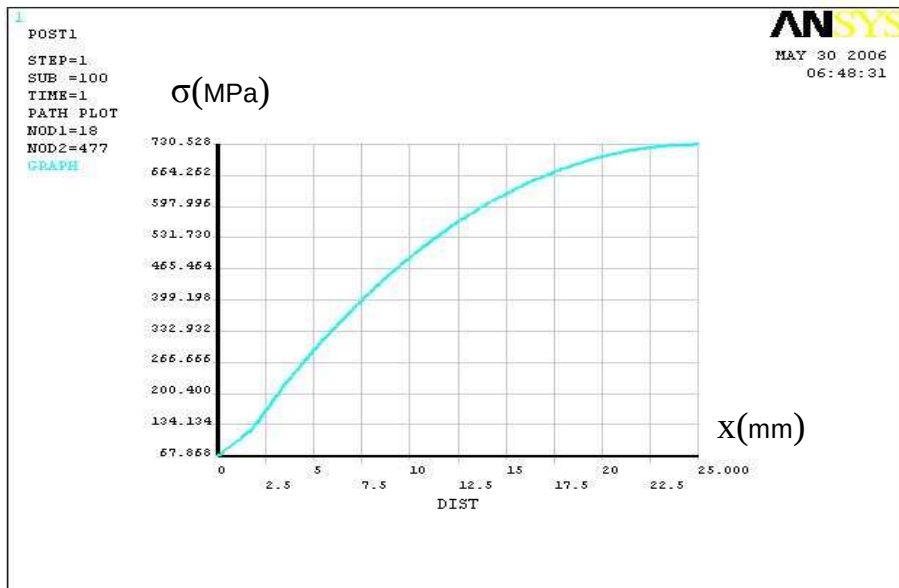
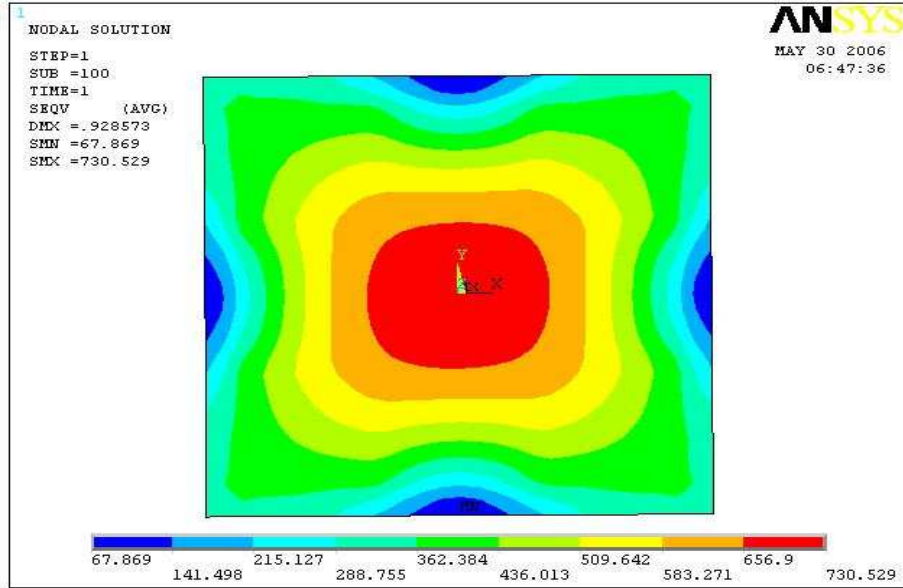
100 iterasyon



Şekil 2.2.  $(0/15^0)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

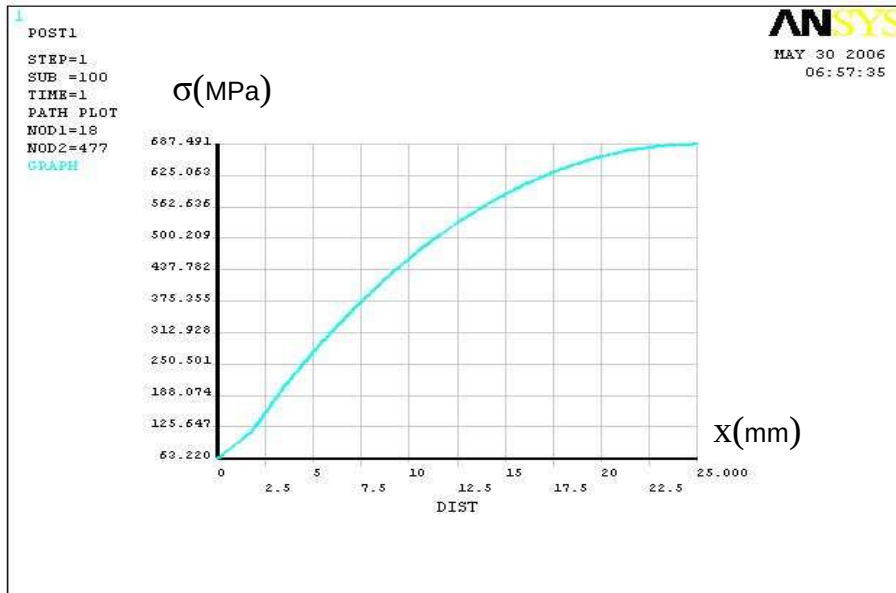
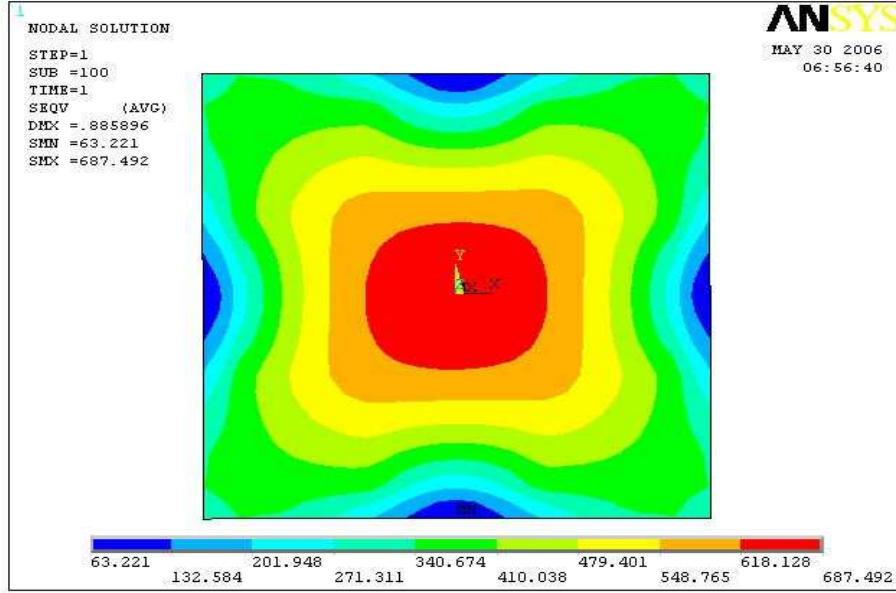
100 iterasyon



