

**PİM İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TABAKALI KOMPOZİT PLAKALARDA
EKSENEL YÜK ALTINDA GERİLME ve YER DEĞİŞTİRME ANALİZİ**

Sinan YÜCEDAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2007
ANKARA**

Sinan YÜCEDAĞ tarafından hazırlanan PİM İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TABAKALI KOMPOZİT PLAKALARDA EKSENEL YÜK ALTINDA GERİLME ve YER DEĞİŞTİRME ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bedri TUÇ

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Muammer NALBANT

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Bedri TUÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Selim TÜRKBAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 24/10/2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Sinan YÜCEDAĞ

**PİM İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TABAKALI KOMPOZİT PLAKALARDA
EKSENEL YÜK ALTINDA GERİLME ve YER DEĞİŞTİRME ANALİZİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Sinan YÜCEDAĞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2007**

ÖZET

Bu araŐtırmanın amacı, üzerinde farklı sayıda pim deliği (1 delik, 2 delik, 4 delik) bulunan, farklı geometrilere sahip karbon elyaf - epoksi malzemeden oluşan ortotropik kompozit plakalarda, sabit çekici yükü altında oluşan deformasyon ve delik etrafında oluşan gerilme ile uzama miktarlarını incelemektir. Kuvvet uygulanan plakalar, $[0_2/45/0_2/-45/90_2]_s$ dizilimine, 2,5 mm kalınlığa ve hacimce yaklaşık % 65 fiber yüzdesine sahiptirler. Bütün plakalara sabit 11 kN çekici yükü uygulanmıŐtır.

Üç farklı Şekil için parametreler belirlenmiştir. Bunlardan ilki, üzerinde tek pim deliği bulunan kompozit plakadır. Bu bölümde incelenen farklı geometri sayısı 12 olup, 2 farklı delik mesafe parametresinden (Plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı E/D: 3,4,5; parçanın eninin deliğin çapına oranı W/D: 2,3,4,5) oluşur.

İkinci Şekil, üzerinde iki pim deliği bulunan kompozit plakadır. Bu bölümde incelenen farklı geometri sayısı 36 olup, 3 farklı delik mesafe parametresinden (Plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı E/D: 3,4,5; plakanın üst kısmı ile deliğin merkezi arasındaki uzaklığın, deliğin

apına oranı $K/D: 2,3,4$; iki delik arasının, delik çapına oranı $M/D: 2,3,4,5$) oluşur.

Üçüncü Şekil, üzerinde dört pim deliği bulunan kompozit plakaya aittir. Bu bölümde incelenen farklı geometri sayısı 27 olup, 3 farklı delik mesafe parametresinden (Kenar mesafesinin delik/pim çapına oranı $E/D:2,3,4$; boylamasına delik mesafesinin delik/pim çapına oranı $F/D:2,4,6$; enlemesine delik mesafesinin delik/pim çapına oranı $G/D:2,4,6$) oluşur.

ANSYS 10.0 sonlu elemanlar programı kullanılarak, ortotropik kompozit malzemeye uygulanan 3 farklı geometri serisi için elde edilen pim deliği etrafındaki maksimum gerilme değeri, pim deliği etrafındaki maksimum uzama değeri ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerleri, aynı Şartlar altında izotropik alüminyum malzemeye uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 914.1.073
Anahtar Kelimeler: Karbon lifler, kompozit malzemeler, gerilme analizi,
yer değiştirme analizi, sonlu elemanlar
Sayfa Adedi : 107
Tez Yneticisi : Prof.Dr. Bedri TU

**STRESS and DISPLACEMENT ANALYSIS OF PINNED-JOINT in
LAMINATED COMPOSITE PLATES UNDER AXIAL LOAD**

(M.Sc. Thesis)

Sinan YÜCEDAĞ

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

October 2007

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the linear stress and displacement analysis of orthotropic laminated composite plates, made of carbon fiber- epoxy resin, with having various number of pin holes (with one hole, with two holes, with four holes) under constant tensile load. Composite plates which have the stacking sequence of $[0_2/45/0_2/-45/90_2]_s$ and approx. 65 % fiber volume fraction has 2,5 mm thickness. All plates were subjected to 11 kN tensile load.

Three different figures with different numbers of pin holes were determined. First one was with one pin hole. The quantity of the different geometries investigated for this figure were 12 which consists of 2 different hole parameters (The ratio of “edge distance” to “hole / pin diameter” $E/D:2,3,4$; the ratio of “width of the plate” to “hole / pin diameter” $W/D:2,3,4,5$).

The second figure was with two pin holes. The quantity of the different geometries investigated for this figure were 36 which consists of 3 different hole distance parameters (The ratio of “edge distance” to “hole / pin diameter” $E/D:3,4,5$; the ratio of “the distance between

upper part of plate” to “hole / pin diameter” $K/D:2,3,4$; the ratio of “ the distance between two holes ” to “ hole / pin diameter ” $M/D:2,3,4,5$).

The last figure chosen was with four pin holes. The quantity of the different geometries investigated for this figure were 27 which consists of 3 different hole distance parameters (The ratio of “edge distance” to “hole / pin diameter” $E/D:2,3,4$; the ratio of “longitudinal hole distance” to “hole / pin diameter” $F/D:2,4,6$; the ratio of “transverse hole distance” to “hole / pin diameter” $G/D:2,4,6$).

Maximum stress around pin hole, maximum displacement around pin hole and maximum displacement along length of the material were calculated for orthotropic laminated composite plates for 3 different geometry series and the results were compared with aluminium isotropic material which was applied the same conditions as composite plates by using ANSYS 10.0 finite element analysis program.

Science Code : 914.1.073
Key Words : Carbon fibers, composite materials, stress analysis, displacement analysis, finite element
Page Number : 107
Adviser : Prof.Dr. Bedri TUÇ

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok değerli Prof.Dr. Mahmut ÖZBAY ve Prof. Dr. Bedri TUÇ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan, beni sürekli motive eden babam Ahmet YÜCEDAĞ, annem Malikiye YÜCEDAĞ ve sevgili eőim Dilek YÜCEDAĞ'A sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	8
2.1. Tanım	8
2.2. Kompozit Teknolojisinin Gelişimi	9
2.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	9
2.3.1. Yüksek mukavemet.....	10
2.3.2. Kolay şekillendirme	10
2.3.3. Elektriksel özellikler	10
2.3.4. Isıya ve ateşe dayanıklılık	10
2.3.5 Titreşim sönümlendirme	10
2.3.6. Korozyona ve kimyasal etkilere karşı mukavemet.....	11
2.3.7. Kalıcı renklendirme.....	11
2.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....	11
2.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	12

	Sayfa
2.5.1. Ev aletleri	12
2.5.2. Elektrik ve elektronik sanayi	13
2.5.3. Havacılık sanayi	13
2.5.4. Otomotiv sanayi.....	13
2.5.5. İş makineleri	14
2.5.6. Tarım sektörü	14
2.5.7. İnşaat sektörü.....	15
2.5.8. Taşımacılık sektörü	15
2.5.9. Şehircilik.....	15
2.5.10. Mobilya sanayi.....	15
2.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	16
2.6.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre.....	16
2.6.2. Yapı bileşenlerinin şekline göre.....	19
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ.....	23
3.1. Kompozit Malzemelerin Gerilme Analizi	23
3.1.1. Ortotropik malzemelerde gerilme-gerinim bağıntıları.....	23
3.1.2. Keyfi düzenlenmiş bir tabakanın gerilme-şekil değiştirme	27
4. MODELLEME	33
4.1. Nümerik Modelleme.....	33
4.1.1. Problemin tanımlanması.....	33
4.1.2. Ansys'de modelleme	35
5. ANALİZ SONUÇLARI	52
5.1. Üzerinde Tek Delik Bulunan Parçanın Analizi	52

	Sayfa
5.2. Üzerinde İki Delik Bulunan Parçanın Analizi.....	60
5.3. Üzerinde Dört Delik Bulunan Parçanın Analizi.....	68
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	77
EKLER	79
EK-1. Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi...	80
EK-2. Parça Geometrilerine Ait Çizimler	86
ÖZGEÇMİŞ.....	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ABD'nin 1991- 1994 yılları arasında "milyon kg" cinsinden kompozit malzeme ithalatı (Azom)	13
Çizelge 2.2. Hava taşıtları uygulamalarındaki kompozit bileşenler	14
Çizelge 4.1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 5.1. Üzerinde tek delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları.....	52
Çizelge 5.2. Üzerinde iki delik bulunan alüminyum parçanın analiz sonuçları.....	53
Çizelge 5.3. Üzerinde iki delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları.....	60
Çizelge 5.4. Üzerinde iki delik bulunan Al parçanın analiz sonuçları.....	62
Çizelge 5.5. Üzerinde dört delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları.....	68
Çizelge 5.6. Üzerinde dört delik bulunan Al parçanın analiz sonuçları.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit malzemenin temel şekli	8
Şekil 2.2. Değişik tipte fiber kompozitler.	21
Şekil 3.1. Eksen takımları.	27
Şekil 4.1. Üzerinde tek delik bulunan pim bağlantısı.....	33
Şekil 4.2. Üzerinde 2 delik bulunan pim bağlantısı.....	34
Şekil 4.3. Üzerinde 4 delik bulunan pim bağlantısı.....	35
Şekil 4.4. Ansys ana menüsü.....	36
Şekil 4.5. Çalışılacak yapının seçilmesi.	36
Şekil 4.6. Eleman tipinin seçilmesi.....	37
Şekil 4.7. Kompozit tabakaya ait oryantasyon açısı ve tabaka kalınlıklarının girilmesi.....	38
Şekil 4.8. Parçayı oluşturan kompozit malzemenin tabaka dizilimi.	39
Şekil 4.9. Malzeme modelinin seçildiği ekran.....	39
Şekil 4.10. Malzemeye ait özelliklerin girildiği ekran.	40
Şekil 4.11. Dikdörtgen alanın oluşturulması.....	41
Şekil 4.12. Pime ait delik çapının oluşturulması.....	42
Şekil 4.13. Kompozit plakanın kalınlığının girilmesi.	43
Şekil 4.14. Kompozit plakanın 3 boyutlu hali.....	43
Şekil 4.15. Malzeme özelliklerinin kontrol edilmesi.	44
Şekil 4.16. Parçanın elemanlara bölünmesi.....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.17. Eksenel yük uygulanacak alanın 15 elemana bölünmesi.	46
Şekil 4.18. Parçanın mesh edilmiş hali.	46
Şekil 4.19. Delik yuvasına pim tarafından uygulanan sınır koşullarının gösterimi.....	47
Şekil 4.20. Uygulanacak olan kuvvet değerinin girildiği pencere.....	48
Şekil 4.21. Kuvvet uygulanan yüzeyin gösterimi.	48
Şekil 4.22. Çözümlemenin başlatıldığı pencere.	49
Şekil 4.23. Sonuçların gösterildiği pencere.	50
Şekil 4.24. X yönündeki şekil değiştirme sonuçları.	51
Şekil 4.25. Pim deliği etrafında x yönünde meydana gelen gerilme hali. ...	51
Şekil 5.1. E/D=3 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması.	55
Şekil 5.2. E/D=4 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması.	55
Şekil 5.3. E/D=5 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması.	57
Şekil 5.4. E/D=3 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması.	57
Şekil 5.5. E/D=4 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması.	57
Şekil 5.6. E/D=5 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması.	58
Şekil 5.7. E/D=3 serisi için pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin W/D geometrilerine göre karşılaştırılması.	59

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. $E/D=4$ serisi için pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin W/D geometrilerine göre karşılaştırılması	59
Şekil 5.9. $E/D=5$ serisi için pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin W/D geometrilerine göre karşılaştırılması	60
Şekil 5.10. $E/D=3$, $K/D=2$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	63
Şekil 5.11. $E/D=3$, $K/D=3$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	64
Şekil 5.12. $E/D=3$, $K/D=4$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	64
Şekil 5.13. $E/D=4$, $K/D=2$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	65
Şekil 5.14. $E/D=4$, $K/D=3$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	65
Şekil 5.15. $E/D=4$, $K/D=4$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	66
Şekil 5.16. $E/D=5$, $K/D=2$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	66
Şekil 5.17. $E/D=5$, $K/D=3$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	67
Şekil 5.18. $E/D=5$, $K/D=4$ geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	67
Şekil 5.19. $E/D=2$, $F/D=2$ geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	70

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. E/D=2, F/D=4 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	71
Şekil 5.21. E/D=2, F/D=6 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	71
Şekil 5.22. E/D=3, F/D=2 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	72
Şekil 5.23. E/D=3, F/D=4 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	72
Şekil 5.24. E/D=3, F/D=6 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	73
Şekil 5.25. E/D=4, F/D=2 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	73
Şekil 5.26. E/D=4, F/D=4 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	74
Şekil 5.27. E/D=4, F/D=6 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.	74
Şekil 1.1. E/D=3, W/D=2 geometrisi için parça boyunda uzama hali.	80
Şekil 1.2. E/D=3, W/D=2 geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali.	80
Şekil 1.3. E/D=5, W/D=5 geometrisi için parça boyunda uzama hali.	81
Şekil 1.4. E/D=5, W/D=5 geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali.	81
Şekil 1.5. E/D=3, K/D=2, M/D=2 geometrisi için parça boyunda uzama hali.	82

Şekil	Sayfa
Şekil 1.6. $E/D=3$, $K/D=2$, $M/D=2$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali	82
Şekil 1.7. $E/D=4$, $K/D=4$, $M/D=5$ geometrisi için parça boyunda uzama hali	83
Şekil 1.8. $E/D=4$, $K/D=4$, $M/D=5$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali	83
Şekil 1.9. $E/D=2$, $F/D=2$, $G/D=2$ geometrisi için parça boyunda uzama hali	84
Şekil 1.10. $E/D=2$, $F/D=2$, $G/D=2$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali	84
Şekil 1.11. $E/D=4$, $F/D=6$, $G/D=6$ geometrisi için parça boyunda uzama hali	85
Şekil 1.12. $E/D=4$, $F/D=6$, $G/D=6$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali	85
Şekil 2.1. $E/D=3$, $W/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.....	86
Şekil 2.2 $E/D=4$, $W/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.....	87
Şekil 2.3. $E/D=5$, $W/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.....	88
Şekil 2.4. $E/D=3$, $K/D=2$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	89
Şekil 2.5. $E/D=3$, $K/D=3$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	90
Şekil 2.6. $E/D=3$, $K/D=4$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	91
Şekil 2.7. $E/D=4$, $K/D=2$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	92
Şekil 2.8. $E/D=4$, $K/D=3$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	93
Şekil 2.9. $E/D=4$, $K/D=4$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	94
Şekil 2.10. $E/D=5$, $K/D=2$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	95
Şekil 2.11. $E/D=5$, $K/D=3$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	96
Şekil 2.12. $E/D=5$, $K/D=4$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler.	97