Şekil 2.3.  $(0/30^\circ)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

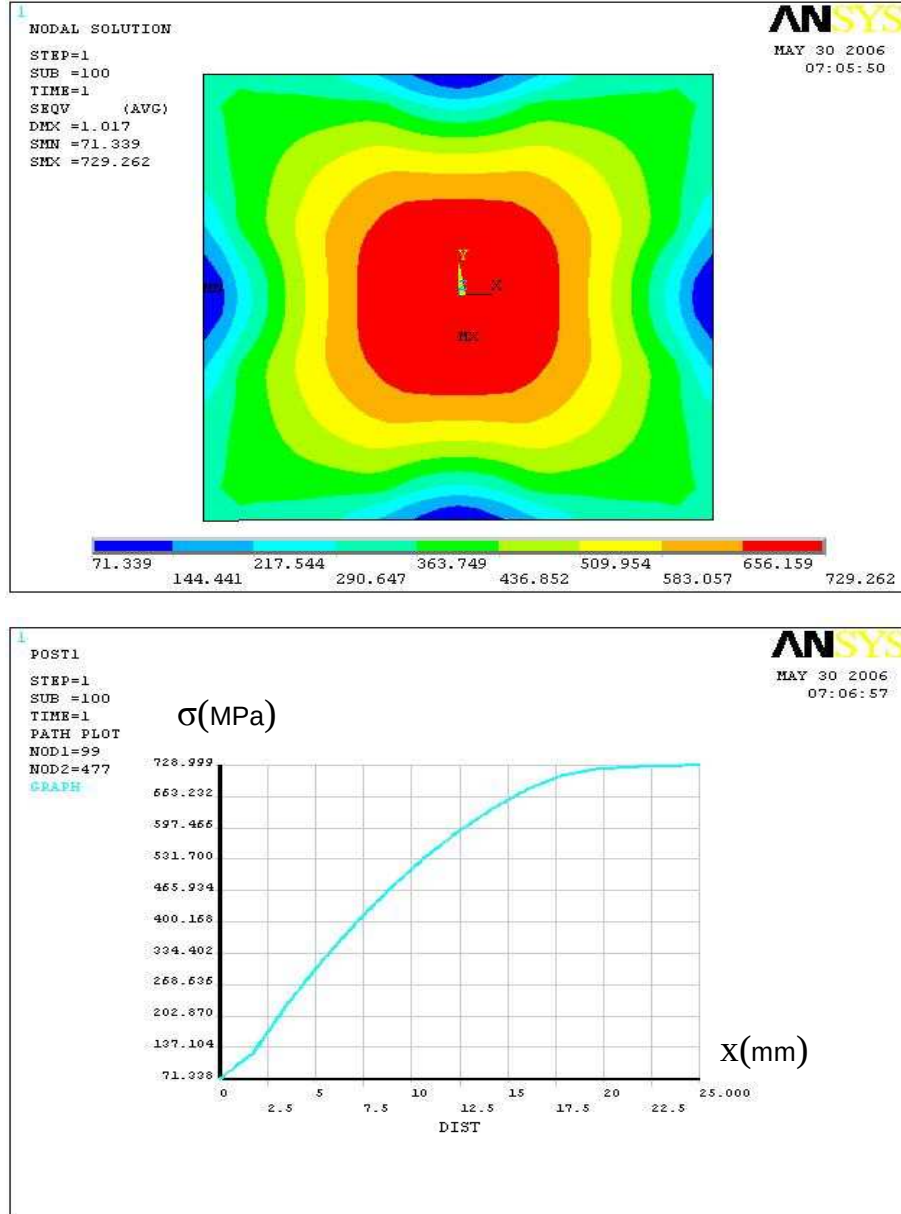
100 iterasyon



Şekil 2.4.  $(0/45^\circ)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

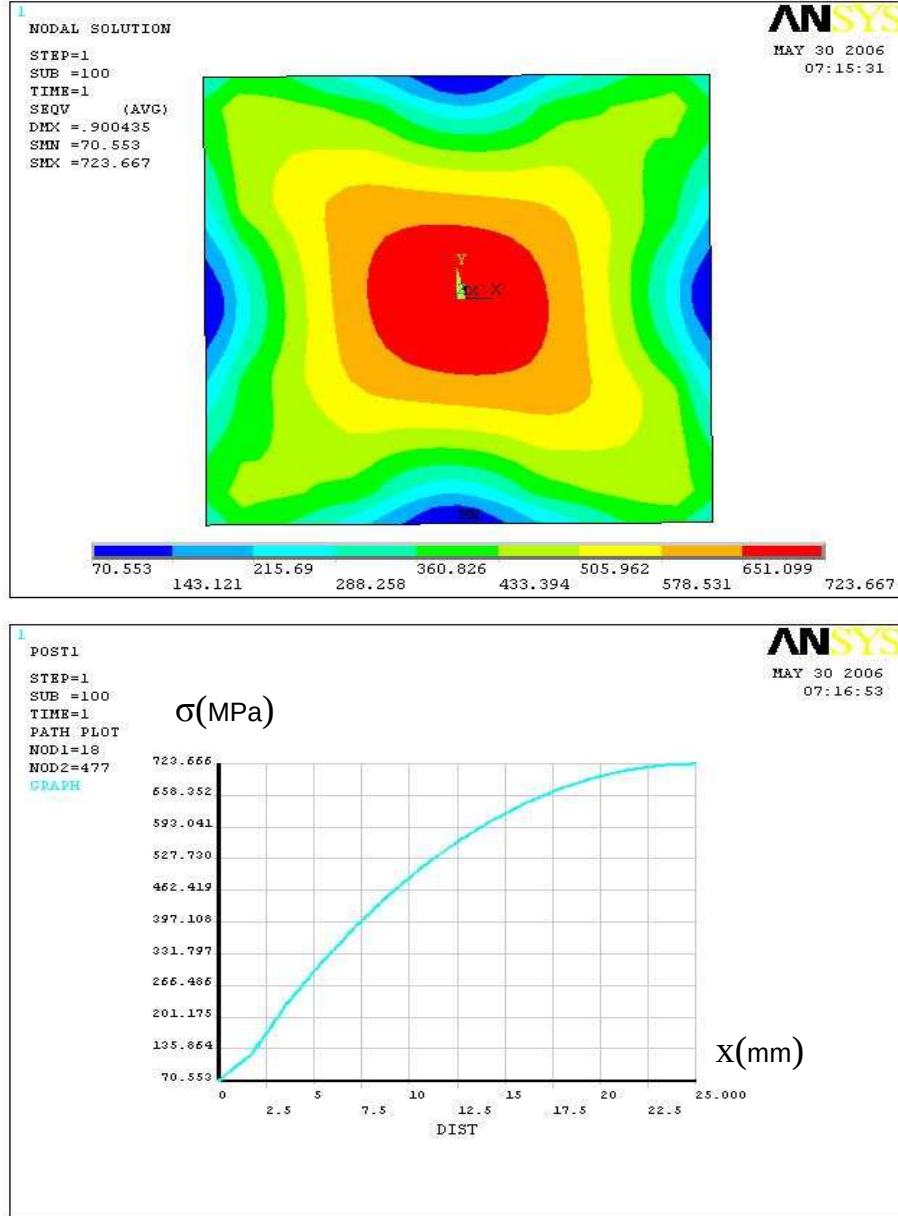
100 iterasyon



Şekil 2.5.  $(0/90^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

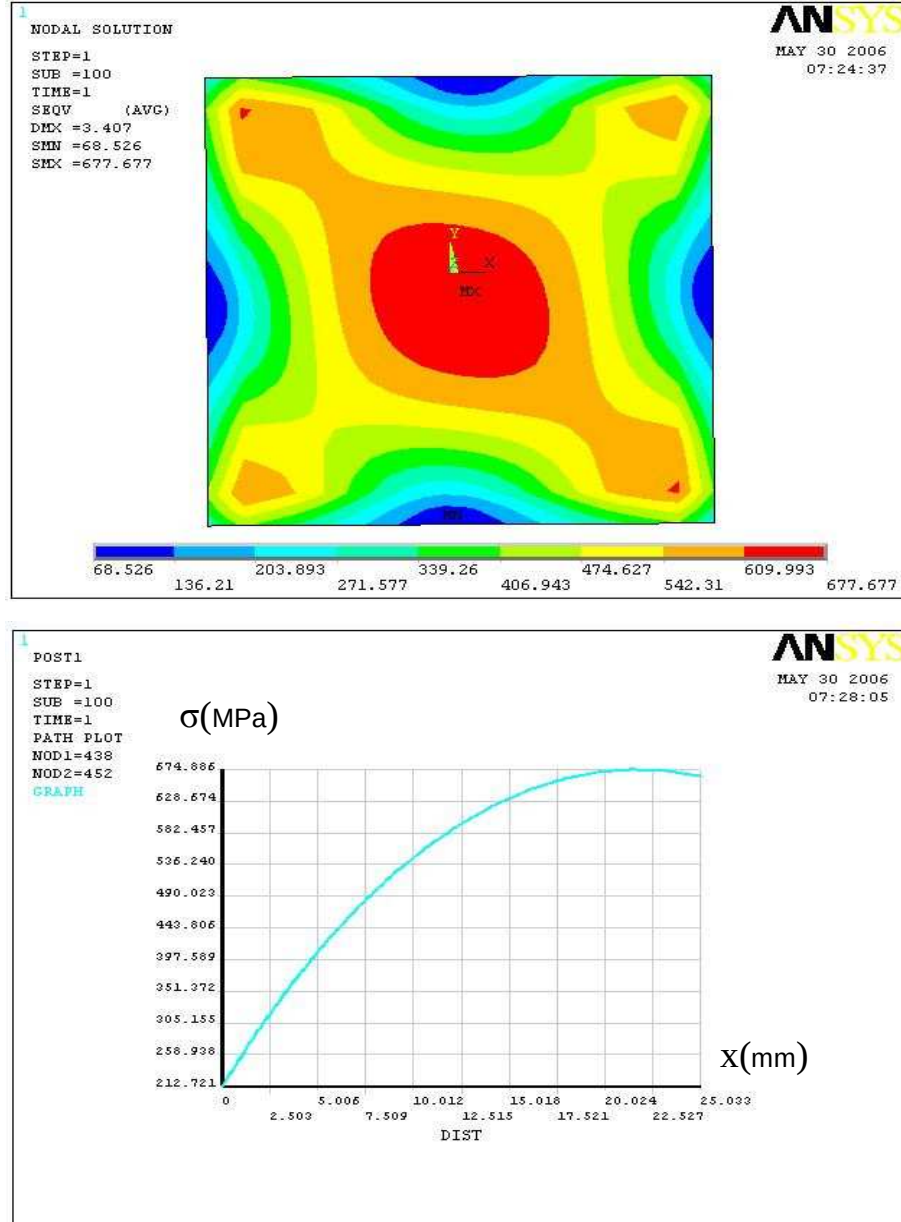
100 iterasyon



Şekil 2.6.  $(0/15^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

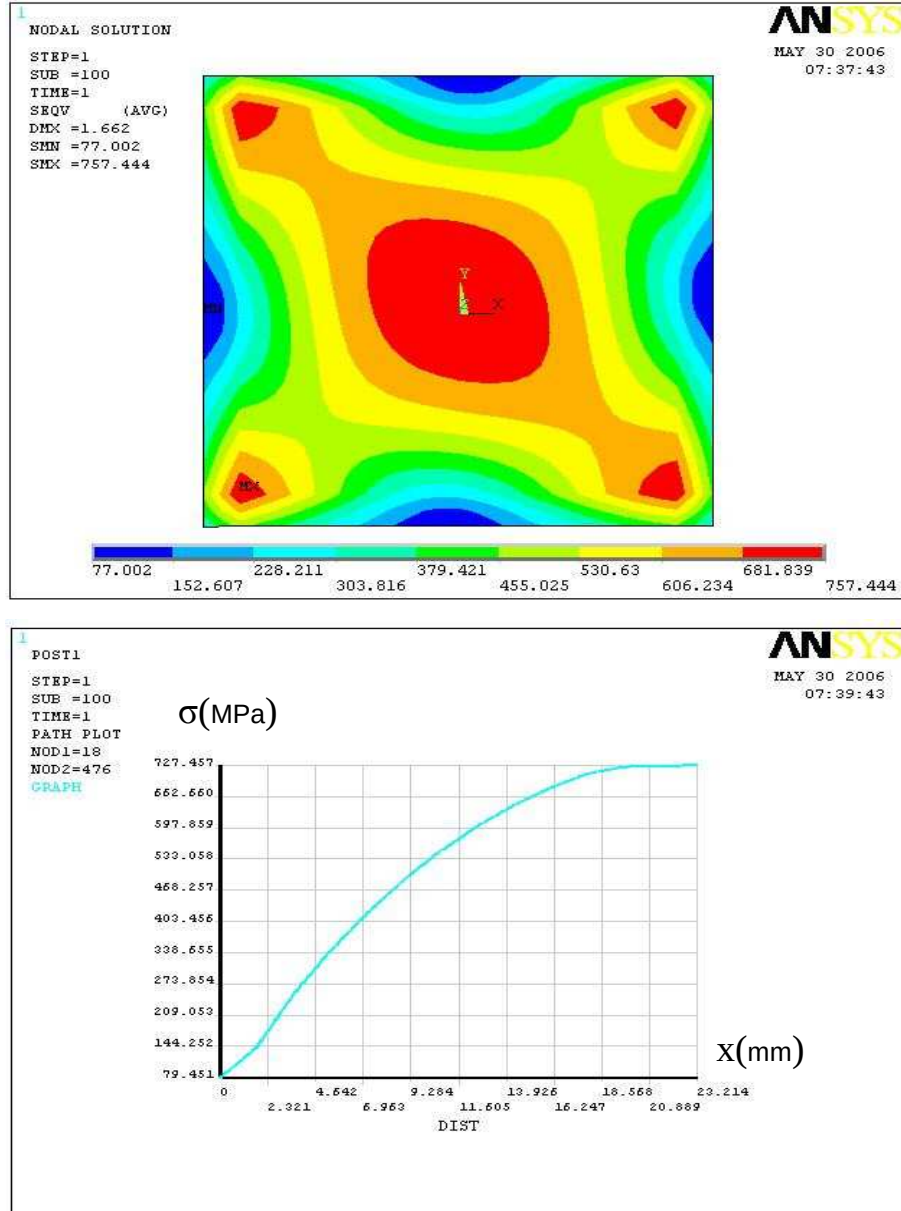
100 iterasyon



Şekil 2.7.  $(0/30^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