Şekil	Sayfa
Şekil 2.13. $E/D=2$, $F/D=2$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	98
Şekil 2.14. $E/D=2$, $F/D=4$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	99
Şekil 2.15. $E/D=2$, $F/D=6$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	100
Şekil 2.16. $E/D=3$, $F/D=2$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	101
Şekil 2.17. $E/D=3$, $F/D=4$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	102
Şekil 2.18. $E/D=3$, $F/D=6$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	103
Şekil 2.19. $E/D=4$, $F/D=2$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	104
Şekil 2.20. $E/D=4$, $F/D=4$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	105
Şekil 2.21. $E/D=4$, $F/D=6$, $G/D=2$, 4, 6 geometrilerine ait çizimler.	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
σ	Normal Gerilme
ϵ	Normal Şekil Değişirme
τ	Kayma Gerilmesi
ν	Poisson Oranı
C_{kj}	Elastiklik Katsayıları
[C]	Katılık Matrisi
[S]	Uygunluk Matrisi
[Q_{ij}]	İndirgenmiş Elastisite Matrisi
[T]	Dönüşüm Matrisi
[R]	Router Matrisi

1. GİRİŞ

Havacılık, uzay, savunma ve otomotiv gibi endüstrilerdeki hızlı teknolojik gelişim ve artan rekabet, yüksek performansa sahip ürünlerin tasarlanmasına bu durum da, hafif ve mukavemeti yüksek malzemelere ihtiyacı gerekli kılmıştır. Bu ihtiyaca cevap vermek üzere, 1960'lı yılların ortalarından itibaren kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve günümüzde kullanım alanları giderek yaygınlaşmıştır.

Özellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılmak üzere, ağırlık açısından metallere göre çok daha hafif, mukavemet açısından ise yüksek olan kompozit malzemeler tasarlanmakta ve üretilmektedir. Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet (kopma dayanımı/yoğunluk) ve yüksek özgül rijitlik (elastisite modülü/yoğunluk) değerlerine sahip olmaları yanında, düşük ısı genleşme katsayısına ve iyi derecede titreşim sönümlenme karakterine sahip olmaları bakımından da metallere göre önemli avantaj sağlamaktadırlar. Genel bir karşılaştırma yapmak gerekirse; APC-1.0 karbon/epoksi, AISI 4340 çeliğine göre 5 kat daha fazla özgül mukavemete sahiptir.

Kompozit malzemeler üzerine birçok araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların bazıları kompozit malzemelerin bağlantı noktalarındaki hasarları inceleyen bazıları da delik çevresinde oluşan gerilmeleri inceleyen araştırmalardır. Bu çalışmada, farklı sayıda pim ile birleştirilmiş tabakalı ortotropik kompozit plakaların aksenal yük altında gerilme ve yer değiştirme analizleri yapılarak elde edilen değerler Al izotropik bir malzeme ile karşılaştırılmıştır.

Pim bağlantılı kompozit yapıların sonlu elemanlar modelinin hazırlanması ve analizi kapsamlı bir çalışma gerektirmektedir. Bu konu ile ilgili yayınlanmış bilimsel çalışmaların yanı sıra konu üzerinde devam eden çalışmalar da mevcuttur.

Camanho ve arkadaşı, geometrik parametrelerin, bağlantı parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin fiber takviyeli plastiklerin üzerinde mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların dayanımına etkilerini incelemişlerdir [1].

Chen ve arkadaşı, 3 boyutlu ortogonal kompozitlerde, pim yüklü dayanımlar üzerindeki takviye tipinin, örgü yapısının ve geometrik parametrelerin etkisini incelemişlerdir [2].

Camanho ve arkadaşı, Hashin hasar kriterini kullanılarak, karbon fiber takviyeli plastiklerde mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların 3 boyutlu modelinin oluşturulmasını ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla ilgili bir çalışma yayımlamışlardır [3].

Aktaş ve arkadaşı, Tsai-Hill ve fiber çeki-bası hasar kriterlerini kullanarak, keyfi oryantasyona sahip mekanik olarak tutturulmuş karbon fiber takviyeli epoksi kompozit plakalardaki hasar analizini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır [4].

Dano ve arkadaşları, bağlantı yeri hasarı oluşana kadar yuva gerilmesi-pim yer değiştirmesi eğrisinin tahmini için pim yüklemeli kompozit tabakaların aşamalı olarak hasar analizlerini incelemişlerdir. Çalışmanın amacı; hasar kriterlerinin etkisini, non-lineer kayma davranışının mukavemet tahminleri üzerindeki etkisini ve yük-pim yer değiştirme eğrisinin etkisini belirlemektir. Yapılan deneylerden şu sonuçlara varılmıştır. Fiber hasarı için maksimum gerilme kriterini kullanmak, kayma gerilmesi -şekil değiştirme ilişkisi lineer vaziyetteyken, Hashin kriterinden daha da yüksek ve gerçekçi mukavemet bulunmasına neden olmuştur. Nonlineer kayma gerilmesi-uzama miktarı ilişkisini göz önüne alırsak farklı hasar analizlerinin tahminleri aynı noktada birleşme eğilimi göstermişlerdir. Yarı-isotropik $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ tabakaları için karışık hasar kriteri kullanılırken non-lineer kayma hareketinin dahiliyeti küçük bir fark meydana getirirken; $[(0/90)_6]_s$ ve

$[(\pm 45)_6]_s$ tabakaları için ise mukavemet tahmininde büyük bir artışa sebep olmuştur. Geliştirilmiş modelin kullanılmasıyla tahmin edilen hasar mukavemetleri deneysel verilerin %1 - %15' ini kapsamıştır [5].

İçten ve arkadaşı, pim ile yüklenmiş kompozit malzemenin, yük altında nasıl bir hasar dayanımı göstereceğini ve hangi hasar şekillerine maruz kalacağını incelemiştir. Burada hasar yükleri ve hasar şekilleri hem nümerik hem de standart numunelerle deneysel olarak incelenmiştir. Hasar analizlerinde Hoffman ve Hashin hasar kriterleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada fiber yapı örgü biçimde standart olarak üretilmekte olup, bu örgü halindeki karbon epoksi içerisine rasgele yerleştirilerek incelemeler yapılmıştır. Bu araştırmada; W/D oranı 2, 3, 4, 5, E/D oranı 1, 2, 3, 4, 5 ve θ açısı ise 0° , 15° , 30° , 45° değerlerini almaktadır ve bu doğrultuda deneyler ve nümerik işlemler yapılmıştır. Bu araştırmadan şu sonuçlara varılmıştır. Yatak dayanımı direkt olarak geometrik parametrelere bağlıdır. Yani, E/D ve W/D oranları arttıkça yatak dayanımı en üst değerine ulaşmaktadır. E/D oranı 4 ve 5 olduğu zaman, yatak dayanımı hemen hemen aynı değeri almakta ve hasar olabileceğinin en iyisi olmaktadır, fakat E/D oranı 1 olduğu zaman, yatak dayanımı en düşük değerini almıştır. W/D oranı 2 olduğu zaman genelde çeki hasarı, W/D oranı arttığı zaman ise hasar, kayma veya yatak hasarı halini almıştır. Ayrıca yatak dayanımı 0° katman yönlü malzemedeki en üst değeri alırken 45° katman yönlü malzemedeki en alt değeri almıştır. Yani diğer bir deyişle, katman yön açısı arttıkça yatak dayanımında düşüş görülmüştür [6].

Okutan, geometrik parametrelerin tek pim bağlantılı ve çok yönlü cam fiber ile güçlendirilmiş epoksiden elde edilmiş numunenin hasar dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada $[0/90/0]$, $[90/0/90]$ katman yönlü ve tek pim bağlantılı kompozit malzemeler kullanılmıştır. İlk önce ASTM standartlarına uygun numune ile malzemenin mekanik özellikleri ve dayanımları bulunmuştur. Daha sonra ise nümerik ve deneysel olarak

inceleme yapıp karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler ve nümerik çalışmalardan sonra şu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Tek delikli numunelerde net çeki dayanımı katman yönlerine bağlıdır. Tek delikli bağlantının kayma performansına bakıldığı zaman, kayma dayanımının katman yönlerine ve E mesafesine bağlı olduğu görülmüştür. [90/0/90] için deneysel sonuçlara bakıldığı zaman, W/D oranının 2 ve 3 olduğu durumlarda kritik E/D oranının 4, W/D oranının 4 olduğu durumlarda ise kritik E/D oranının 2 olduğu görülmüştür [7].

Okutan ve arkadaşı, pim bağlantılı kompozit malzemenin dayanımını inceledikleri bir araştırmada, kompozit malzeme bileşenleri olarak E – camı ve epoksi kullanmışlardır. Ayrıca iki farklı katman yönünde ([0,±45], [90,±45]) 20 farklı geometri kullanılmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda; [0,±45] katman yönlerine sahip numunenin yatak dayanımının [90,±45] katman yönlerine sahip numuneden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. W/D oranın azaldıkça pim yataklarındaki dayanımında azaldığı görülmüştür. Aynı sonuç E/D oranı için de geçerli olmuştur. [90,±45] için maksimum dayanım, E/D oranının 3 veya 3' ten büyük ve W/D oranının da 4 veya 4'ten büyük olduğu durumlarda görülmüştür. [0,±45] için maksimum dayanım ise, E/D ve W/D oranlarının 3 olduğu durumdur. Bu araştırmada, tek delikli numunenin net gerilim dayanımının katman yönlerine ve numunenin genişliğine bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, W/D oranındaki değişikliğin doğurduğu etkiler [0,±45] katman yönlü numunede daha belirgin bir şekilde görülmüştür. Tek delikli bağlantının kayma dayanımının, E/D oranına bağlı olarak katman yönlerine bağlı olduğu görülmüştür. Buna bir örnek olarak, [0,±45] için E/D oranının artırılması ile maksimum kayma gerilimi %50 kadar azaltılabilmektedir, fakat [90,±45] için ise, E/D oranındaki değişiklikler dayanımda yaklaşık %66 kadar kayba yol açmıştır [8].

Akkuş, karbon epoksi levha yuvalarının statik ve dinamik yük altındaki

mukavemetini incelemiştir. Bu çalışmada $[0/45/-45/90]_s$ ve $[90/45/-45/0]_s$ ardışık yığınlı karbon epoksi laminatları üzerindeki statik ve dinamik mukavemet davranışlarını incelemek için pim-bağlantı deneyleri yapılmıştır. Test sırasında en iyi geometriyi elde etmek için kenar uzunluğunun pim çapına oranı E/D ve numune genişliğinin pim çapına oranı W/D sistematik olarak değiştirilmiştir. Sonuç olarak dayanıklılık açısından $[90/45/-45/0]_s$ sırası, $[0/45/-45/90]_s$ sırasına göre %12' ye kadar daha güçlü olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, en iyi geometri $E/D \geq 4$ ve $W/D \geq 4$ te elde edilmiş ve her iki dizilimde de en üst yuva mukavemetleri, bu geometrilerde elde edilmişlerdir. Tüm E/D ve W/D ve yığın dizilimleri karşılığında E/D ve W/D oranları artarken yorulma dayanımı, statik dayanımın %63' üne kadar azalma göstermiştir. $[0/45/-45/90]_s$ ve $[90/45/-45/0]_s$ yığınları için yorulma dayanma limiti, E/D ve W/D oranları artarken, azalma göstermiştir. Buna rağmen her iki sıralı yığında, aşağı yukarı aynı dayanıklılık sınırını vermiştir [9].

Taylak, iki paralel rijit pim tarafından değişken yayılı yüke maruz kalmış iki paralel delikli tabakalı glass-vinylester kompozit plaktaki, hasar modunu, hasar yükünü ve yatak mukavemetini incelemiştir. Bu çalışmada, pim yüklü tabakalı kompozit plakanın davranışı, deneysel ve nümerik olarak farklı ölçülerde gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar, üç farklı şekilde gerçekleştirilmiştir: Plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı (E/D); 1' den 5' e kadar, plakanın üst kısmı ile deliğin merkezi arasındaki uzaklığın, deliğin çapına oranı (K/D); 2' den 4' e kadar ve iki delik arasının, delik çapına oranı (M/D); 2' den 5' e kadar olacak şekilde. Hasar analizi, deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiştir ve fiber yönlendirme açısı $\theta=0$ sabit tutulmuştur. Lusas programı yardımıyla maksimum hasar yükü nonlineer olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, kompozit plağın yatak mukavemeti, geometrik parametrelerle artmıştır. Yani, E/D , M/D VE K/D oranları arttığında yatak dayanımı da yüksek değerlere ulaşmıştır. $E/D= 1$, $K/D= 2-3$ oranları sabit iken M/D , 4 ve 5 olduğunda yatak dayanımı yüksek

değerlere ulaşmıştır. Yapılan deneylerden de yatak dayanımının açıkça E/D oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir. E/D= 1 olduğunda yatak dayanımı az ve hasar modu genellikle yırtılma şeklinde sonuçlanmıştır. Ek olarak, E/D oranı 3, 4 ya da 5 olduğunda hasar yükü yüksek değerlere ulaşmış ve hasar modları, en iyi direnç yükü olan ezilme olmuştur. M/D oranının düşük değerlerinde hasar tipleri yırtılma ya da yırtılma ve ezilme birlikte olacak şekilde sonuçlanmıştır ki bu durum hasar tipinin en zayıf halidir [10].