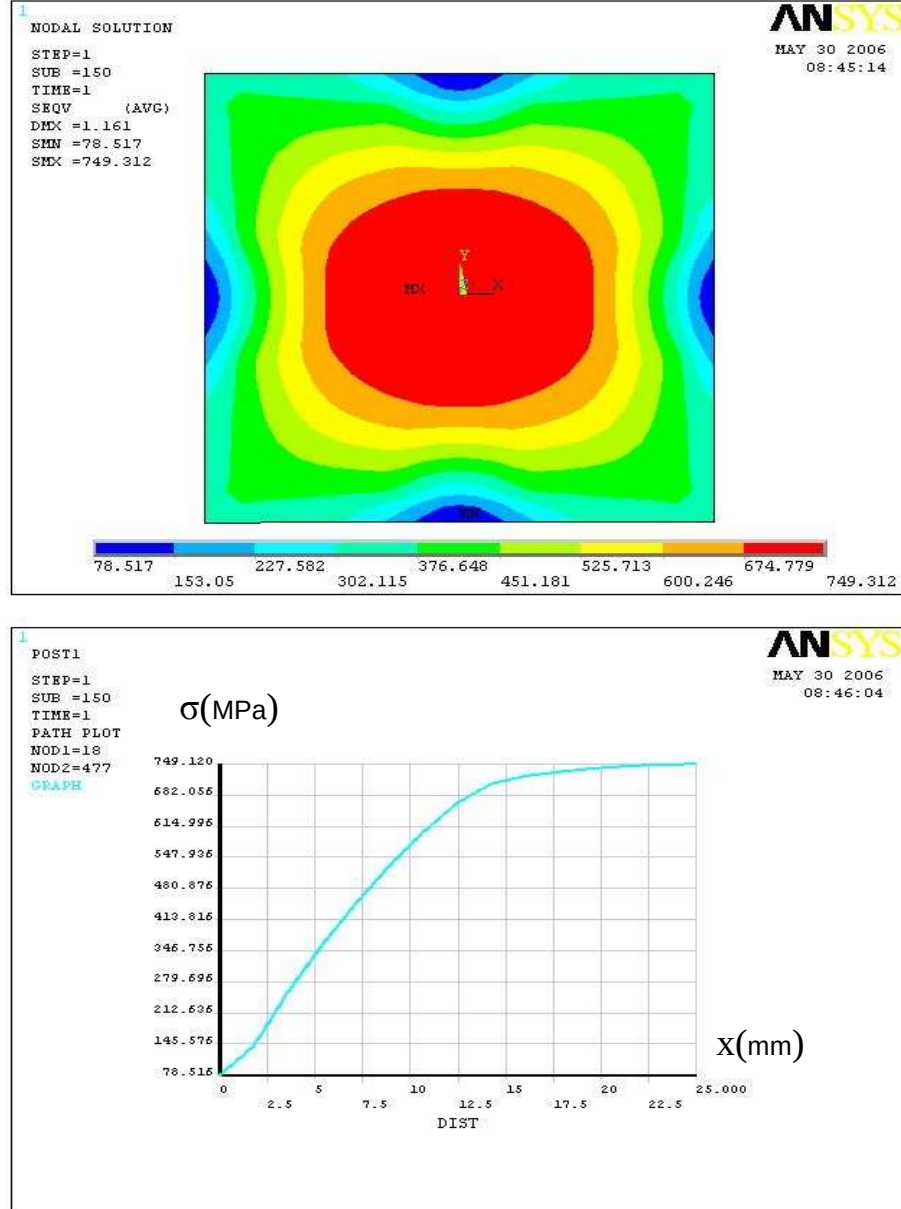
100 iterasyon



Şekil 2.8.  $(0/45^\circ)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

150 iterasyon

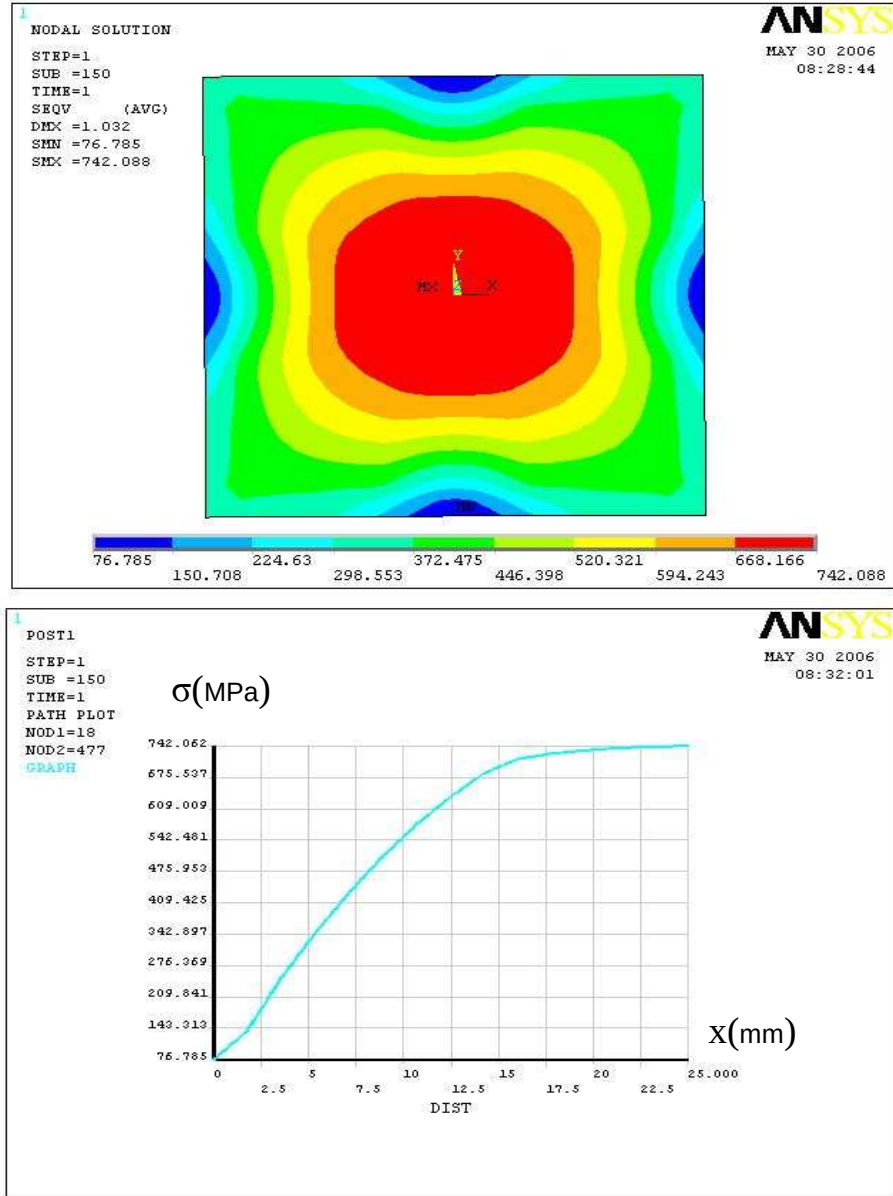


Şekil 2.9.  $(0/90^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı



EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

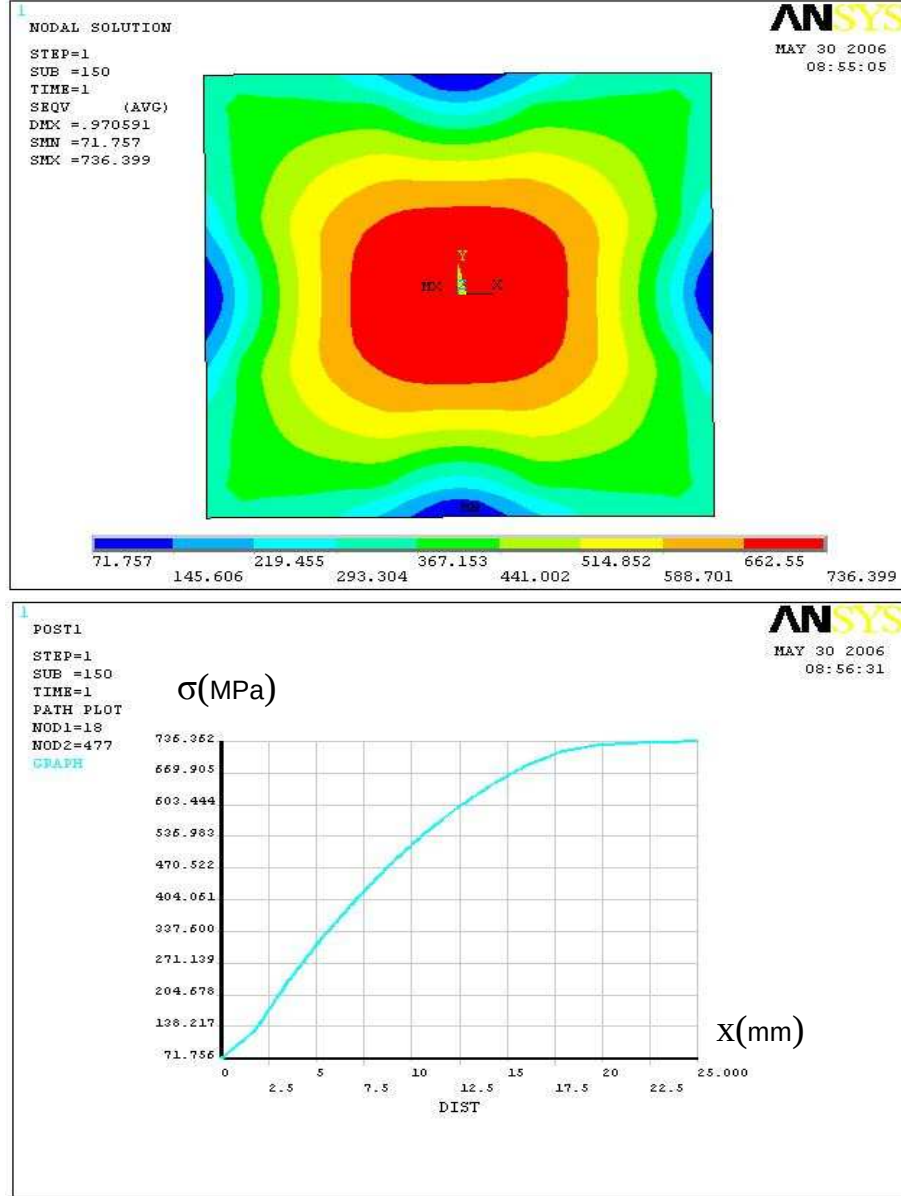
150 iterasyon



Şekil 2.10.  $(0/15^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

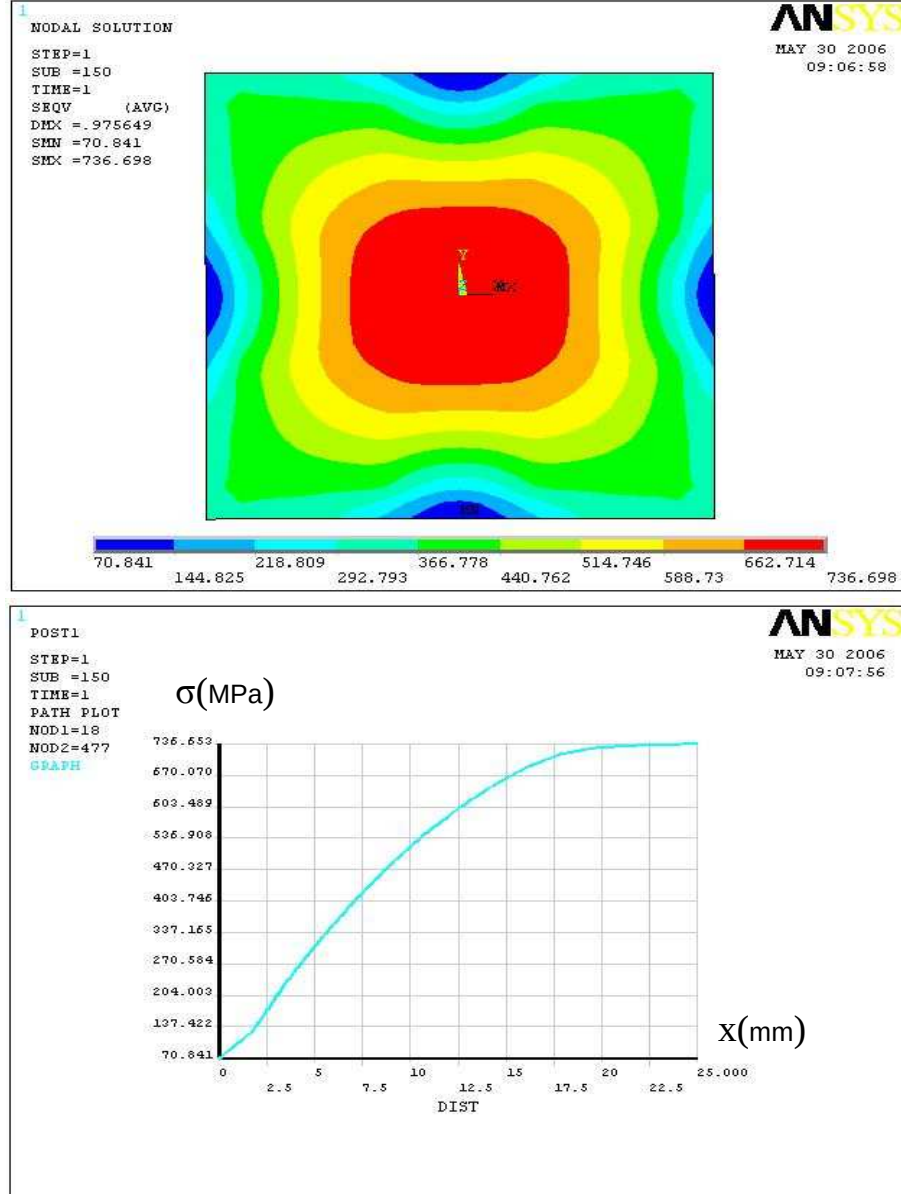
150 iterasyon



Şekil 2.11.  $(0/30^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

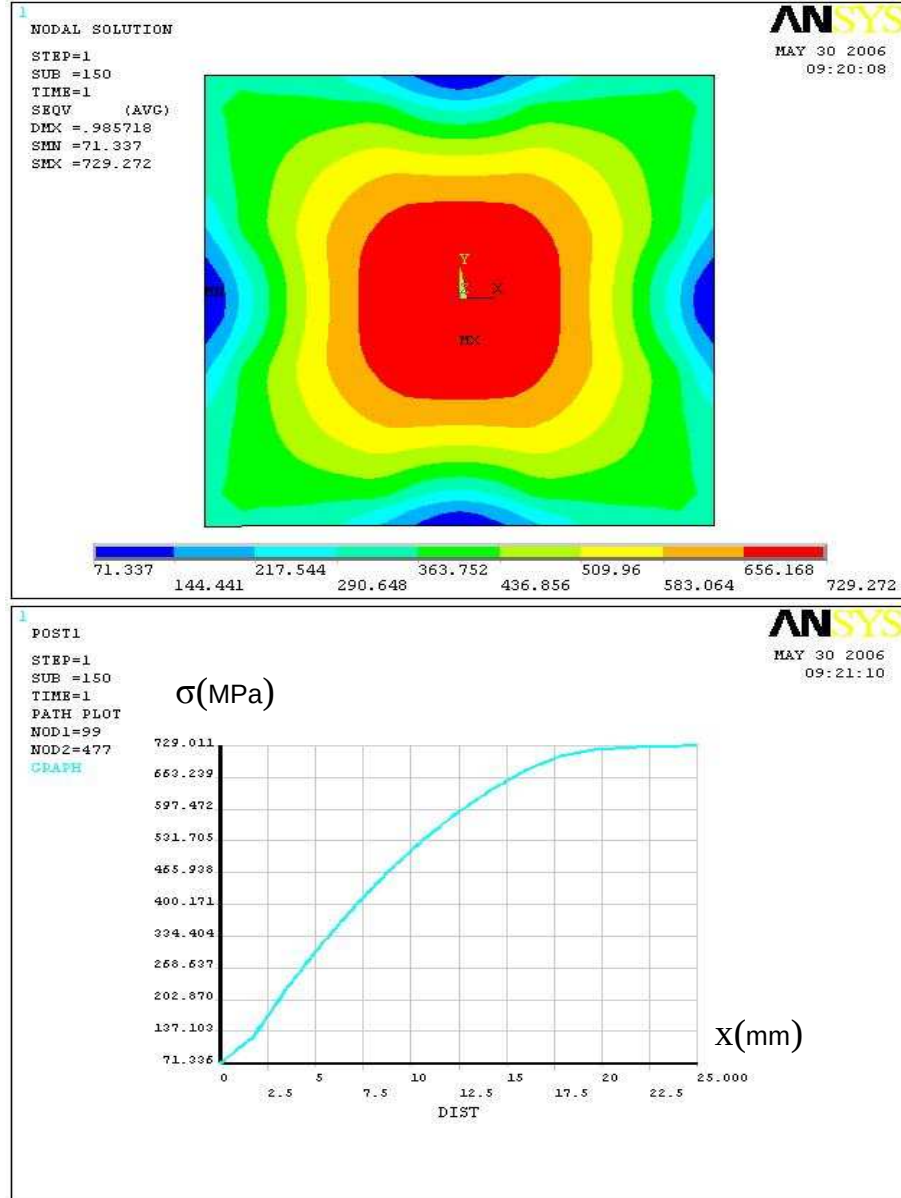
150 iterasyon



Şekil 2.12.  $(0/45^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

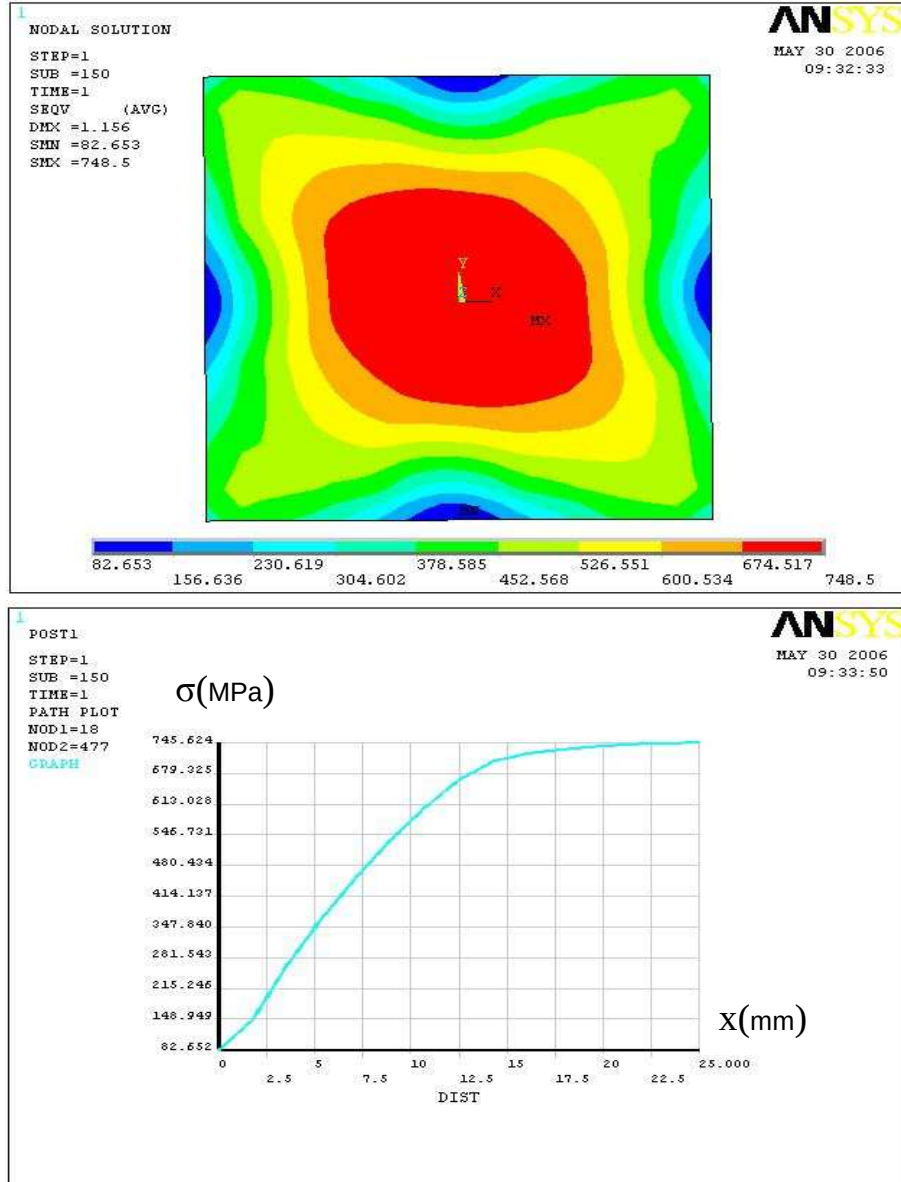
150 iterasyon



Şekil 2.13.  $(0/90^0)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

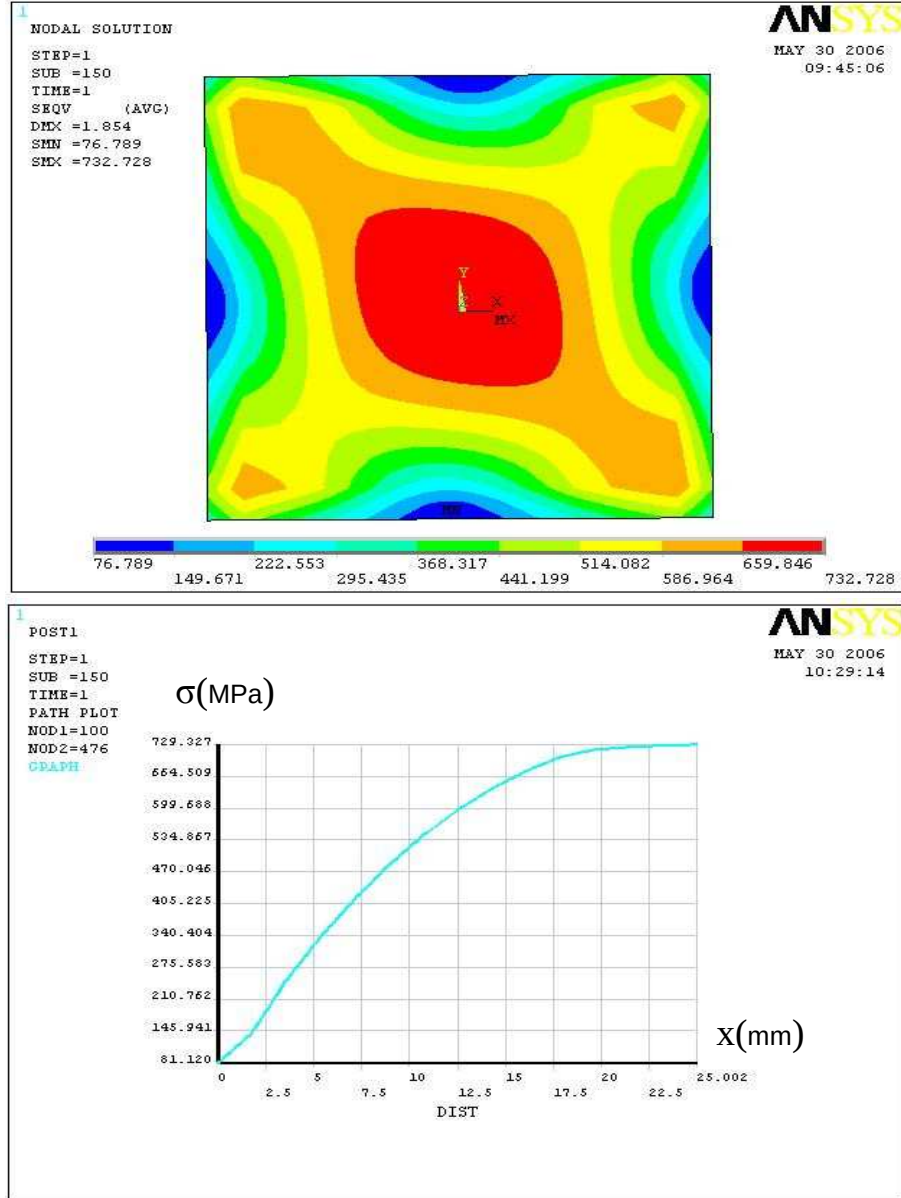
150 iterasyon



Şekil 2.14.  $(15/-15^{\circ})_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

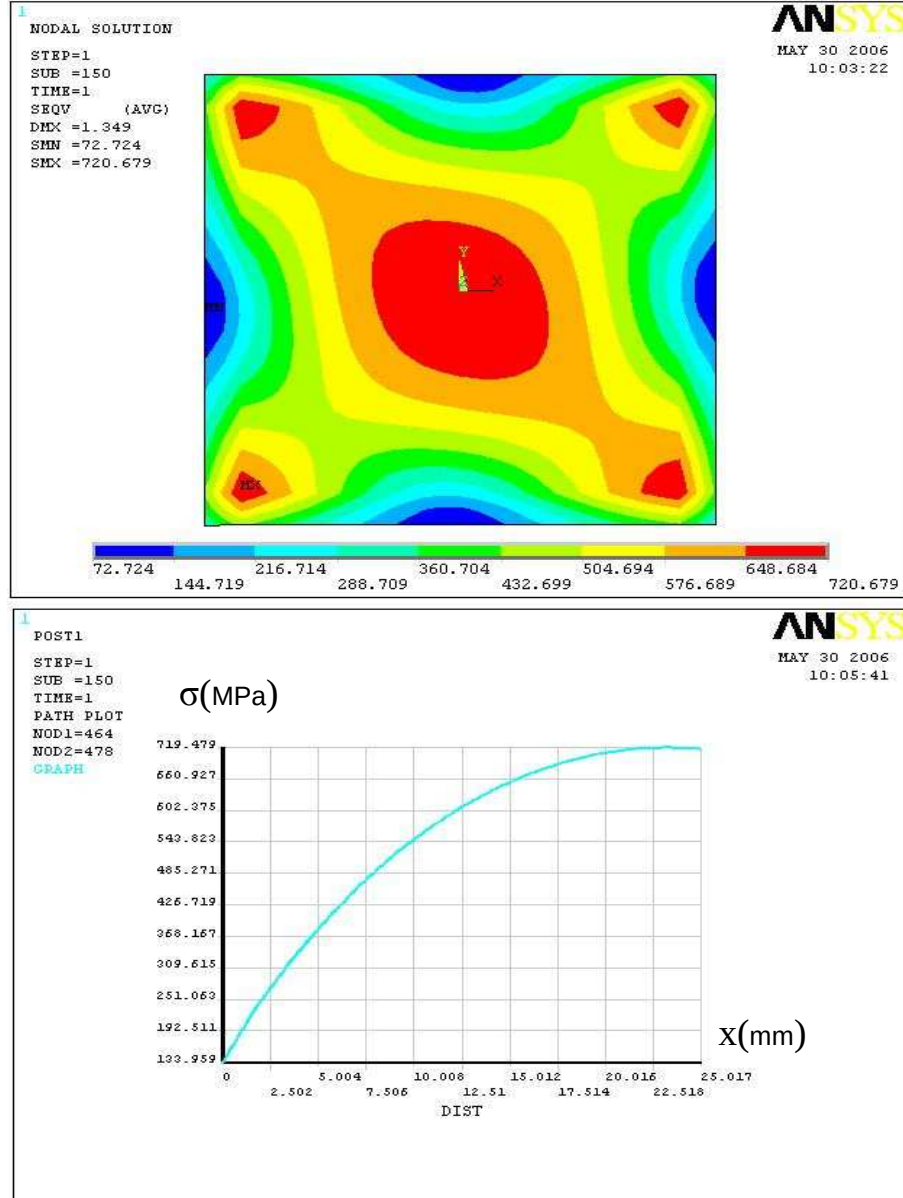
150 iterasyon



Şekil 2.15.  $(30/-30^\circ)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