Tekinşen, 4 rijid pim ile çeki yükü uygulanmış cam lifi-epoksi kompozit plakalarda, farklı geometrilerin etkisini ve plakalarda oluşan hasar davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmada, $[0/90/\pm 45]_S$ dizilimine sahip ve hacimce fiber yüzdesi yaklaşık %60 olan çoklu- pim yüklemeli kompozit plakaların davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. İncelenen farklı geometri sayısı 72 olup, 2 geometrik seri (Seri A ve Seri B) ve 3 farklı delik mesafe parametresinden (Kenar mesafesinin delik / pim çapına oranı E/D: 2, 3, 4; boylamasına delik mesafesinin delik/pim çapına oranı F/D: 2, 4, 6; enlemesine delik mesafesinin delik/pim çapına oranı G/D: 2, 4, 6, 8) oluşur. Çalışma esnasında, "Hasar Modu" ve "Hasar Yüğü" nü belirlemek üzere geometrik doğrusal olmayan analiz metodu ve "Hashin Hasar Kriteri" tercih edilmiştir. Sonuç olarak, bütün numunelerin 1 ve 2 mm yer değiştirme aralıklarında hasar yüküne ulaştıkları gözlenmiştir. Bununla birlikte, numunelerin yükü, yaklaşık sabit yük değerlerinde minimum 5 mm ye kadar taşıdıkları belirlenmiştir. Her nasılsa, büyük E/D oranlarının da yükü yaklaşık 9 mm' ye kadar taşıdıkları görülmüştür. A ve B serilerinde E/D' nin en düşük değerinde (E/D=2), hasar modları ezilme ve yırtılma ile sonuçlanmıştır. Aynı zamanda, F/D=2+G/D=8 değerlerinde ve E/D' nin bütün değerlerinde yırtılma ve ezilme hasar modu oluşmuştur. Kalan konfigürasyonların hepsinde ezilme durumu olduğu belirlenmiştir. A serisindeki numunelerde, en zayıf tabakalar G/D=2&F/D=6 ve E/D' nin düşük değerlerinin oluşturduğu (E/D=2-3) konfigürasyonlarda, en güçlü tabakaların ise E/D=4, F/D=4 ve

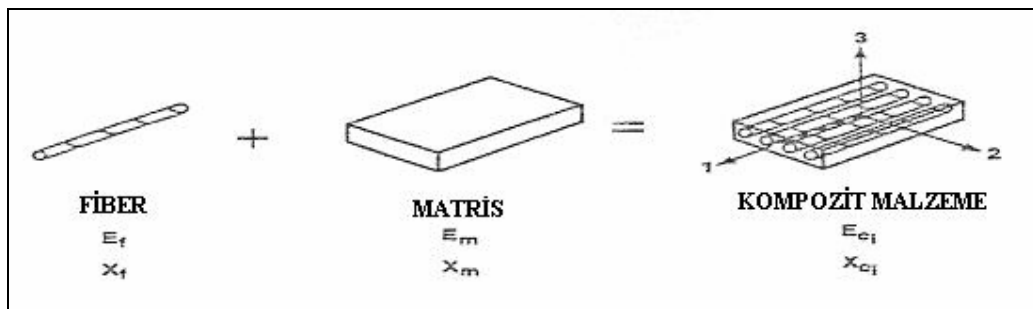
G/D=4 konfigürasyonlarının oluşturduğu tabakalarda gözlenmiştir. B serisinde ise G/D=8' in, E/D (2,3)' nin ve F/D(2,4)' nin düşük değerlerinde oluşturulan konfigürasyonlardaki tabakaların en zayıf, E/D=2, F/D=2 ve G/D=6 oranlarında oluşturulan konfigürasyonların ise en güçlü tabakalar olduğu tespit edilmiştir. A serisinde E/D=4 oranında, hem sayısal hem de deneysel olarak yapılan çalışmalarda maksimum hasar yükü G/D&F/D=4' de oluşmuştur. G/D azalıp F/D arttığında, hasar yükü de azalma eğilimi göstermiştir. E/D=2' nin B serisinde yapılan hem deneysel hem de sayısal çalışmalarında, hasar yükünün, G/D artıp F/D azaldığında, azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. E/D'nin en düşük değerinde (2), A serisi ile B serisinde oluşan hasar yükü değerleri tamamen birbirinden farklı oluşmuştur. Ters olarak, E/D=4, F/D=4, G/D=4 ve E/D=3, F/D=2, G/D=4 değerleri hariç, E/D' nin büyük sayısal değerlerinin hepsinde yaklaşık sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir [11].

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Tanım

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı özelliklerdeki iki ya da daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemelere *kompozit malzemeler* denir.

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunur (Şekil 2.1). Bu iki malzeme grubundan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da, fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü, lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylelikle fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olunur.



Şekil 2.1. Kompozit malzemenin temel şekli

2.2. Kompozit Teknolojisinin Gelişimi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Sonraları taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme kullanılmıştır. Otoyollar, asfalt ve çakıl taşı karışımı ile daha lineer, dayanımlı hale gelmiştir.

Teknoloji gelişimine paralel olarak elektrik enerjisi naklinde kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. İyi bir iletken olan bakır fiberler ile hafif metal olan alüminyum matris kullanılarak, enerji nakli daha verimli hale getirilmiştir.

2.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre önem kazanmaları, bunların değişik uygulamalarda belirgin özelliklere sahip olmasından ileri gelir. Bunlar; çekme, basma, eğilme, akma, sürünme, yorulma mukavemeti, sertlik, tokluk, rijitlik, aşınma direnci gibi mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik ve yalıtkanlık, manyetik özellikler, yoğunluk vb. fiziksel özelliklerle, kararlılık, korozyon direnci gibi kimyasal özelliklerdir. Malzeme seçimi ve tasarımından önem kazanan ve değişik tekniklerle ölçülebilen bu özelliklerin yanında, malzemenin birim maliyeti, kolay bulunabilirlik, işlenebilme ve şekillendirebilme gibi diğer faktörler de mühendis ve işletmecilerin her zaman göz önünde bulundurdukları faktörlerdir.

Uygulamada pek çok durumda elimizdeki malzemenin yukarıda ileri sürdüğümüz özelliklerin çoğuna sahip olması beklenir. Kompozit malzemelerin avantajlı özellikleri aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

2.3.1. Yüksek mukavemet

Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemetleri birçok metal malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve istenen bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedен tasarruf yapılarak daha hafif ve ucuz ürünler elde edilebilir.

2.3.2. Kolay şekillendirme

Büyük ve karmaşık parçalar, tek işleme bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

2.3.3. Elektriksel özellikler

Uygun malzemelerin seçilmesiyle, çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir.

2.3.4. Isıya ve ateşe dayanıklılık

Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özellikleri, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

2.3.5. Titreşim sönümlendirme

Kompozit malzemelerin, süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve darbe şoklarını yutabilme özellikleri vardır ve bu özellikleri metallere önemli ölçüde fazladır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

2.3.6. Korozyona ve kimyasal etkilere karşı mukavemet

Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilere zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler, kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörleri, tekne ve deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır.

2.3.7. Kalıcı renklendirme

Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

Teknolojinin gelişmesiyle beraber yeni uygulama alanlarında gittikçe daha karmaşık malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı uygulamalarda, malzemenin yüksek bir sertliği yanı sıra yüksek tokluk özelliğine de sahip olması ve darbe enerjilerini absorbe etmesi istenebilir. Klasik mühendislik malzemelerinde (metal ve metal alaşımları) bu özelliklerin birlikte kazanılması oldukça zordur. Yüksek sertlikteki malzemelerle, yumuşak, sünek malzemelerin kompozit şeklinde tasarımları bu tür uygulamalar için bir çözüm yolu olmaktadır.

2.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin mantığı gereği, bir tür malzemenin olumsuz özellikleri mevcutsa bu özellik mevcut kompozit malzemeye yansır. Örneğin; kompoziti oluşturan matris organik çözücülere karşı dayanıksız ise, onun oluşturduğu kompozite de bu olumsuzluk yansır. Dolayısıyla bu kompozit malzemelerin, organik çözücülerin bol miktarda bulunduğu ortamda kullanılmaması gerekir. Aynı mantık, sıcaklık, nem v.s gibi kimyasal etkiler açısından da yürütülebilir.

Kompozit malzemelerde Şu tür dezavantajlar görülmektedir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri, malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkiler,
- Kompozit malzemeler, değişik doğrultularda, değişik özellikler gösterirler,
- Çekme, basma, kesme operasyonları uygulanan aynı kompozit numunelerin liflerinde açılma meydana geldiğinden, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez,
- İyi tanımlanmamıŐ tasarımı parametreleri varsa, bundan dolayı ham malzeme açısından en yüksek imalat verimliliğine ulaŐılamaması bir dezavantajdır.

2.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya baŐlanmışır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme geliŐimleri son dönemde yeni birçok sektörde farklı amaç için kullanılmaktadır (izelge 2.1).

2.5.1. Ev aletleri

Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiŐ makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eŐyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu Şekilde, komple ve karmaşık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlanmaktadır.

Çizelge 2.1. ABD'nin 1991–1994 yılları arasında “milyon kg” cinsinden kompozit malzeme ithalatı(Azom)

Pazar	1991	1992	1993	1994
Uçak ve Uzay sanayi	17.6	14.7	11.5	11.0
Ticaret gereçleri	61.3	65.0	66.9	72.9
İnşaat	190.5	219.1	240.4	270.7
Tüketici Ürünleri	67.4	73.6	75.2	79.3
Korozyona Dayanıklı Ürünler	161.0	150.7	159.7	170.7
Elektrik	104.8	117.9	124.7	135.8
Deniz	124.7	138.1	144.8	164.9
Ulaşım	309.4	340.2	372.9	428.9
Diğer	33.5	37.8	40.5	46.2
Toplam	1070.2	1157.1	1236.6	1380.4

2.5.2. Elektrik ve elektronik sanayi

Kompozitler, elektronik, elektroteknik ve elektrik sanayinde de amaca uygun özellikleri ve taşıdığı üstün nitelikler nedeniyle (başta elektriksel izolasyon olmak üzere) her türlü elektrik ve elektronik malzemelerin yapımında, üretim malzemesi olarak kullanılırlar.

2.5.3. Havacılık sanayi

Havacılık sanayinde kompozitler, gün geçtikçe daha geniş bir uygulama alanına sahip olmaktadır. Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır. Çizelge 2.2' de hava taşıtlarında kullanılan kompozit malzeme parçaların kullanım yerleri verilmiştir.

2.5.4. Otomotiv sanayi

Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler, otomobil kaportası

parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir. Böylelikle üretici, seri üretim, düşük yatırım, kolay ve ucuz model değiştirme imkanlarına, kullanıcı da yüksek mekanik dayanım, ucuz ve kolay onarım imkanlarına sahip olur.

Çizelge 2.2. Hava taşıtları uygulamalarındaki kompozit bileşenler

Kompozit Bileşenler	
F-14	Kapılar, yatay kuyruklar, fairings, yatay kuyruk yüzeyleri
F-15	Fins, istikamet dümenleri, yatay, dikey kuyruklar, sürat frenleri, stabilizer skins
F-16	Yatay ve dikey kuyruklar, fin leading edge, skins on vertical fin box
B-1	Kapılar, yatay ve dikey kuyruklar, flaps, slats, inlets
AV-8B	Kapılar, istikamet dümenleri, yatay ve dikey kuyruklar, kanatçıklar, flaps, fin box, fairings
Boeing 737	Spoilers, yatay stabilizeler, kanatlar
Boeing 757	Kapılar, istikamet dümenleri, elevators, kanatçıklar, spoilers, flaps, fairings
Boeing 767	Kapılar, istikamet dümenleri, elevators, kanatçıklar, spoilers, fairings

2.5.5. İş makinaları

İş makinalarının koruma kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler başarıyla kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olabilmektedir.

2.5.6. Tarım sektörü

Kompozitler tarım sektöründe, sera, ilaçlama depoları, tahıl depolama siloları, drenaj suyu boruları ve sulama kanalları yapımında kullanılmaktadır. Burada üreticiye, seri üretim imkanları, kolay montaj, düşük yatırım imkanı, düşük kalıp maliyeti, kapasitenin tam kullanılabilmesi gibi avantajlar sağlar.

2.5.7. İnşaat sektörü

Bu sektörde kompozitler önemli kullanım alanına sahiptir. Cephe kaplamaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları, ondüle levhalar birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Üreticiye, tasarım esnekliği ve kolaylığı, ucuz izolasyon, hafiflik, montajda ve nakliyede kolaylık gibi imkanlar sağlar. Kullanıcıya da hafiflik bakım giderlerinin en aza inmesi, izolasyon problemine çözüm ve yüksek mekanik dayanımı gibi faydalar sağlar.

2.5.8. Taşımacılık sektörü

Taşımacılık sektöründe, frigorifik kamyon kasaları, nakliye tankerleri, kamyon kasaları gibi üretimler yapılmaktadır. Üreticiye kolay kalıplama imkânı, malzemelerden tasarruf ve düşük maliyet gibi avantajlar kullanıcıya da yüksek ısı yalıtımı ve kolay temizlenebilirlik gibi kolaylıklar sağlar.

2.5.9. Şehircilik

Bu alanda kompozitler toplu konut yapımında ve çevre güzelleştirme (heykel, çöp bidonu, elektrik direği, banklar) çalışmalarında kullanılmaktadır. Üreticiye çok sayıda standart ürünün kısa zamanda imal edilebilmesi, montajdan tasarruf, ucuz maliyet, hafiflik gibi imkânlar sağlar. Kullanıcıya, yüksek yalıtım kapasitesi ve yüksek mekanik dayanım imkânları sağlar. Bunun yanında, kompozitlerin bu alanda kullanılması, estetik, mahalli idarelere de ekonomik avantajlar sağlar.

2.5.10. Mobilya sanayi

Kompozitlerden, bu sahada da geniş bir şekilde faydalanılmaktadır. Masa sandalye, sehpa, koltuk, kütüphane, mutfak dolapları, çiçek

saksıları ve dekoratif eşyalar yapılmaktadır. Üreticiye, seri ve ucuz ürün eldesi, kolay model değiştirme, tasarımda kolaylık ve esneklik gibi faydalar sağlar. Kullanıcıya, yüksek mekanik dayanım, alışılmışın dışında farklı görünüm ve tasarım gibi yararlar sağlar.

2.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre (plastik kompozitler, metalik kompozitler, seramik kompozitler vb.) bir gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de (partikül esaslı kompozitler, lamel esaslı, fiber esaslı kompozitler, dolgulu “kafes” kompozitler, tabaka yapılı kompozitler şeklinde) sınıflandırılabilir

2.6.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre

Plastik – Plastik kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik, yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik, esneklik verici, darbe emici yada istenen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastik türleri de iki ayrı sınıfta incelenebilir.