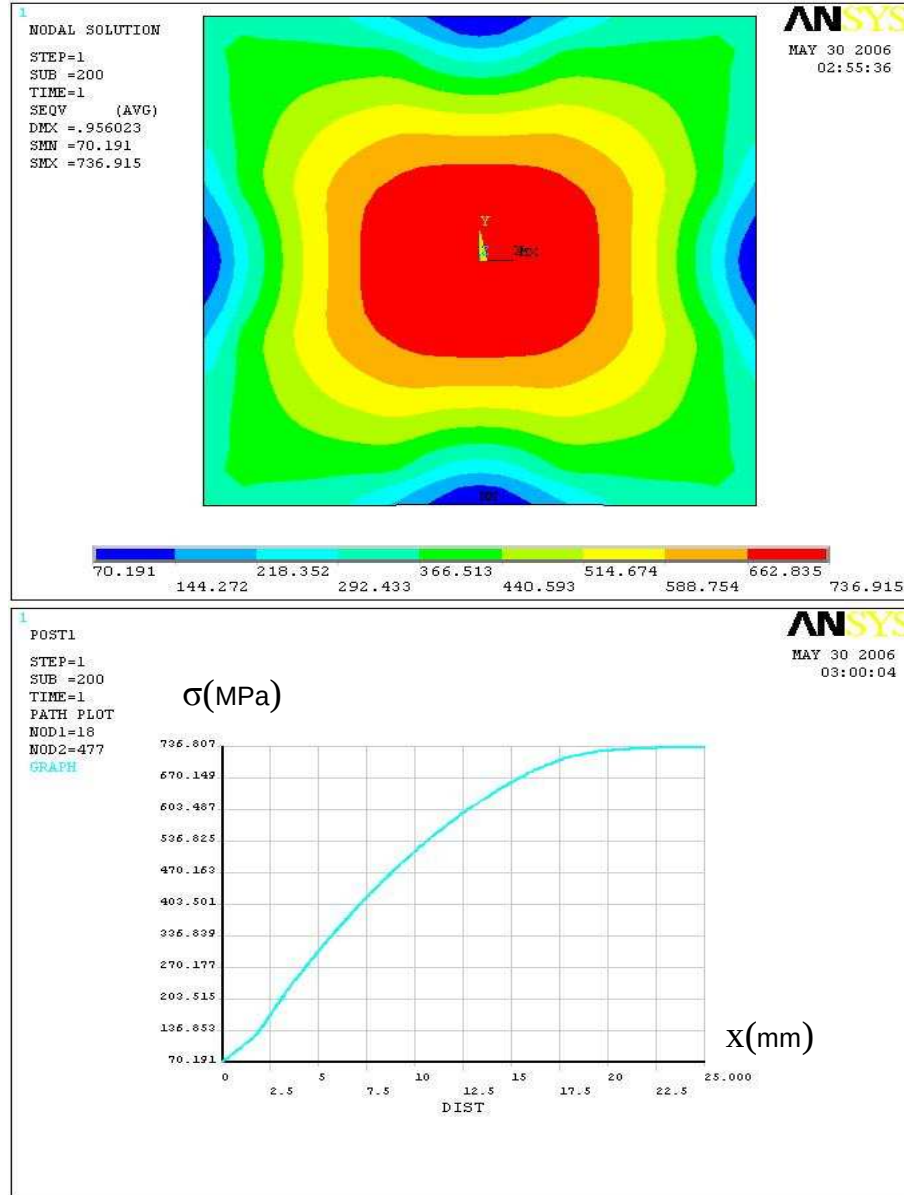
150 iterasyon



Şekil 2.16.  $(45/-45)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

200 iterasyon

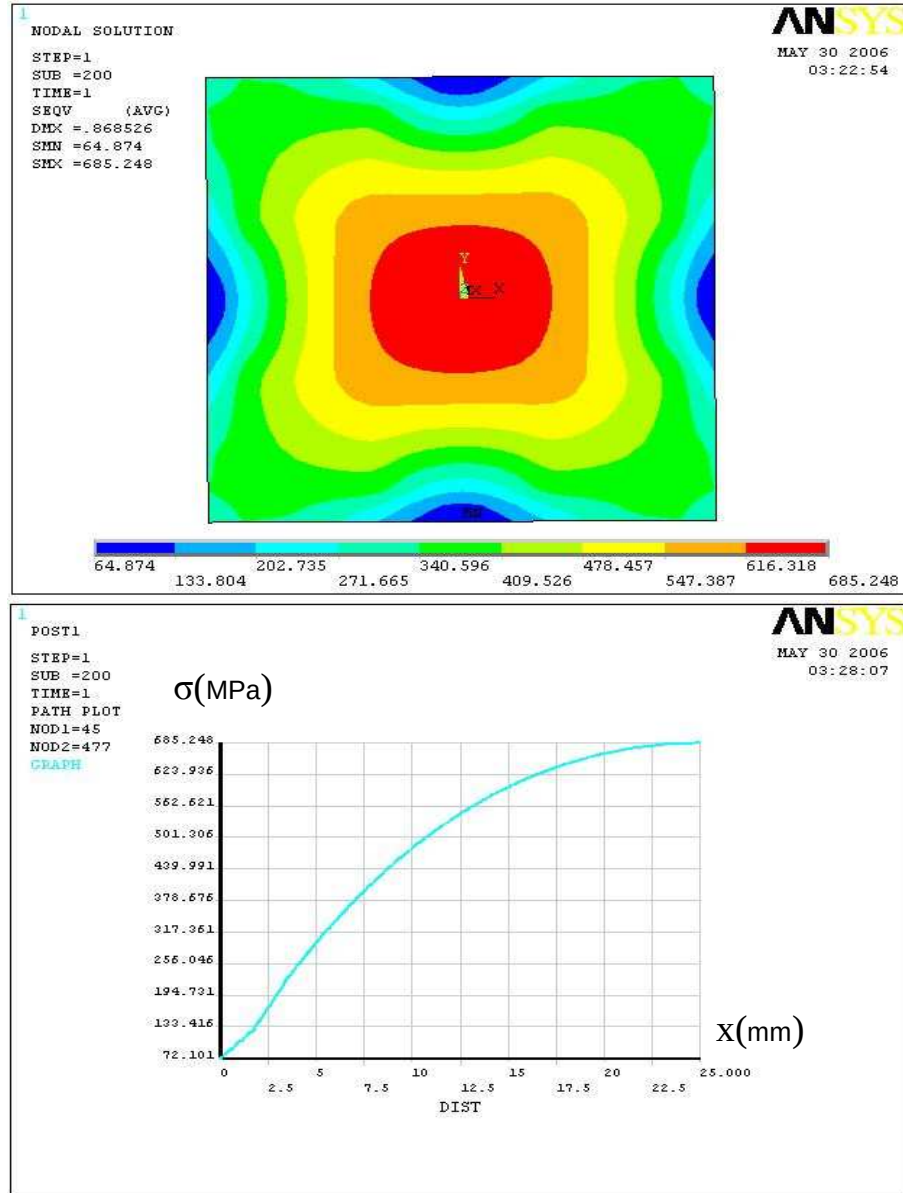


Şekil 2.17.  $(0/90^\circ)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı



EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

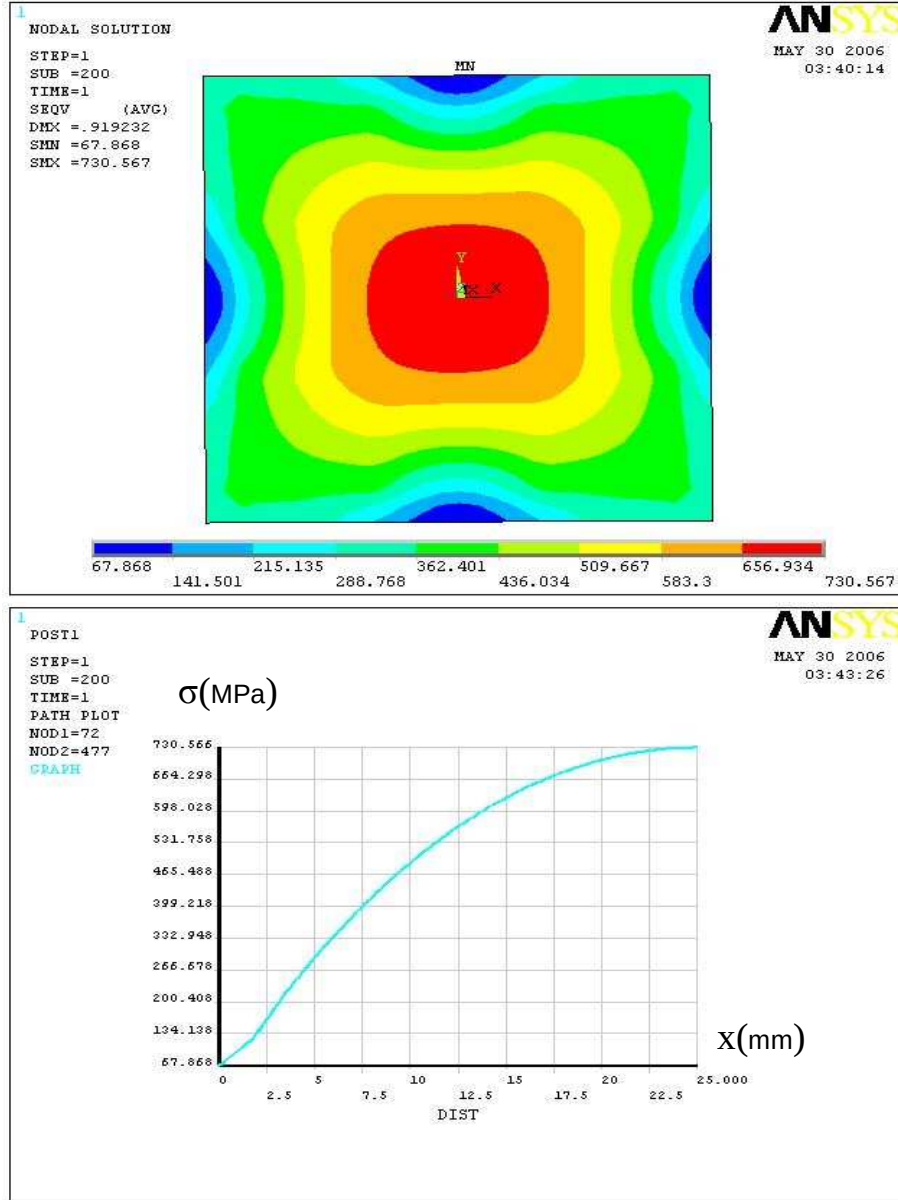
200 iterasyon



Şekil 2.18.  $(0/15^0)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

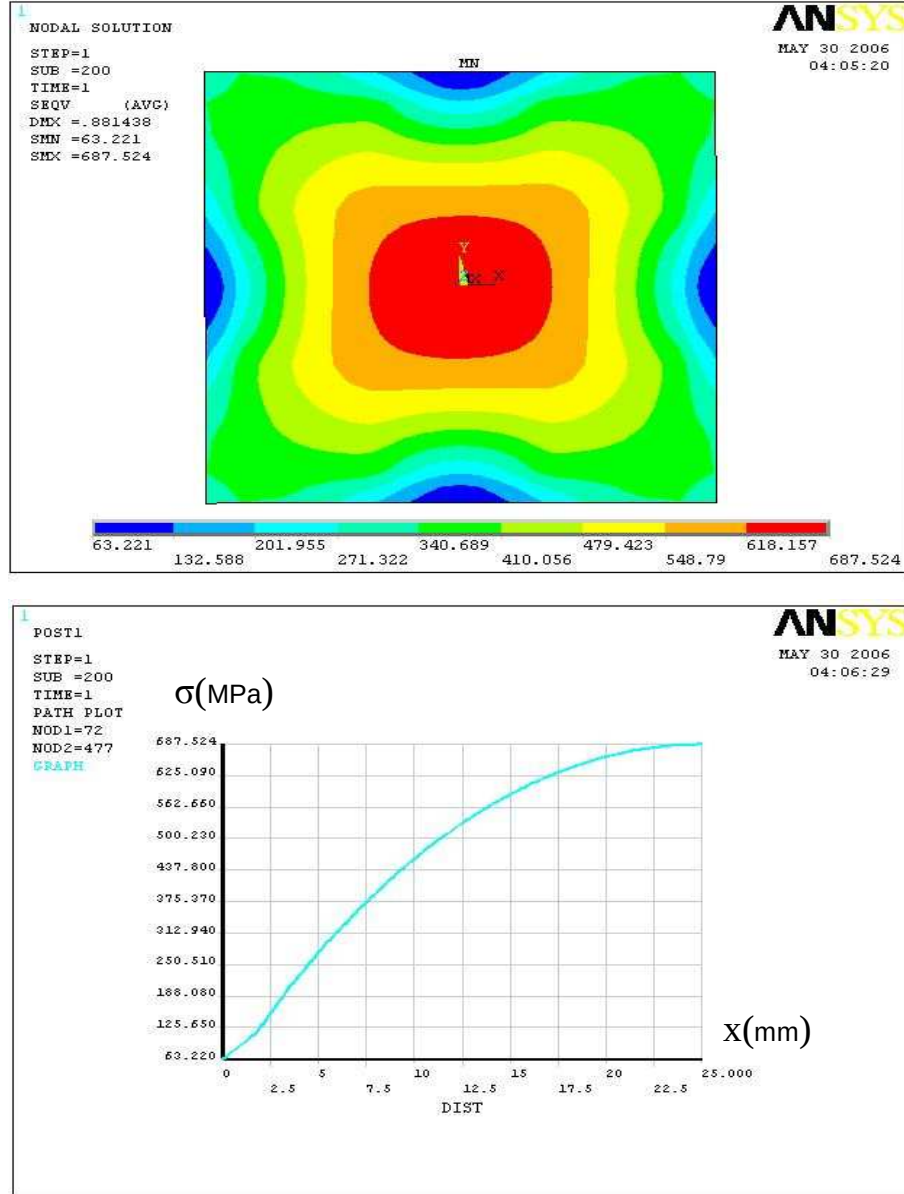
200 iterasyon



Şekil 2.19.  $(0/30^\circ)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

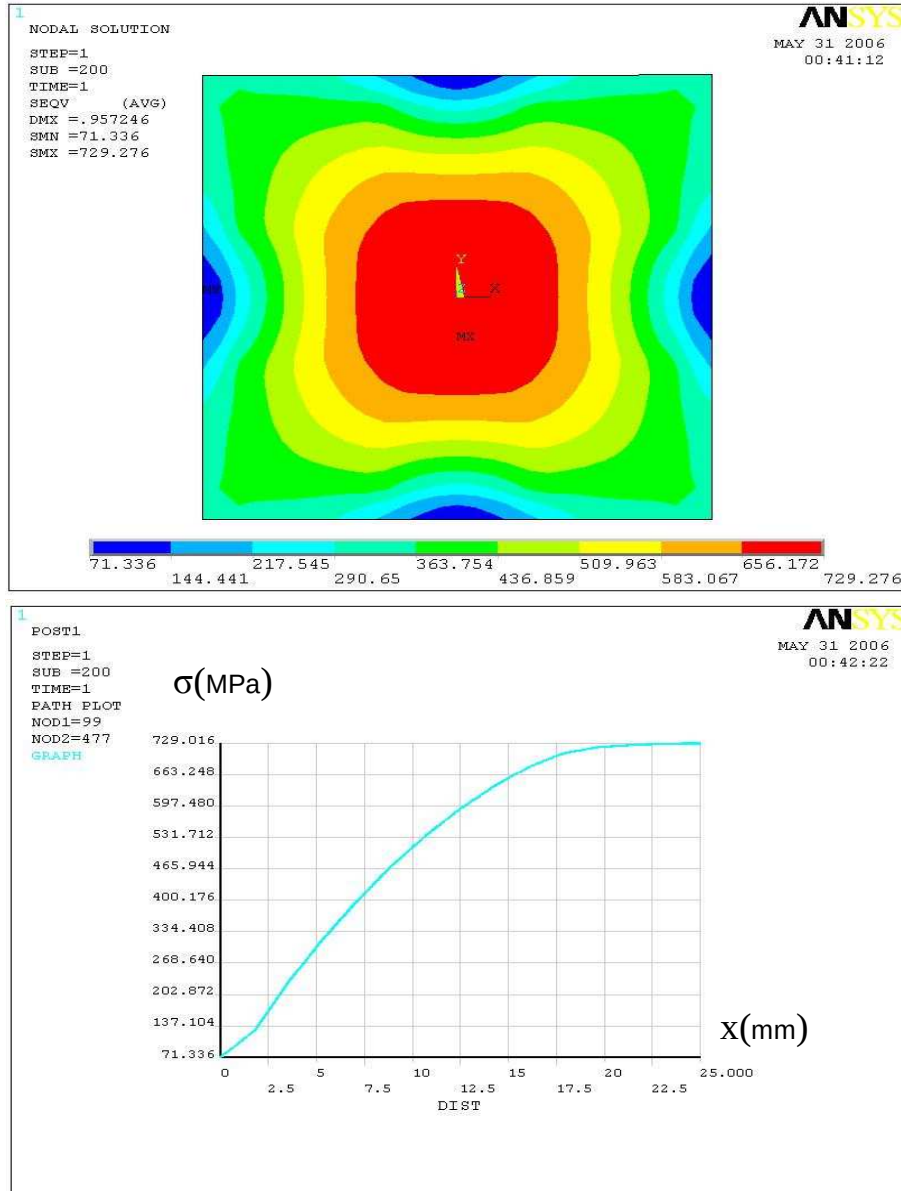
200 iterasyon