Termoplastikler: Bu tür plastikler, ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında herhangi bir değişiklik söz konusu değildir. Genellikle 5-50 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bu gruba giren plastikler:

- a) Naylon
- b) Polietilen

- c) Karbonflorür
- d) Akrilikler
- e) Selülozikler
- f) Viniller

şeklinde sıralanabilir.

Termoset Plastikler: Bu tip plastiklerde ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu grubun belli başlı plastikleri ise:

- a) Polyesterler
- b) Epoksiler
- c) Alkitler
- d) Aminler

olarak verilebilir.

Plastik – Metal fiber kompozitler

Endüstride çok kullanılan bir tür olan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça mukavemetli ve hafif bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberleri (bakır, bronz, alüminyum, çelik vs.) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirmesi ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirilme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır.

Plastik – Cam elyaf kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya termoset, plastikten oluşan matris ve cam liflerin uygun kompozisyonlarından üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel

özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere tercih edilebilirler. Ancak cam elyafı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılğan olmasından dolayı çok küçük dirençlidirler.

Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek, arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de, daha önce belirtildiği gibi termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerin de düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, polyeesterlerdir.

Plastik – Köpük kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta, köpük ise matris konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük bir kısmı sentetik olarak imal edilmiş hafif maddelerdir. Köpük hücre yapısına göre sert, kırılğan, yumuşak ya da elastik olabilmektedir. Matris olarak kullanılan bu köpük türleri, kullanılan plastiğin de çeşitlenebilmesiyle değişik özellikte kompozit malzemelerin oluşumunu sağlayabilmektedir.

Metal matrisli kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılğan olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Bakır ve Alüminyum matrisli, Wolfram veya Molibden fiberli kompozitler ve Al - Cu kompoziti, bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği

gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşılmasını sağlamaktadır.

Bu kompozitlerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi, geliş güzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedir.

Seramik kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşimlerinden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler.

2.6.2. Yapı bileşenlerinin şekline göre

Partikül esaslı kompozitler

Rijitlik ve mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilerek üretilirler. Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri fiber ve pul kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rasgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyidir.

Lamel esaslı kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk/çap oranında dolgu

malzemesi ilave edilerek üretilirler. Matris içinde yer alan pulların yoğunluğu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilirler. Düzlemsel yapıya sahip pullarla sıkı paketleme ile elde edilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.

Fiber esaslı kompozitler

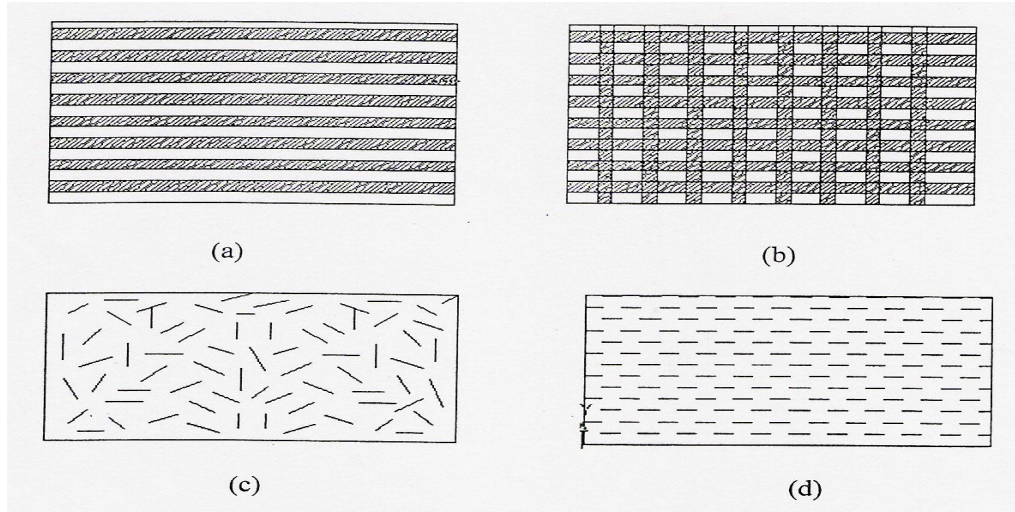
Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır.

Fiberler yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler (Şekil 2.2).

Fiber - matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlmesi matrisin mekanik özellikleri ve fiber - matris ara yüzey özellikleridir.

Fiberler dairesel olduğu gibi daha nadiren dikdörtgen, hegzagonal, poligonsal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet vb.) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlme göstermelerine karşılık,

sürekli fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.2. Değişik tipte fiber kompozitler; a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit, b) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler, c) Rastgele yönlendirilmiş sürekli fiber kompozit, d) Yönlendirilmiş sürekli fiber kompozit

Dolgu kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir.

Tabaka yapılı kompozitler

Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın birleşiminden oluşur. Çok değişik birleşimlerle tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin

veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

3.1. Kompozit Malzemelerin Gerilme Analizi

3.1.1. Ortotropik malzemelerde gerilme-gerinim bağıntıları

Kompozit yapıların mukavemetlerinin belirlenmesi ve gerilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir [12].

Genelleştirilmiş Hooke kanunu üç boyutlu bir cisim için şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Yukarıda matris şeklinde belirtilen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\sigma_k = C_{kj} \varepsilon_j \quad (k,j=1,2,\dots,6) \quad (3.2)$$

Burada C_{kj} elastiklik katsayılarıdır.

Eş. 3.1' de belirtilen ilişki anizotropik malzemeler için geçerlidir ve Hooke kanununun en genel halidir. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalarda tüm elyafların birbirine paralel olduğu kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu söylenebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksenle simetrik malzeme özelliği mevcuttur. Bu malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki ilişkide [C], katılık matrisini ifade etmektedir. Katılık matrisinin elemanları mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$C_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta}, \quad C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta}, \quad C_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta}$$

$$C_{23} = \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta}, \quad C_{13} = \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta}$$

$$C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta}, \quad C_{44} = G_{23}, \quad C_{55} = G_{31}, \quad C_{66} = G_{12} \quad (3.4)$$

Burada;

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}$$

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bir başka şekilde aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6. \quad (3.5)$$

[S] uygunluk matrisi olarak isimlendirilmektedir ve [C] katılık matrisinin tersidir. Ortotropik malzemeler için uygunluk matrisi [S] mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Böylelikle ortotropik malzemelerde şekil değiştirme-gerilim ilişkisi;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

şeklinde yazılır.

Burada,

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, S_{13} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} = -\frac{\nu_{31}}{E_3}, S_{23} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{32}}{E_3}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{33} = \frac{1}{E_3}, S_{44} = \frac{1}{G_{23}}, S_{55} = \frac{1}{G_{31}}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (3.8)$$

İnce cidarlı ortotropik kompozit levhalarda eğer düzlem dışında kuvvet uygulanmıyorsa, düzlemsel gerilme durumu söz konusudur. Bu durumda;

$$\begin{aligned} \sigma_3 = 0 \quad \tau_{23} = 0 \quad \tau_{31} = 0 \\ \sigma_1 \neq 0 \quad \sigma_2 \neq 0 \quad \tau_{12} \neq 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Ortotropik malzemede, düzlemsel gerilme durumu için uygunluk matrisi elemanları;

$$\begin{aligned} \varepsilon_{13} = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \quad \gamma_{23} = 0 \quad \gamma_{31} = 0 \\ S_{13} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} \quad S_{23} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \end{aligned} \quad (3.10)$$

şeklinde yazılır. Böylece ortotropik malzemelerde, düzlemsel gerilme hali için Hooke kanunu şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Burada,

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad , \quad S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_1} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \quad , \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad , \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (3.12)$$

şeklinindedir. Eş. 3.11' de belirtilen şekil değiştirme-gerilme bağıntısı, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı olarak yazıldığında,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

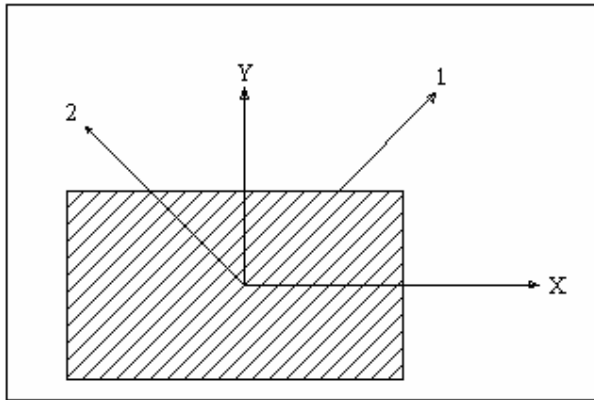
elde edilir. Eş. 3.13' deki Q_{ij} matrisi indirgenmiş elastisite matrisi olarak tanımlanır ve bu matrisin elemanları,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad , \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad , \quad Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad , \quad Q_{66} = G_{12} \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilir.

3.1.2. Keyfi düzenlenmiş bir tabakanın gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Laminatlar genellikle farklı açılı tabakalardan meydana gelir. Bunun sebebi farklı yönlerde de yüksek mekanik özellikler elde etmektir. Tabakalarda kullanılan koordinat sistemi 1-2 olarak isimlendirilir. 1 nolu yön takviye elemanının (elyaf) yönünü belirtir. 2 nolu yön ise takviye elemanına dik olan yönü gösterir (Şekil 3.1). x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi açılı laminalarda çakışmaz. Bu durumda x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır [12].



Şekil 3.1. Eksen takımları

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır. T matrisi dönüşüm matrisi olarak adlandırılır,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Benzer olarak şekil değiştirme ifadesi;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Burada [R] Router matrisidir ve bu matris işleme sokulduğunda şekil değişimi bileşenleri vektörü daha basit bir hale dönüştür. Bu durumda γ_{xy} büyüklüğünde $\frac{1}{2}$ çarpanı ortadan kalkar.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

1,2 ve x,y eksenlerinin birbiri ile çakışık olması durumunda, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

yazılır. 1,2 ve x,y eksenlerinin birbirleri ile çakışmama durumunda ise genel ifade aşağıdaki işlem basamakları ile bulunur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Bu işlemlerde $[R] [T] [R]^{-1}$ ifadesi T matrisinin transpozesidir.

$$[T]^T = [R] [T] [R]^{-1} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T]^T \quad (3.30)$$

θ açısı x eksenini ile 1 eksenini arasındaki açı olarak ele alınırsa xy koordinatlarına göre gerilme-şekil değiştirme ifadesi,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Burada \bar{Q}_{ij} ; indirgenmiş rijitlik matrisini göstermektedir. Eş. 3.30 çözümlerse,

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

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\
\bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\
\bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\
\bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
\end{aligned} \tag{3.32}$$

ifadeleri bulunur.

Şekil değiştirme-gerilme bağıntısının oluşturulabilmesi için benzer şekilde indirgenmiş uygunluk matrisinin (\bar{S}_{ij}) tanımlanması gerekir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^T [Q] [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

$$[T]^T = [R] [T]^{-1} [R]^{-1} \tag{3.36}$$

$$[\bar{S}] = [T]^T [S] [T] \tag{3.37}$$

Yukarıdaki denklemler çözüldüğünde,

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \tag{3.38}$$

$$\bar{S}_{12} = (S_{11} + S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (-2S_{12} + 2S_{22} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (-2S_{12} + 2S_{22} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

ifadeleri elde edilir.

Yukarıda, sayısal çözümlere yapılırken kullanılacak olan ortotropik malzemeler için gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları ile farklı oryantasyon açıklarına sahip bir tabakadaki gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları verilmiştir.

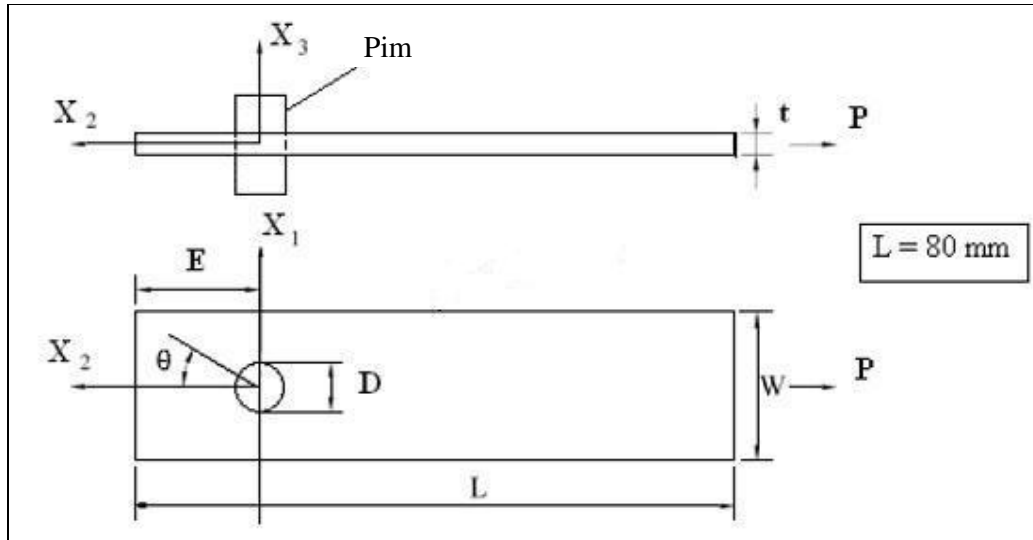
4. MODELLEME

4.1. Nümerik Modelleme

4.1.1. Problemin tanımlanması

Bu bölümde amaç, pim deliklerinde oluşacak gerilme ve yer değiştirmeleri lineer olarak hesaplamaktır. Bunun için üzerinde üç farklı pim bağlantısı bulunan tasarımlar ANSYS sonlu elemanlar programı ile modellendi ve çözümlendi.