Şekil 2.20.  $(0/45^0)_2$  simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

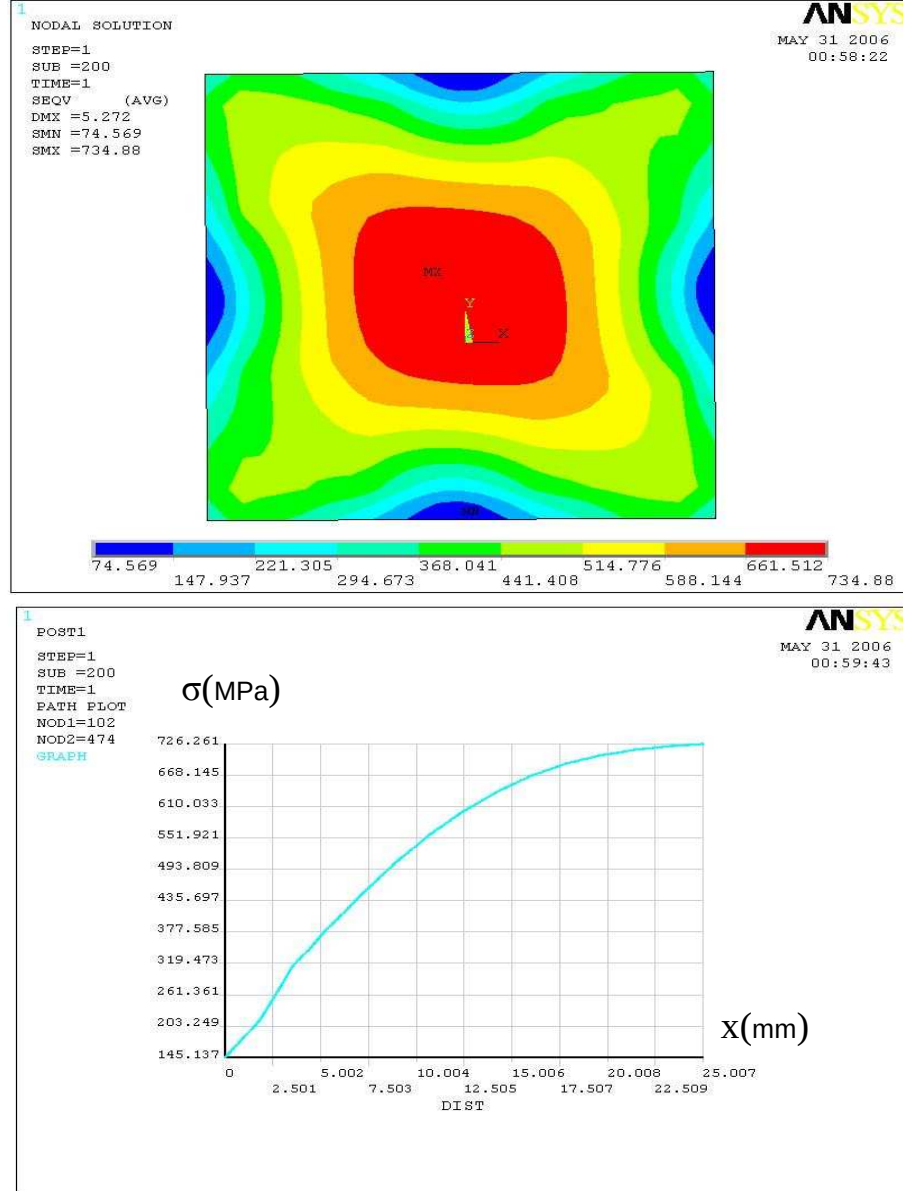
200 iterasyon



Şekil 2.21.  $(0/90)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

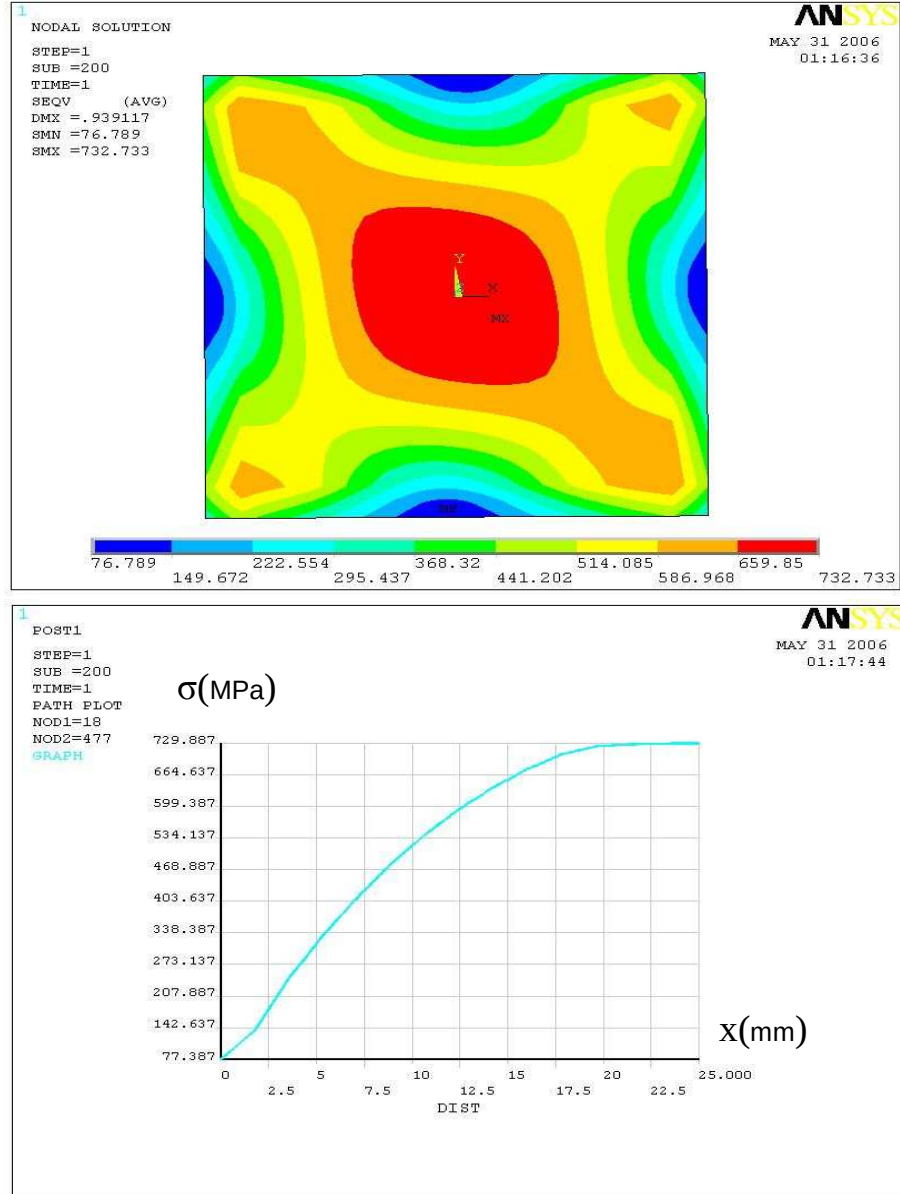
200 iterasyon



Şekil 2.22.  $(15/-15^\circ)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

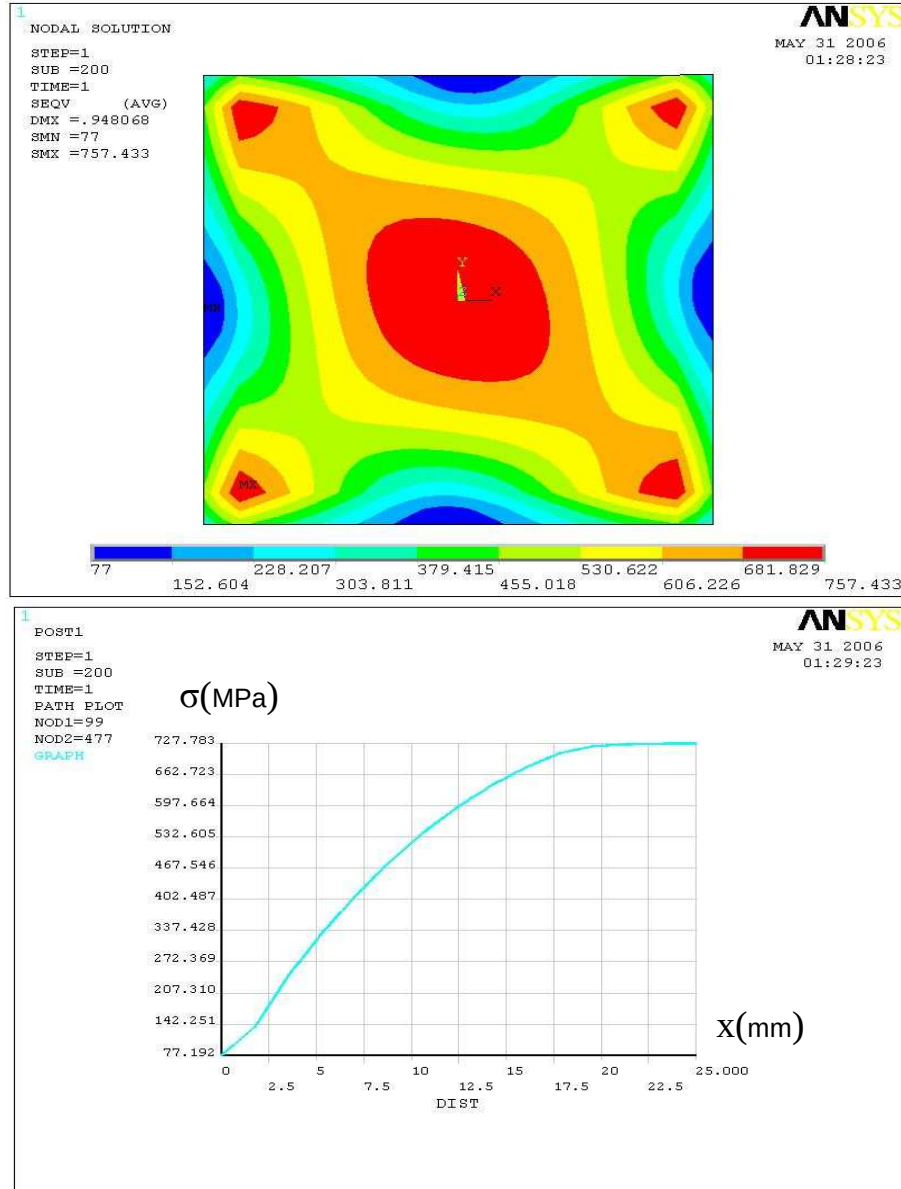
200 iterasyon



Şekil 2.23.  $(30/-30)_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

EK-2 (Devam) ANSYS' te yapılan analize ait ekran görüntüleri

200 iterasyon



Şekil 2.24.  $(45/-45^{\circ})_2$  antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

## EK-3 Maksimum ve minimum gerilmeler

Çizelge 3.1. Simetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

| Yönlenme Açıları | İterasyon Sayısı | Gerilme Bölgeleri | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $(0/90^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -760.36          | -628.48          | -197.43           | -24.577           | -29.188           |
|                  |                  | Maksimum          | 799.44           | 659.45           | 197.43            | 24.577            | 29.188            |
|                  | 150              | Minimum           | -805.13          | -663.75          | -212.11           | -31.101           | -36.792           |
|                  |                  | Maksimum          | 827.34           | 679.42           | 212.11            | 31.101            | 36.792            |
|                  | 200              | Minimum           | -764.43          | -630.54          | -217.43           | -24.680           | -29.292           |
|                  |                  | Maksimum          | 803.46           | 661.58           | 217.43            | 24.680            | 29.322            |
| $(0/15^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -683.49          | -558.50          | -222.37           | -19.449           | -22.782           |
|                  |                  | Maksimum          | 735.60           | 610.17           | 222.45            | 19.449            | 22.782            |
|                  | 150              | Minimum           | -799.89          | -651.67          | -219.79           | -28.065           | -32.738           |
|                  |                  | Maksimum          | 813.51           | 674.85           | 219.79            | 28.065            | 32.738            |
|                  | 200              | Minimum           | -688.49          | -560.50          | -215.36           | -19.649           | -23.792           |
|                  |                  | Maksimum          | 739.59           | 613.37           | 213.48            | 19.649            | 22.792            |
| $(0/30^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -720.47          | -590.91          | -214.55           | -22.148           | -25.914           |
|                  |                  | Maksimum          | 783.51           | 650.35           | 214.69            | 22.148            | 25.914            |
|                  | 150              | Minimum           | -768.92          | -628.55          | -216.97           | -24.967           | -29.219           |
|                  |                  | Maksimum          | 801.93           | 662.53           | 217.15            | 24.967            | 29.219            |
|                  | 200              | Minimum           | -724.71          | -592.94          | -215.54           | -23.151           | -26.917           |
|                  |                  | Maksimum          | 788.75           | 653.49           | 215.73            | 23.151            | 26.917            |
| $(0/45^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -683.80          | -561.51          | -212.22           | -19.518           | -21.854           |
|                  |                  | Maksimum          | 742.42           | 614.62           | 212.54            | 19.518            | 21.854            |
|                  | 150              | Minimum           | -768.71          | -630.36          | -216.95           | -24.932           | -29.328           |
|                  |                  | Maksimum          | 802.58           | 662.17           | 217.29            | 24.932            | 29.328            |
|                  | 200              | Minimum           | -688.83          | -565.74          | -215.21           | -19.920           | -22.957           |
|                  |                  | Maksimum          | 745.86           | 618.65           | 212.55            | 19.920            | 22.957            |

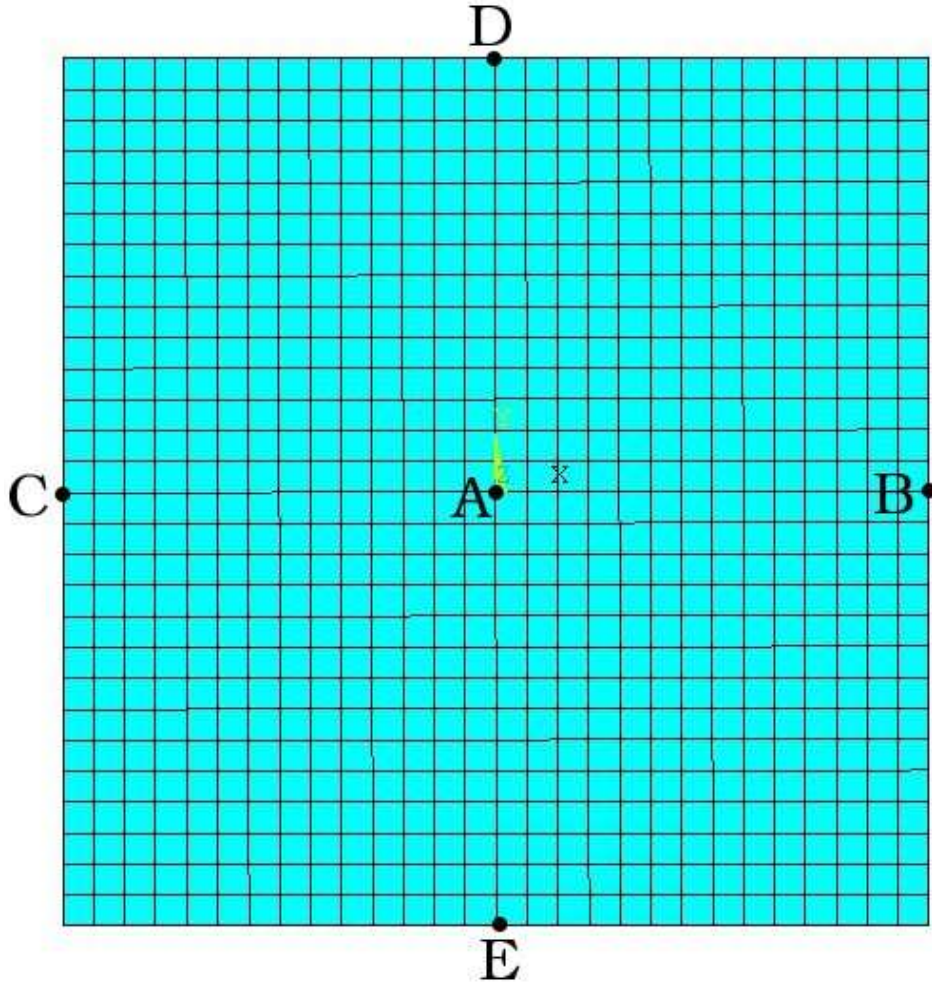


## EK-3 (Devam) Maksimum ve minimum gerilmeler

Çizelge 3.2. Antisimetrik açılı takviyeli kompozit için elasto-plastik gerilmelerin dağılımı

| Yönlenme Açıları | İterasyon Sayısı | Gerilme Bölgeleri | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $(0/90^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -741.98          | -650.19          | -217.52           | -29.138           | -27.087           |
|                  |                  | Maksimum          | 676.34           | 782.92           | 217.51            | 29.138            | 27.087            |
|                  | 150              | Minimum           | -742.03          | -653.23          | -216.52           | -29.941           | -27.790           |
|                  |                  | Maksimum          | 677.84           | 784.32           | 216.91            | 29.941            | 27.790            |
|                  | 200              | Minimum           | -744.05          | -655.25          | -218.52           | -30.142           | -28.091           |
|                  |                  | Maksimum          | 678.74           | 785.75           | 219.52            | 30.142            | 28.091            |
| $(0/15^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -719.56          | -590.58          | -259.93           | -22.103           | -25.227           |
|                  |                  | Maksimum          | 773.90           | 656.39           | 264.32            | 22.103            | 25.227            |
|                  | 150              | Minimum           | -805.04          | -660.78          | -273.40           | -31.198           | -35.647           |
|                  |                  | Maksimum          | 812.75           | 686.61           | 279.15            | 31.198            | 35.647            |
|                  | 200              | Minimum           | -762.74          | -625.66          | -264.30           | -24.904           | -28.422           |
|                  |                  | Maksimum          | 789.29           | 670.95           | 269.06            | 24.904            | 28.422            |
| $(0/30^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -674.27          | -560.95          | -348.49           | -19.893           | -21.533           |
|                  |                  | Maksimum          | 706.40           | 636.09           | 350.84            | 19.893            | 21.533            |
|                  | 150              | Minimum           | -754.42          | -627.33          | -367.22           | -25.153           | -27.223           |
|                  |                  | Maksimum          | 762.96           | 691.18           | 371.25            | 25.153            | 27.223            |
|                  | 200              | Minimum           | -756.74          | -629.75          | -369.24           | -25.154           | -27.224           |
|                  |                  | Maksimum          | 765.76           | 697.68           | 375.36            | 25.158            | 27.224            |
| $(0/45^\circ)_2$ | 100              | Minimum           | -749.48          | -633.90          | -436.58           | -26.222           | -26.342           |
|                  |                  | Maksimum          | 733.39           | 720.70           | 427.23            | 26.222            | 26.342            |
|                  | 150              | Minimum           | -708.68          | -599.42          | -415.42           | -23.395           | -23.514           |
|                  |                  | Maksimum          | 722.90           | 705.38           | 405.62            | 23.395            | 23.514            |
|                  | 200              | Minimum           | -753.73          | -635.74          | -438.57           | -27.225           | -25.345           |
|                  |                  | Maksimum          | 748.38           | 723.72           | 436.23            | 27.225            | 25.345            |

EK-4 Belirli noktalara göre gerilmeler



Şekil 4.1. Gerilme durumu incelenen noktalar

## EK-4 (Devam) Belirli noktalara göre gerilmeler

Çizelge 4.1. Simetrik yönlenme ve 100 iterasyon için gerilmeler

| Yönlenme Açıları      | NODLAR | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|-----------------------|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (0°/90°) <sub>2</sub> | A      | 798.82           | 652.96           | 0.20290           | -0.618E-03        | -0.257E-04        |
|                       | B      | 95.410           | 32.477           | -0.43682          | 0.275E-01         | -6.1401           |
|                       | C      | 94.785           | 31.997           | 0.47222           | -0.284E-01        | 6.1766            |
|                       | D      | 373.15           | 427.36           | 0.66836           | -23.411           | -0.185E-01        |
|                       | E      | 372.77           | 425.63           | 40.319            | -23.078           | -1.2013           |
| (0°/15°) <sub>2</sub> | A      | 739.60           | 613.37           | -0.47571          | 0.351E-03         | 0.106E-05         |
|                       | B      | 82.581           | 27.985           | 1.5870            | -0.137E-01        | 4.2004            |
|                       | C      | 81.470           | 27.332           | 1.3112            | 0.140E-01         | -4.2147           |
|                       | D      | 337.62           | 382.94           | 0.44625           | -18.561           | 0.11310           |
|                       | E      | 336.48           | 381.48           | 36.406            | -18.277           | -0.83006          |
| (0°/30°) <sub>2</sub> | A      | 788.71           | 653.45           | -1.5662           | -0.385E-03        | 0.497E-04         |
|                       | B      | 86.628           | 28.145           | 2.3317            | -0.15232          | -5.2489           |
|                       | C      | 86.0256          | 27.055           | 2.0120            | 0.18615           | 5.7455            |
|                       | D      | 357.55           | 406.47           | 0.68014           | -20.987           | 0.1439            |
|                       | E      | 356.25           | 404.76           | 38.519            | -20.654           | -0.9118           |
| (0°/45°) <sub>2</sub> | A      | 336.97           | 380.86           | 1.1994            | -18.495           | 0.281E-01         |
|                       | B      | 82.023           | 30.188           | 1.8827            | -0.11042          | -4.6779           |
|                       | C      | 8.933            | 28.587           | 1.6850            | 0.12580           | 4.2235            |
|                       | D      | 336.97           | 380.86           | 1.1994            | -18.495           | 0.283E-01         |
|                       | E      | -361.15          | -359.78          | -43.817           | 17.249            | 1.1768            |