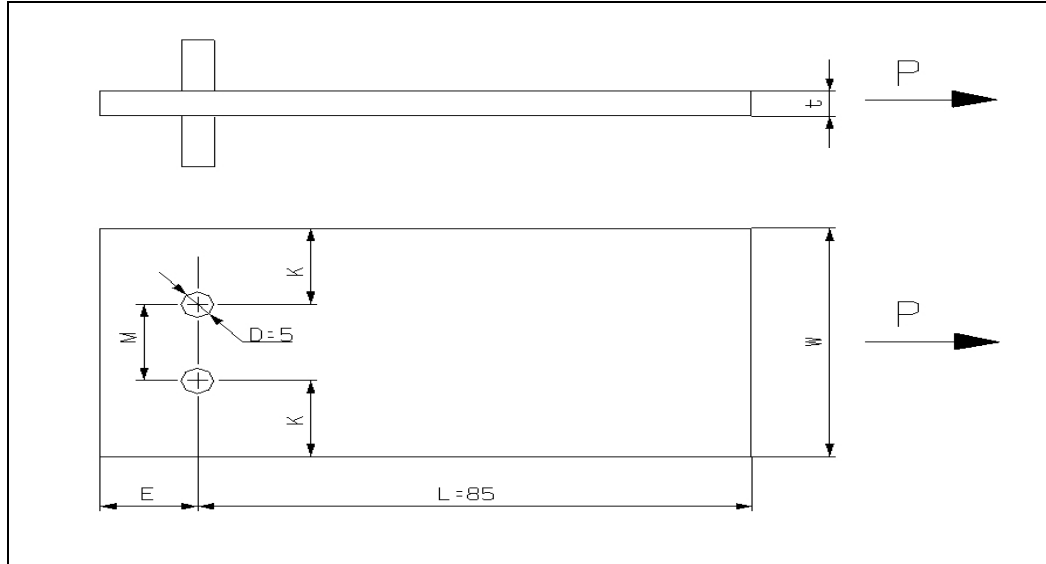
İlk modelde, genişliği (W), kalınlığı (t) olan (L) boyunda kompozit parçanın, çapı 5 mm olan pim ile bağlantısı incelenmiştir. Bu incelemede, plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı (E/D); 3, 4, 5' e kadar, parçanın eninin delik çapına oranı (W/D); 2, 3, 4, 5' e kadar değişen 12 adet geometri modellendi. Burada parçanın boyu, $L = 80$ mm alındı (Şekil 4.1) [7].



Şekil 4.1. Üzerinde tek delik bulunan pim bağlantısı

İkinci modelde, genişliği ($M+2K$), kalınlığı (t) olan ($85 \text{ mm}+E$) boyunda kompozit parçanın, çapı 5 mm olan pim ile bağlantısı incelenmiştir. Bu

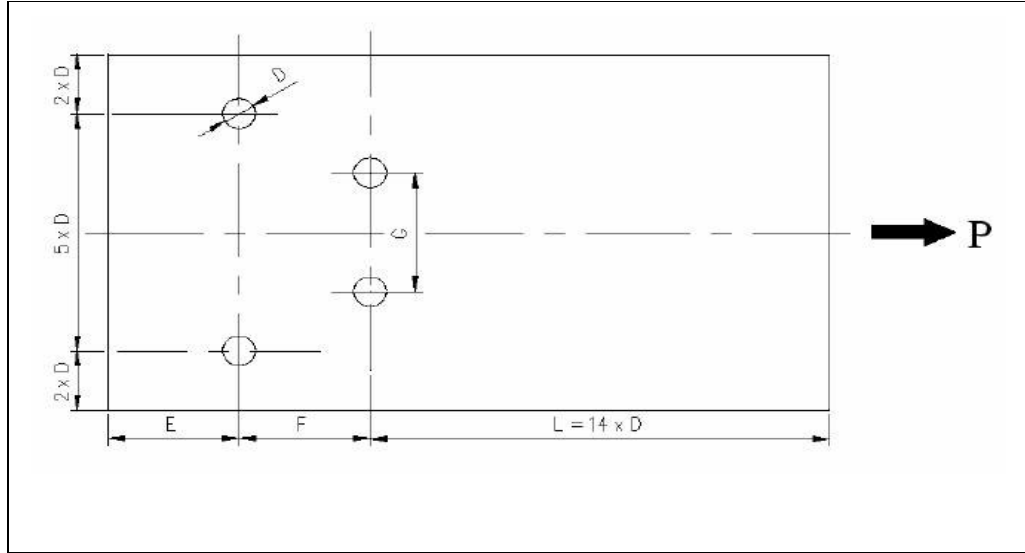
incelemede, plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı (E/D); 3, 4, 5' e kadar, plakanın üst kısmı ile deliğin merkezi arasındaki uzaklığın, deliğin çapına oranı (K/D); 2, 3, 4' e kadar ve iki delik arasındaki, delik çapına oranı (M/D); 2, 3, 4, 5' e kadar değişen 36 adet geometri modellendi (Şekil 4.2) [10].



Şekil 4.2 Üzerinde 2 delik bulunan pim bağlantısı

Üçüncü model, genişliği (45 mm), kalınlığı (t) olan (70+E+F) boyunda kompozit parçanın çapı 5 mm olan pim ile bağlantısı incelenmiştir. Bu incelemede, kenar mesafesinin delik çapına oranı E/D :2, 3, 4; boylamasına delik mesafesinin delik çapına oranı F/D :2, 4, 6; enlemesine delik mesafesinin delik çapına oranı G/D :2, 4, 6 olarak 27 adet geometri modellendi (Şekil 4.3) [11].

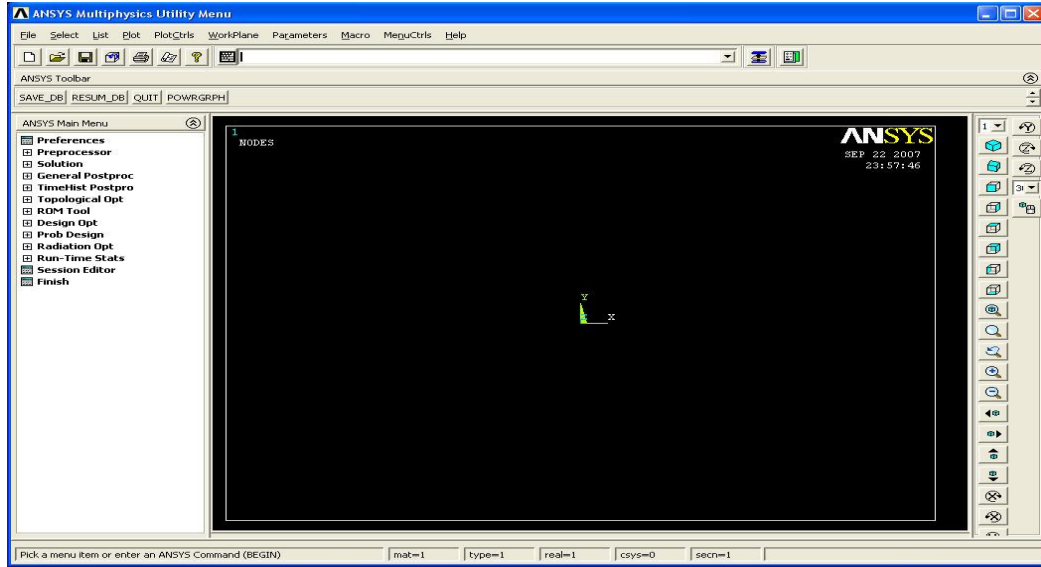
Parçaları kullanan TAI' den alınan bilgilerde malzemenin yaklaşık 11 000 N yüke maruz kaldığı belirtilmiştir.



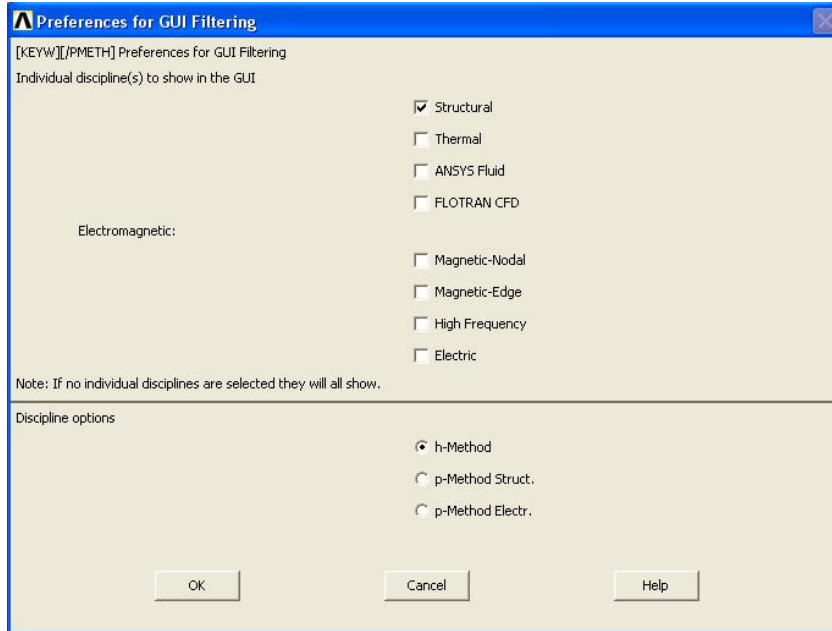
Şekil 4.3. Üzerinde 4 delik bulunan pim bağlantısı

4.1.2. ANSYS'de modelleme

ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de içindeki "Preprocessing" imkânları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Gene aynı Preprocessor içinde hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli yani mesh de oluşturulmaktadır. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilir. Şekil 4.4' de ANSYS ana menüsü verilmektedir.



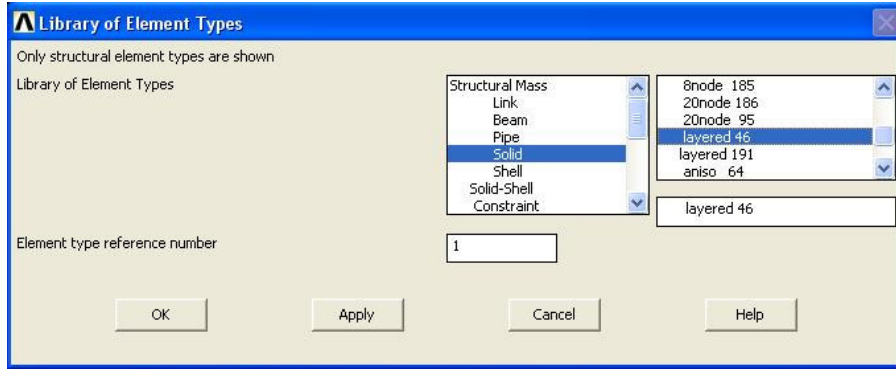
Şekil 4.4. ANSYS ana menüsü



Şekil 4.5. Çalışılacak yapının seçilmesi

Preferences < Structural

Komutu ile çalışacağımız yapı seçilir (Şekil 4.5).



Şekil 4.6. Eleman tipinin seçilmesi

Preprocessor < Element Type < Add/Edit/Delete < Add < Solid < Layered 46
< OK < close

Komutu ile çalışacağımız eleman tipi seçilir. Burada, kullanacağımız kompozit malzeme tabakalı yapıda olduğundan Solid 46 seçilmiştir. SOLID 46 elemanı, 8 düğüm noktasına sahip olup, tabakalı malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. 250' ye kadar tabaka bir eleman içinde modellenebilir. Elemanın her bir düğüm noktasının 3 serbestlik derecesi vardır. Bunlar; x, y ve z eksenlerindeki doğrusal harekettir. Her tabakadaki gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanabilir (Şekil 4.6).

Mat no., X-axis rotation, layer thk	MAT	THETA	TK
Layer number 1	1	0	0.00015625
Layer number 2	1	0	0.00015625
Layer number 3	1	45	0.00015625
Layer number 4	1	0	0.00015625
Layer number 5	1	0	0.00015625
Layer number 6	1	-45	0.00015625
Layer number 7	1	90	0.00015625
Layer number 8	1	90	0.00015625
Layer number 9	1	90	0.00015625
Layer number 10	1	90	0.00015625

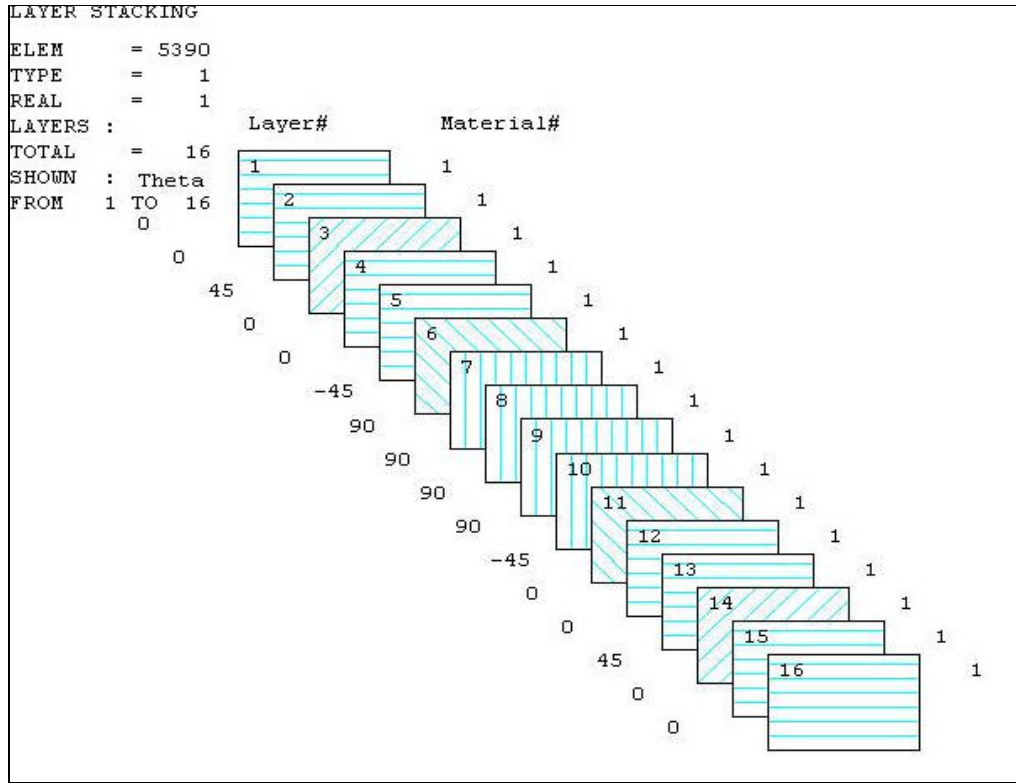
Press [OK] for next 6 layers

OK Cancel Help

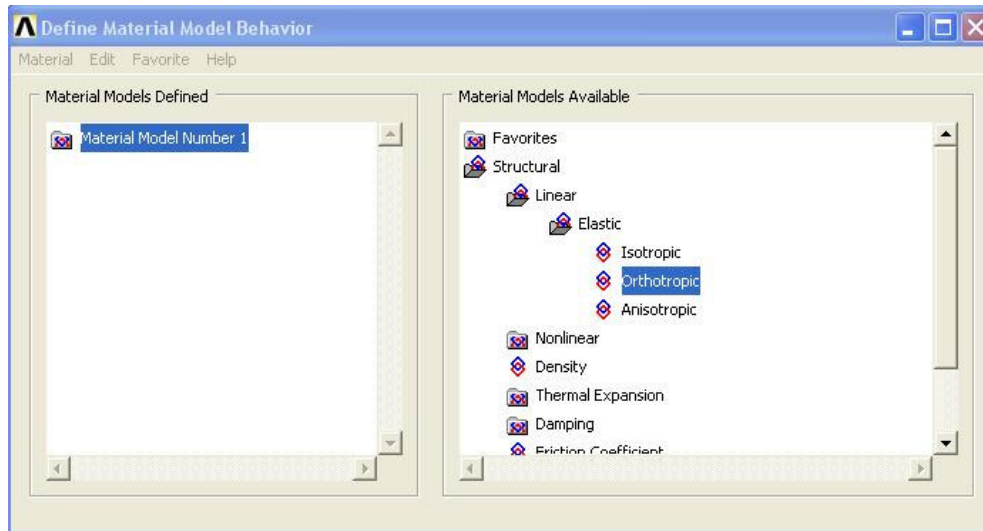
Şekil 4.7. Kompozit tabakaya ait oryantasyon açısı ve tabaka kalınlıklarının girilmesi

Preprocessor < Real Constant < Add/Edit/Delete < Add < Solid 46 < OK

Komutu ile Real Constant Set No:1 yaratılır, Ok basıldıktan sonra çıkan kutudaki Number of Max Layer bölümüne, malzeme 16 tabakadan oluştuğu için 16 yazılır, Ok basıldıktan sonra çıkan kutu doldurulur. MAT yazan bölüme tanımlanan malzeme numarası, THETA yazan bölüme sıra ile oryantasyon açıları, TK yazan bölüme ise, her bir tabakanın kalınlığı yazılır (Şekil 4.7). 16 tabakalı olan malzeme, $[0_2 \setminus 45 \setminus 0_2 \setminus -45 \setminus 90_2]_s$ dizilimine sahiptir. Şekil 4.8' de ise parçayı oluşturan kompozit malzemenin tabaka dizilimi verilmiştir.



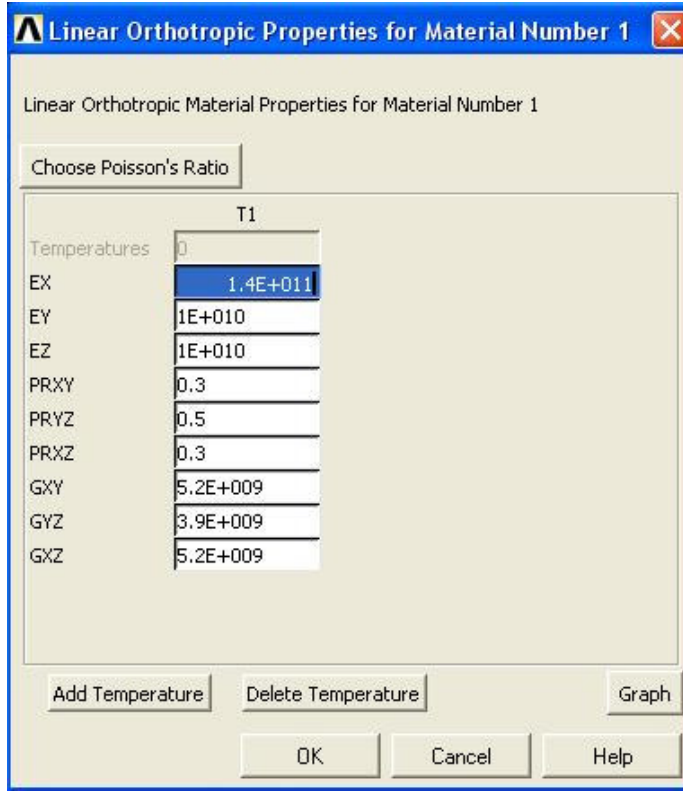
Şekil 4.8. Parçayı oluşturan kompozit malzemenin tabaka dizilimi



Şekil 4.9. Malzeme modelinin seçildiği ekran

Preprocessor < Material Props < Material Models < Structural < Linear < Elastic < Orthotropic

Komutu ile malzeme modeli seçilir (Şekil 4.9). Model seçildikten sonra gelen ekrana (Şekil 4.10) malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 4.1' e göre doldurulur.



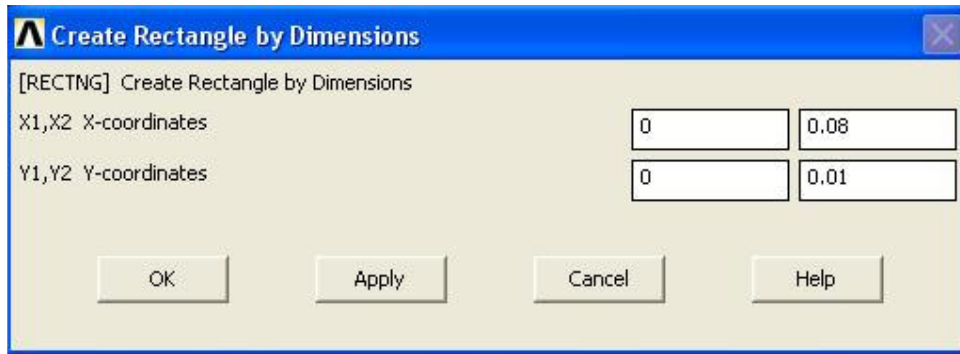
Şekil 4.10. Malzemeye ait özelliklerin girildiği ekran

Çizelge 4.1. Kompozit malzemenin mekanik özellikleri

E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
140 GPa	10 GPa	10 GPa	5.2 GPa	5.2 GPa	3.9 GPa	0.3	0.3	0.5

Bu çalışma için, karbon elyaf-epoksi reçine malzeme kullanıldı. Malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 4.1' de verilmiş olup, üretici ve kullanıcı firmalardan sağlanmıştır.

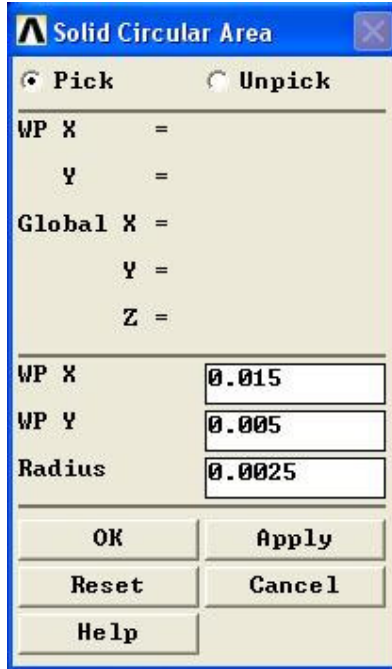
Buraya kadar malzemenin tanımlanması ve malzemeye ait mekanik özelliklerin programa tanıtılması anlatılmıştır. Bundan sonra ise malzemeye ait geometrinin modellenmesi anlatılacaktır. Bunun için üzerinde tek delikli pim bağlantısı bulunan, $E/D=3$, $W/D=2$ geometrisi seçilmiştir. Bu geometrinin boyu 80 mm, genişliği 10 mm ve kalınlığı 2.5 mm' dir. Delik çapı ise 5 mm' dir.



Şekil 4.11. Dikdörtgen alanın oluşturulması

Preprocessor < Modeling < Create < Areas < Rectangle < By Dimensions

Komutu ile açılan pencereye parçanın boyu (0.08 m) ve eni (0.01 m) girilerek kompozit plakaya ait dikdörtgen geometri oluşturulur (Şekil 4.11).



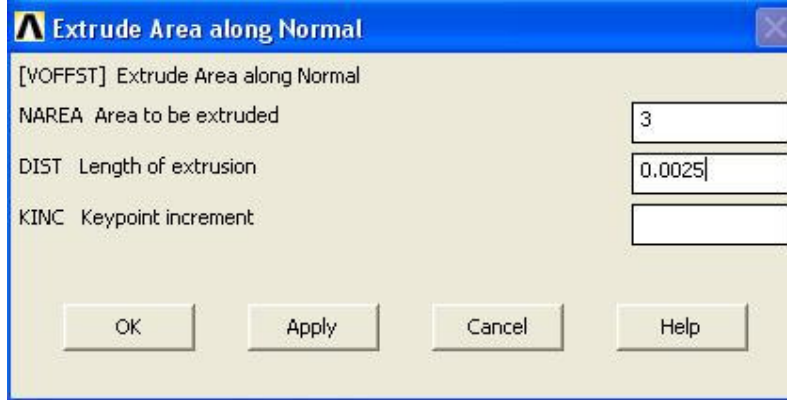
Şekil 4.12. Pime ait delik çapının oluşturulması

Preprocessor < Modeling < Create < Areas < Circle < Solid Circle

Komutu ile açılan pencereye delik geometrisinin koordinatları ve delik yarıçapı girilerek pim deliğinin geometrisi oluşturulur (Şekil 4.12).

Preprocessor < Modeling < Operate < Booleans < Subtract < Areas

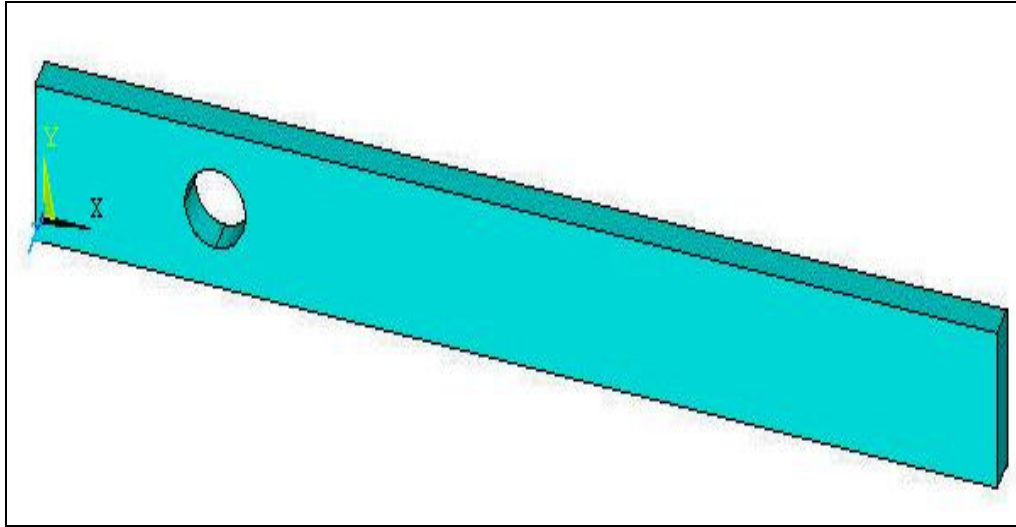
Komutu ile plakadan delik alanı çıkarılarak delikli 2 boyutlu plaka elde edilir.



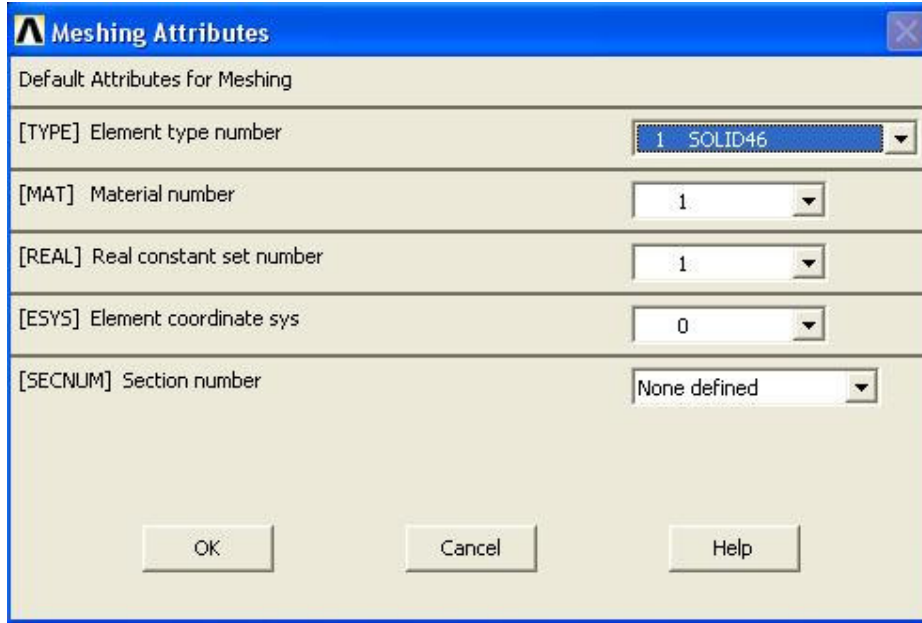
Şekil 4.13. Kompozit plakanın kalınlığının girilmesi

Preprocessor < Modeling < Operate < Extrude < Areas < Along Normal

Komutu ile açılan pencereye parçanın kalınlığı olan 0.0025 m (Şekil 4.13) girilerek parçaya 3. boyut kazandırılır (Şekil 4.14).