## EK-4 (Devam) Belirli noktalara göre gerilmeler

Çizelge 4.2. Simetrik yönlenme ve 150 iterasyon için gerilmeler

| Yönlenme Açıları      | NODLAR | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|-----------------------|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (0°/90°) <sub>2</sub> | A      | 817.18           | 654.29           | 0.24241           | 0.142E-04         | -0.167E-06        |
|                       | B      | 106.42           | 30.887           | -0.48568          | 0.345E-01         | -7.6905           |
|                       | C      | 105.56           | 30.512           | -0.5014           | -0.356E-01        | 7.3545            |
|                       | D      | 413.29           | 475.02           | 0.72885           | -29.298           | -0.229E-01        |
|                       | E      | 412.90           | 473.08           | 44.362            | -28.886           | -1.4944           |
| (0°/15°) <sub>2</sub> | A      | 398.26           | 456.51           | 0.49761           | -26.548           | 0.14801           |
|                       | B      | 96.947           | 24.642           | 1.7612            | -0.12915          | -6.6021           |
|                       | C      | 96.856           | 24.589           | 1.9752            | 0.21923           | -5.8714           |
|                       | D      | 398.26           | 456.51           | 0.49761           | -26.548           | 0.14801           |
|                       | E      | 397.08           | 454.76           | 42.323            | -26.152           | -1.1675           |
| (0°/30°) <sub>2</sub> | A      | 797.58           | 654.02           | -0.96234          | -0.163E-05        | 0.134E-05         |
|                       | B      | 91.766           | 27.439           | 2.4969            | -0.17023          | -5.9009           |
|                       | C      | 91.965           | 27.787           | 2.3259            | -0.15346          | 5.3030            |
|                       | D      | 377.77           | 430.87           | 0.76014           | -23.628           | 0.13897           |
|                       | E      | 376.51           | 428.99           | 40.543            | -23.254           | -1.0385           |
| (0°/45°) <sub>2</sub> | A      | 377.05           | 429.50           | 1.3453            | -23.572           | 0.319E-01         |
|                       | B      | 92.370           | 29.361           | 2.2244            | -0.14619          | -5.9466           |
|                       | C      | 92.892           | 29.781           | 2.5384            | 0.10258           | 5.3035            |
|                       | D      | 377.05           | 429.50           | 1.3453            | -23.572           | 0.318E-01         |
|                       | E      | 376.18           | 427.26           | 41.079            | -23.189           | -1.1449           |

## EK-4 (Devam) Belirli noktalara göre gerilmeler

Çizelge 4.3. Simetrik yönlenme ve 200 iterasyon için gerilmeler

| Yönlenme Açıları      | NODLAR | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|-----------------------|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (0°/90°) <sub>2</sub> | A      | 798.86           | 652.95           | 0.20094           | -0.201E-05        | 0.737E-06         |
|                       | B      | 95.407           | 32.483           | -0.4379           | 0.274E-01         | -6.1403           |
|                       | C      | 95.817           | 32.953           | -0.4689           | -0.295E-01        | 6.1893            |
|                       | D      | 373.17           | 427.38           | 0.66905           | -23.414           | -0.198E-01        |
|                       | E      | 372.80           | 425.64           | 40.322            | -23.081           | -1.2018           |
| (0°/15°) <sub>2</sub> | A      | 739.59           | 613.37           | -0.70975          | 0.135E-04         | 0.104E-04         |
|                       | B      | 81.475           | 27.329           | 1.2107            | -0.759E-01        | -4.6348           |
|                       | C      | 81.886           | 27.539           | 1.2217            | 0.787E-01         | 4.9858            |
|                       | D      | 337.63           | 382.94           | 0.53028           | -18.561           | 0.786E-01         |
|                       | E      | 336.61           | 381.34           | 36.489            | -18.275           | -0.86393          |
| (0°/30°) <sub>2</sub> | A      | 788.75           | 653.49           | -1.8503           | 0.168E-04         | -0.755E-05        |
|                       | B      | 86.636           | 28.139           | 2.2089            | -0.14132          | -5.2494           |
|                       | C      | 86.847           | 28.529           | 2.2179            | 0.17632           | 5.3698            |
|                       | D      | 357.57           | 406.49           | 0.78298           | -20.990           | 0.998E-01         |
|                       | E      | 356.43           | 404.62           | 38.622            | -20.655           | -0.95520          |
| (0°/45°) <sub>2</sub> | A      | 742.46           | 614.65           | -2.4324           | 0.446E-04         | 0.515E-05         |
|                       | B      | 82.024           | 30.189           | 1.8534            | -0.10779          | -4.6782           |
|                       | C      | 82.354           | 30.387           | 1.9638            | --0.1189          | 4.8652            |
|                       | D      | 336.99           | 380.87           | 1.2245            | -18.497           | 0.171E-01         |
|                       | E      | 336.13           | 378.83           | 37.109            | -18.191           | -0.92481          |

## EK-4 (Devam) Belirli noktalara göre gerilmeler

Çizelge 4.4. Antisimetrik yönlenme ve 100 iterasyon için gerilmeler

| Yönlenme Açıları      | NODLAR | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|-----------------------|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (0°/90°) <sub>2</sub> | A      | 668.99           | 776.98           | -0.17451          | 0.791E-04         | 0.126E-05         |
|                       | B      | 81.610           | 33.829           | -0.50559          | 0.323E-01         | -5.2966           |
|                       | C      | 81.825           | 33.968           | -0.51559          | -0.328E-01        | 5.3756            |
|                       | D      | 320.32           | 498.80           | 0.47622           | -27.353           | -0.114E-01        |
|                       | E      | 319.98           | 496.72           | 39.815            | -26.983           | -1.3286           |
| (0°/15°) <sub>2</sub> | A      | 773.90           | 656.39           | 25.310            | 0.636E-05         | -0.164E-04        |
|                       | B      | 85.547           | 30.058           | 5.2342            | -0.32425          | -5.1389           |
|                       | C      | 85.747           | 30.178           | 5.942             | 0.32425           | 5.1389            |
|                       | D      | 351.46           | 410.13           | 18.755            | -20.973           | -0.75553          |
|                       | E      | 351.37           | 411.10           | 55.768            | -20.728           | -1.7606           |
| (0°/30°) <sub>2</sub> | A      | 706.40           | 636.09           | 40.738            | 0.345E-05         | -0.876E-05        |
|                       | B      | 78.385           | 33.537           | 8.1501            | -0.46758          | -4.4067           |
|                       | C      | 78.025           | 32.957           | 8.0581            | 0.46758           | 4.4067            |
|                       | D      | 320.15           | 394.76           | 28.760            | -18.859           | -1.1344           |
|                       | E      | 320.69           | 395.66           | 62.406            | -18.600           | -1.9731           |
| (0°/45°) <sub>2</sub> | A      | 728.02           | 715.54           | 53.486            | 0.326E-04         | -0.667E-05        |
|                       | B      | 85.777           | 37.437           | 11.005            | -0.69475          | -5.4261           |
|                       | C      | 85.935           | 37.612           | 11.005            | 0.69475           | 5.4261            |
|                       | D      | 343.23           | 460.22           | 35.688            | -24.739           | -1.7128           |
|                       | E      | 346.17           | 459.88           | 72.170            | -24.343           | -2.7438           |

## EK-4 (Devam) Belirli noktalara göre gerilmeler

Çizelge 4.5. Antisimetrik yönlenme ve 150 iterasyon için gerilmeler

| Yönlenme Açıları      | NODLAR | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|-----------------------|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (0°/90°) <sub>2</sub> | A      | 668.98           | 777.01           | -0.17280          | -0.705E-04        | -0.632E-04        |
|                       | B      | 81.609           | 33.834           | -0.50613          | 0.3239E-01        | -5.2967           |
|                       | C      | 81.282           | 32.994           | 0.51686           | -0.324E-01        | 5.2967            |
|                       | D      | 320.34           | 498.81           | 0.47754           | -27.355           | -0.116E-01        |
|                       | E      | 319.99           | 496.73           | 39.817            | -26.985           | -1.3289           |
| (0°/15°) <sub>2</sub> | A      | 800.61           | 667.60           | 35.592            | 0.846E-05         | -0.146E-04        |
|                       | B      | 100.86           | 28.213           | 6.5184            | -0.47417          | -7.2042           |
|                       | C      | 101.01           | 28.012           | 6.1234            | 0.47417           | 7.2042            |
|                       | D      | 411.72           | 483.43           | 22.136            | -29.478           | -1.1020           |
|                       | E      | 412.26           | 484.84           | 65.037            | -29.164           | -2.4931           |
| (0°/30°) <sub>2</sub> | A      | 758.95           | 685.86           | 47.848            | 0.234E-05         | 0.113E-05         |
|                       | B      | 88.042           | 35.645           | 9.1649            | -0.58954          | -5.5577           |
|                       | C      | 87.942           | 34.995           | 9.0049            | 0.58954           | 5.5577            |
|                       | D      | 357.38           | 443.56           | 32.199            | -23.809           | -1.4309           |
|                       | E      | 358.07           | 444.51           | 69.405            | -23.484           | -2.4691           |
| (0°/45°) <sub>2</sub> | A      | 722.90           | 705.38           | 49.785            | -0.569E-04        | 0.704E-04         |
|                       | B      | 81.105           | 36.142           | 10.437            | -0.62278          | -4.8501           |
|                       | C      | 80.905           | 35.542           | 10.025            | 0.62278           | 4.8501            |
|                       | D      | 325.31           | 435.10           | 33.811            | -22.101           | -1.5336           |
|                       | E      | 328.09           | 434.83           | 68.546            | -21.749           | -2.4630           |

## EK-4 (Devam) Belirli noktalara göre gerilmeler

Çizelge 4.6. Antisimetrik yönlenme ve 200 iterasyon için gerilmeler

| Yönlenme Açıları      | NODLAR | $\sigma_x$ (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\tau_{xy}$ (MPa) | $\tau_{yz}$ (MPa) | $\tau_{xz}$ (MPa) |
|-----------------------|--------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| (0°/90°) <sub>2</sub> | A      | 668.98           | 777.02           | -0.17111          | -0.235E-05        | 0.579E-05         |
|                       | B      | 81.608           | 33.836           | -0.50667          | 0.323E-01         | -5.2968           |
|                       | C      | 81.001           | 33.133           | 0.51622           | -0.323E-01        | 5.2968            |
|                       | D      | 320.34           | 498.82           | 0.47945           | -27.356           | -0.119E-01        |
|                       | E      | 320.00           | 496.73           | 39.820            | -26.986           | -1.3293           |
| (0°/15°) <sub>2</sub> | A      | 785.32           | 663.28           | 29.134            | -0.783E-05        | -0.224E-04        |
|                       | B      | 90.657           | 29.903           | 5.5882            | -0.36467          | -5.7769           |
|                       | C      | 90.072           | 29.006           | 5.5382            | 0.36467           | 5.7769            |
|                       | D      | 371.40           | 434.90           | 19.932            | -23.607           | -0.87528          |
|                       | E      | 371.56           | 435.97           | 58.864            | -23.338           | -1.9959           |
| (0°/30°) <sub>2</sub> | A      | 758.95           | 685.88           | 47.858            | -0.139E-05        | 0.221E-05         |
|                       | B      | 88.042           | 35.649           | 9.1627            | -0.58930          | -5.5578           |
|                       | C      | 87.992           | 35.051           | 9.0025            | 0.58930           | 5.5578            |
|                       | D      | 357.39           | 443.56           | 32.204            | -23.810           | -1.4321           |
|                       | E      | 358.08           | 444.50           | 69.410            | -23.485           | -2.4703           |
| (0°/45°) <sub>2</sub> | A      | 727.99           | 715.60           | 53.499            | -0.286E-04        | -0.146E-04        |
|                       | B      | 85.776           | 37.454           | 11.005            | -0.69476          | -5.4262           |
|                       | C      | 85.016           | 37.125           | 10.995            | 0.69473           | 5.4262            |
|                       | D      | 343.26           | 460.23           | 35.691            | -24.741           | -1.7134           |
|                       | E      | 346.19           | 459.89           | 72.175            | -24.345           | -2.7445           |



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler:

Soyadı, adı :ATMACA, Alper  
 Uyuğu :T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri :26.02.1973 Çorum  
 Medeni hali :Evli  
 Telefon :0 (364) 2230800  
 Faks :-  
 e-mail :[atmaca@gazi.edu.tr](mailto:atmaca@gazi.edu.tr)

| Eğitim Derece | Eğitim Birimi               | Mezuniyet tarihi |
|---------------|-----------------------------|------------------|
| Lisans        | K. T. Ü. / Makine Müh. Böl. | 1995             |
| Lise          | Atatürk Lisesi              | 1990             |

### İş Deneyimi

| Yıl   | Yer               | Görev             |
|-------|-------------------|-------------------|
| 1999- | Gazi Üniversitesi | Öğretim Görevlisi |

### Yabancı Dil

İngilizce