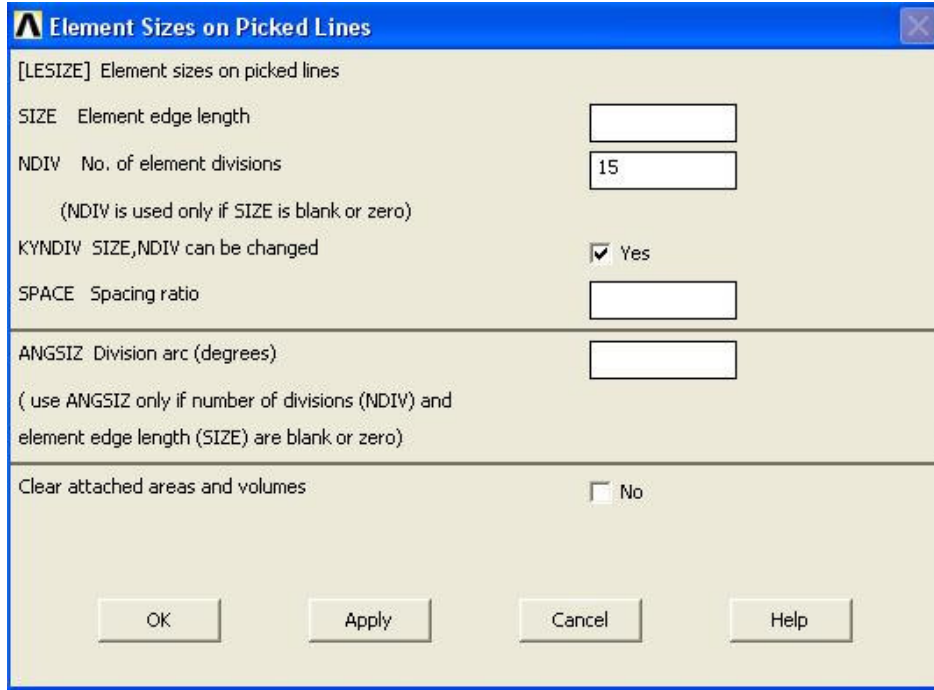
Şekil 4.14. Kompozit plakanın 3 boyutlu hali



Şekil 4.15. Malzeme özelliklerinin kontrol edilmesi

Preprocessor < Meshing < Mesh Attributes < Default Attribs

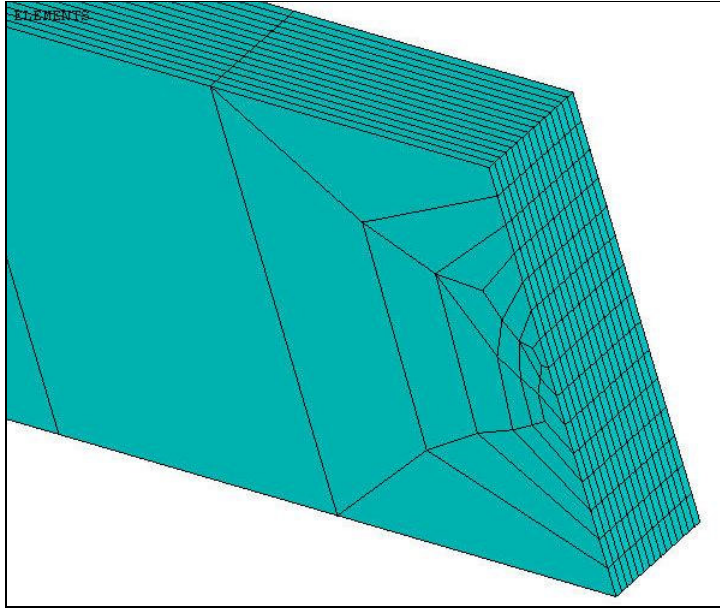
Komutu ile malzeme mesh edilmeden önce, malzemeye ait özelliklerin sistem tarafından kontrol edilmesi sağlanır (Şekil 4.15).



Şekil 4.16. Parçanın elemanlara bölünmesi

Preprocessor < Meshing < Size Cntrl's < ManualSize < Lines < Picked Lines

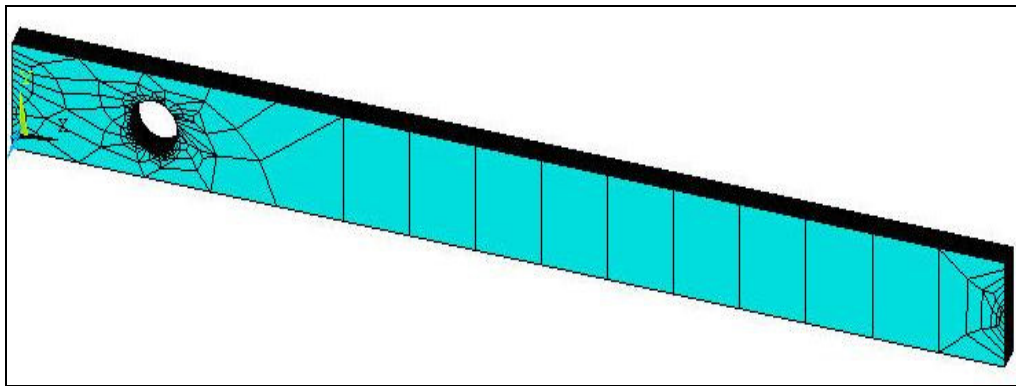
Komutu ile aksenel yönde kuvvet uygulanacak olan alandaki dikey çizgilerden bir tanesi seçilir. Daha sonra açılan pencerede "No. Of element divisions" kutusuna 15 yazılır (Şekil 4.16). Böylece, çizgi 15 elemana bölünmüş olur (Şekil 4.17).



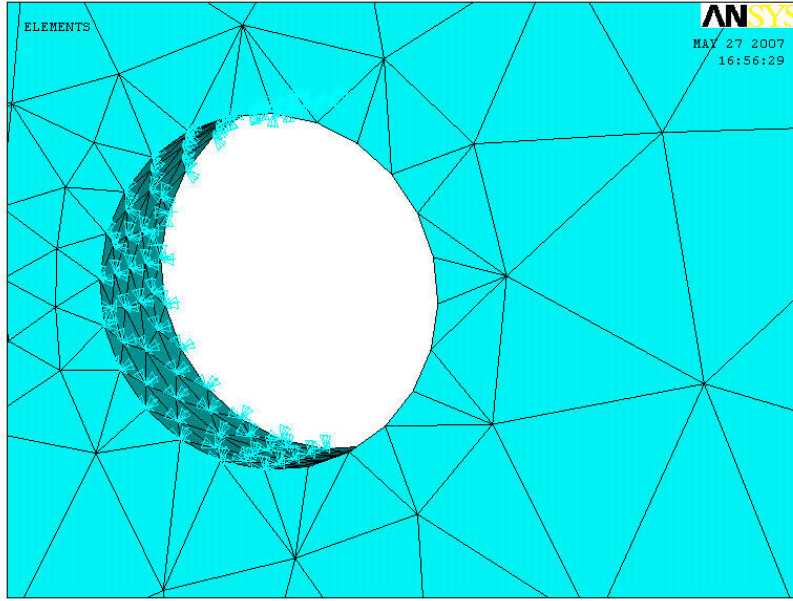
Şekil 4.17. Eksenel yük uygulanacak alanın 15 elemana bölünmesi

Preprocessor < Meshing < Mesh < Volume Sweep < Sweep < Picked All

Komutu ile bütün hacmin aynı sayıda elemana bölünmesi sağlanır. Bu da analiz yaparken her elemanın eksenel yükten aynı derecede etkilenmesini sağlar (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Parçanın mesh edilmiş hali



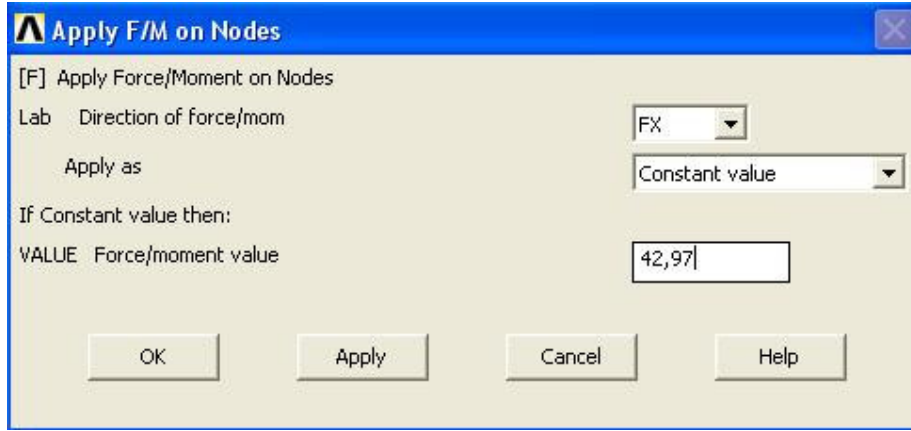
Şekil 4.19. Delik yuvasına pim tarafından uygulanan sınır koşullarının gösterimi

Solution < Define Loads < Apply < Structural < Displacement < On Areas

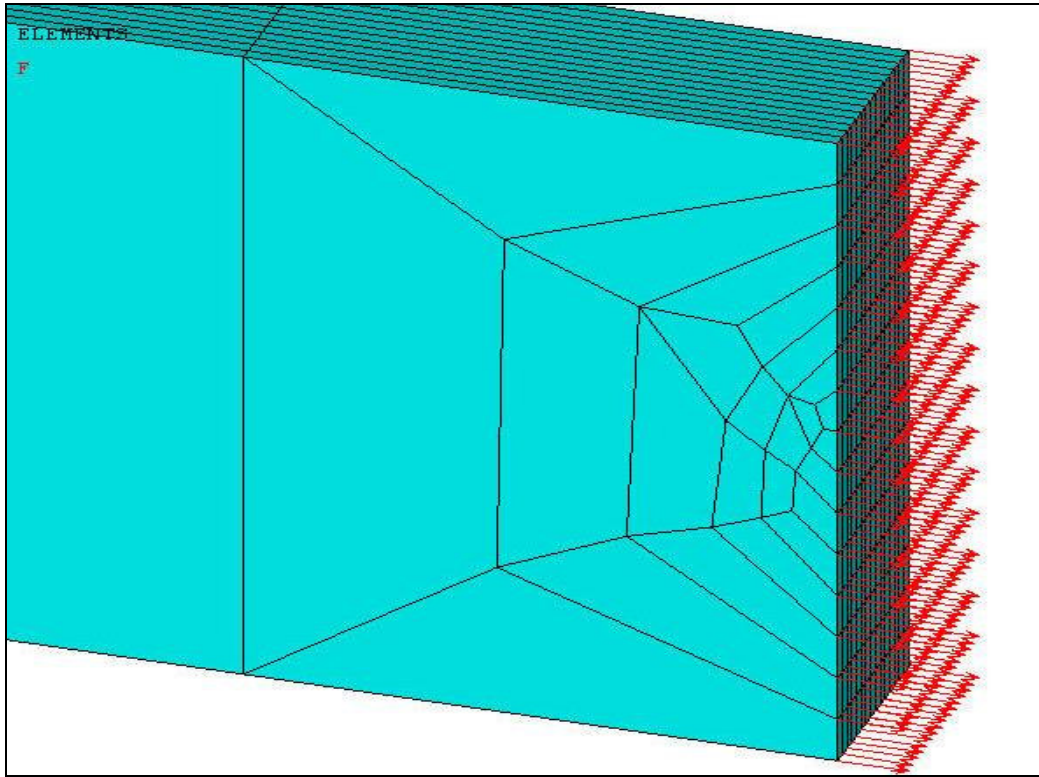
Komutu ile aksenal kuvvet uygulanan alanın ters yönünde kalan yüzey alanı seçilerek All DOF işaretlenir. Böylece bu yüzey her üç yönde (x, y, z) sabitlenmiş olur. Aynı işlem pim yuvası içindeki, kuvvet uygulanan yönün ters kalan yönüne her üç yönde sabit kalacak şekilde uygulanır (Şekil 4.19).

Solution < Define Loads < Apply < Structural < Force/Moment < On Nodes

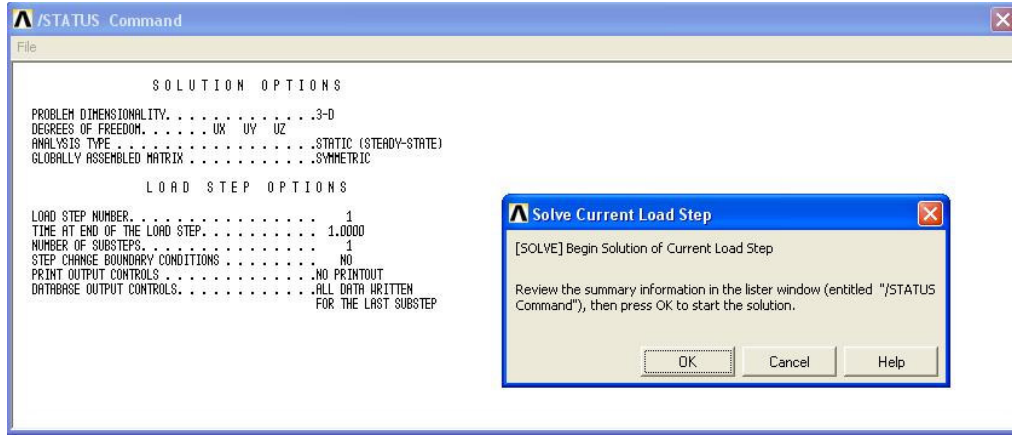
Komutu ile aksenal yük uygulanacak yüzeydeki bütün node'lar seçilerek, uygulanacak olan 11 kN, toplam node sayısına bölünür ve açılan kutuya bu değer yazılır (Şekil 4.20). Şekil 4.21' de kuvvet uygulanan yüzey gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Uygulanacak olan kuvvet değerinin girildiği pencere



Şekil 4.21. Kuvvet uygulanan yüzeyin gösterimi

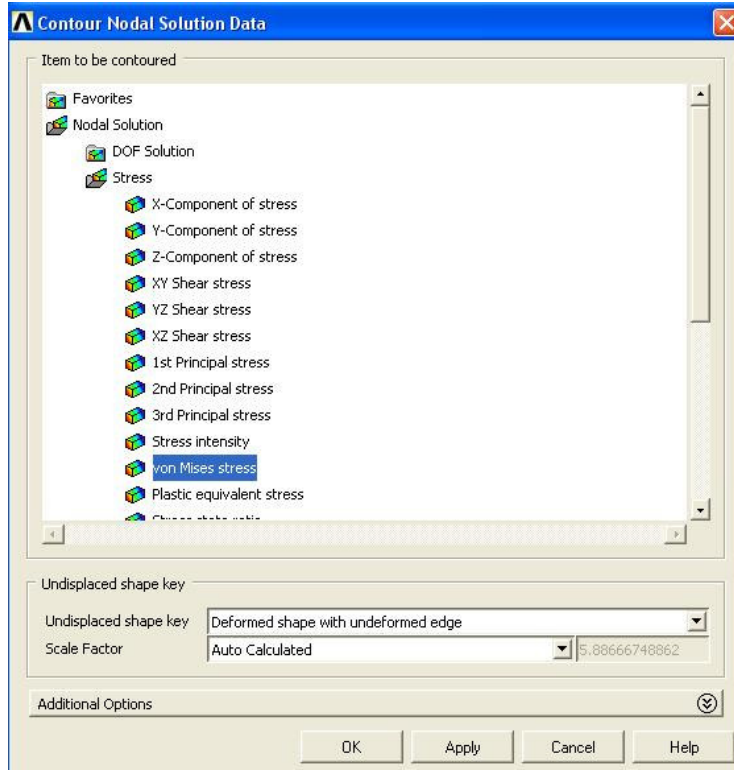


Şekil 4.22. Çözümlemenin başlatıldığı pencere

Solution < Solve < Current LS

Komutu ile sınır koşulları ve kuvvet girdileri belirlenen geometrinin çözümü başlatılmış olur (Şekil 4.22).

Şekil 4.23' te açılan pencereden görmek istediğimiz analiz sonuçları seçilir.



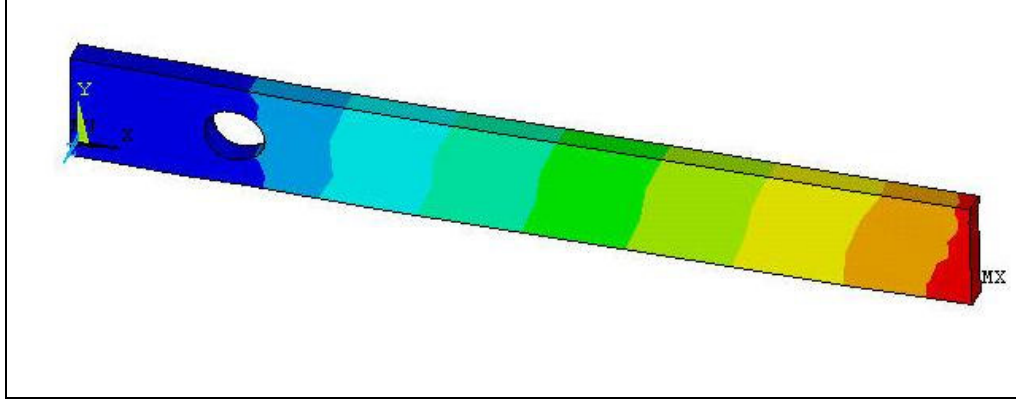
Şekil 4.23. Sonuçların gösterildiği pencere

General Postproc < Plot Results < Contour Plot < Nodal Solution < DOF Solution < X-Component of displacement

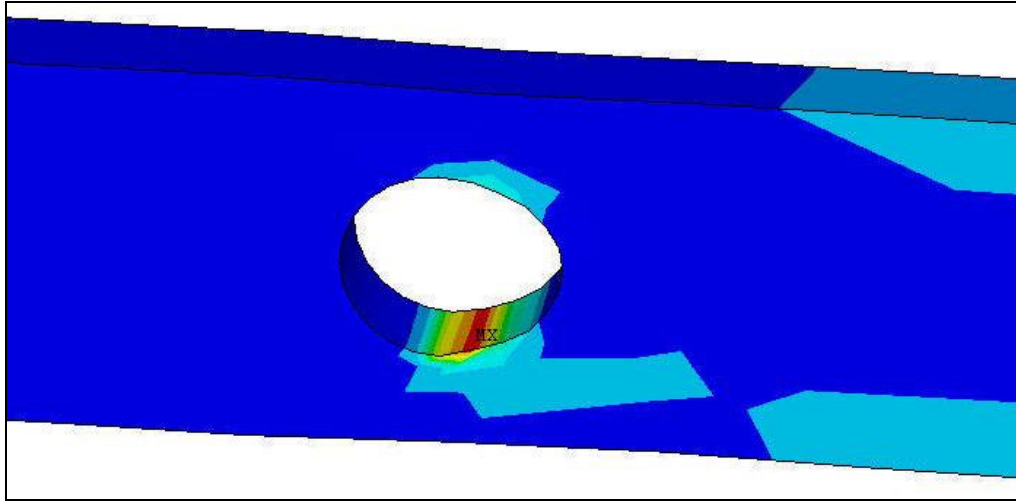
Komutu ile, X yönündeki şekil değiştirme sonuçları elde edilir (Şekil 4.24).

General Postproc < Plot Results < Contour Plot < Nodal Solution < Stress < X-Component of stress

Komutu ile X yönünde meydana gelen gerilme sonuçları elde edilir (Şekil 4.25).



Şekil 4.24. X yönündeki şekil değıştirme sonuçları



Şekil 4.25. Pim deliği etrafında x yönünde meydana gelen gerilme hali

5. ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde, 4. bölümde modellenmesi yapılan ve sınır koşulları belirlenen kompozit ortotropik parçaların, 11 000 N sabit yük altında maruz kaldıkları gerilmeler ve parçada oluşan şekil değiştirmeler incelenecektir. Yine aynı şekilde alüminyum izotropik malzemeden aynı geometrilere sahip parçalara da aynı kuvvet uygulanarak, elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılacaktır. Temel olarak üç modelimiz vardır. Bunlar; üzerinde tek delik bulunan, üzerinde iki delik bulunan ve üzerinde dört delik bulunan pim bağlantılarıdır. Bu parçalar da, plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı (E/D); parçanın eninin delik çapına oranı (W/D); plakanın üst kısmı ile deliğin merkezi arasındaki uzaklığın, deliğin çapına oranı (K/D); iki delik arasındaki, delik çapına oranı (M/D); boylamasına delik mesafesinin delik çapına oranı (F/D), enlemesine delik mesafesinin delik çapına oranı (G/D) olan parametrelere göre değişecek şekilde modellendi. Toplam 75 adet geometri modellendi. Aşağıda her bir parça için meydana gelen şekil değiştirme ve gerilme analizleri verilmiştir.

5.1. Üzerinde Tek Delik Bulunan Parçanın Analizi

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda, delik etrafındaki maksimum uzama (mm), parça boyundaki maksimum uzama (mm) ve pim deliğindeki maksimum gerilme değerleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Üzerinde tek delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları

E/D = 3	Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
W/D = 2	0,0880	0,526	59
W/D = 3	0,0616	0,369	50,6
W/D = 4	0,0610	0,345	43,3
W/D = 5	0,0558	0,276	29

Çizelge 5.1.(Devam) Üzerinde tek delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları

E/D = 4	Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
W/D = 2	0,0997	0,647	48
W/D = 3	0,0814	0,404	39,2
W/D = 4	0,0465	0,268	34,6
W/D = 5	0,0545	0,245	29
E/D = 5	Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
W/D = 2	0,0986	0,496	62
W/D = 3	0,0643	0,320	48,8
W/D = 4	0,0582	0,297	40
W/D = 5	0,0571	0,244	28

Çizelge 5.2' de ise kompozit parça ile aynı geometriye sahip alüminyum izotropik malzemeye 11 000 N eksenel kuvvet uygulanması durumunda delik etrafında meydana gelen maksimum uzama (mm), parça boyundaki maksimum uzama (mm) ve pim deliğindeki maksimum gerilme değerleri verilmiştir.

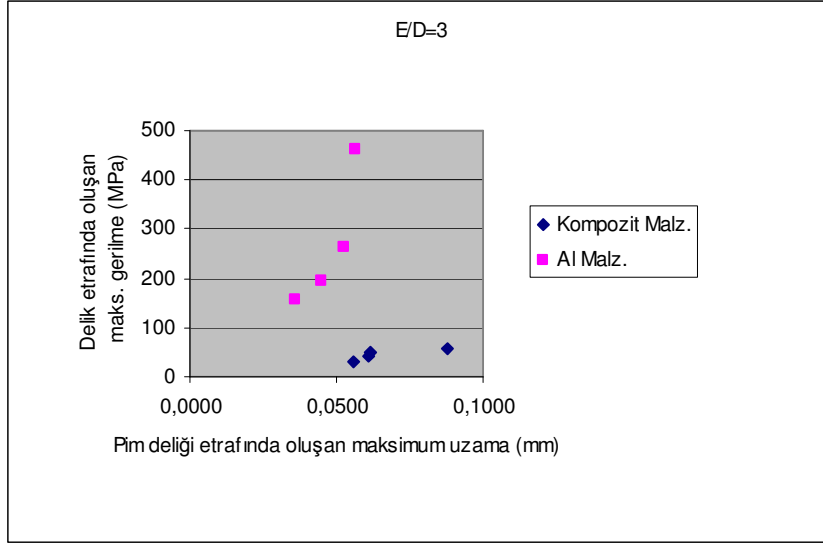
Çizelge 5.2. Üzerinde tek delik bulunan alüminyum parçanın analiz sonuçları

E/D = 3	Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
W/D = 2	0,0564	0,319	463
W/D = 3	0,0527	0,318	265
W/D = 4	0,0448	0,246	194
W/D = 5	0,0361	0,200	155

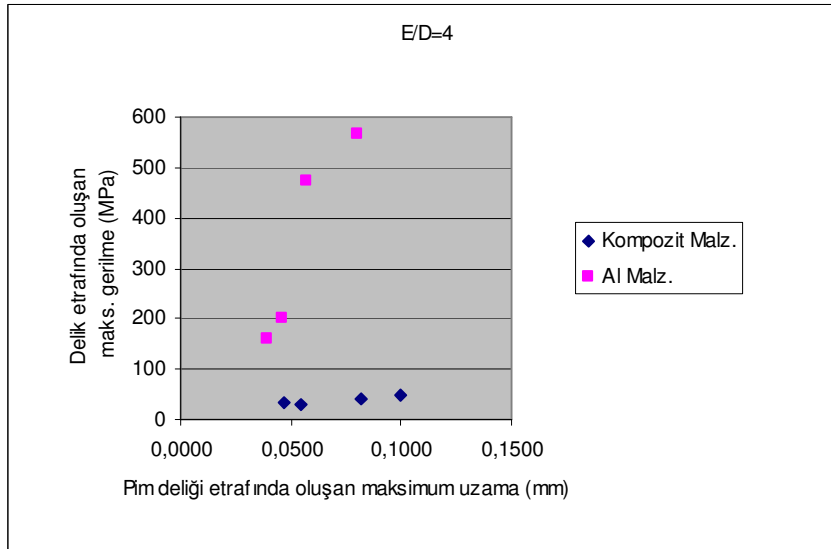
Çizelge 5.2.(Devam) Üzerinde tek delik bulunan alüminyum parçanın analiz sonuçları

E/D = 4	Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
W/D = 2	0,0801	0,439	565
W/D = 3	0,0572	0,299	474
W/D = 4	0,0461	0,231	201
W/D = 5	0,0393	0,190	161
E/D = 5	Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
W/D = 2	0,0809	0,409	620
W/D = 3	0,0580	0,280	444
W/D = 4	0,0472	0,216	206
W/D = 5	0,0418	0,203	115

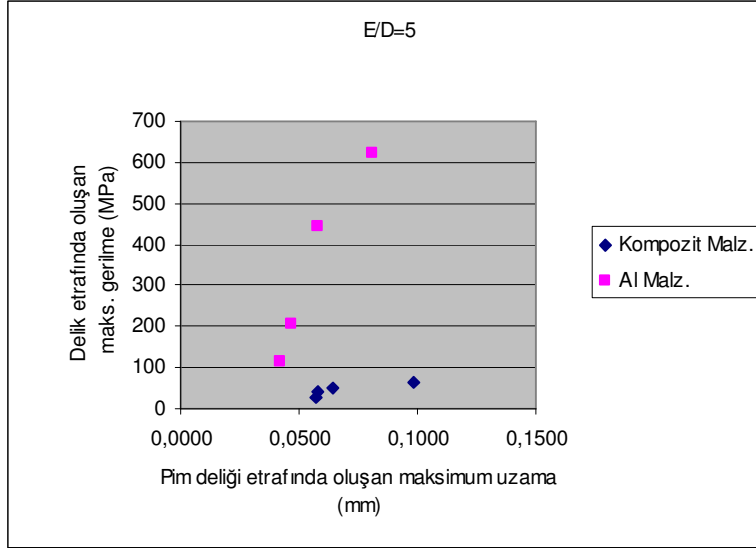
Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3' te pim deliği etrafında meydana gelen en büyük gerilme değerleri ile pim deliği etrafında oluşan maksimum uzama değerleri kompozit ve Al parçalar için, plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı (E/D) serileri esas alınarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. E/D=3 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması

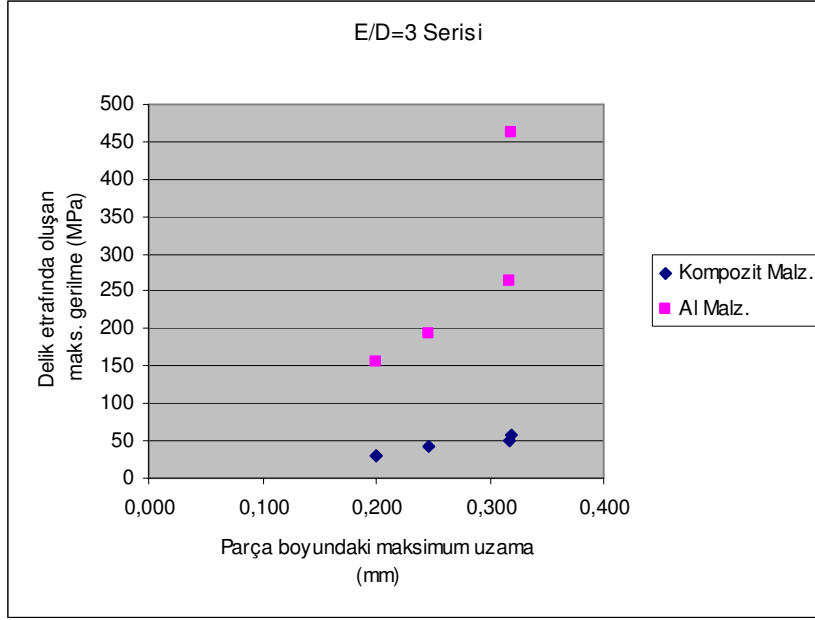


Şekil 5.2. E/D=4 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması

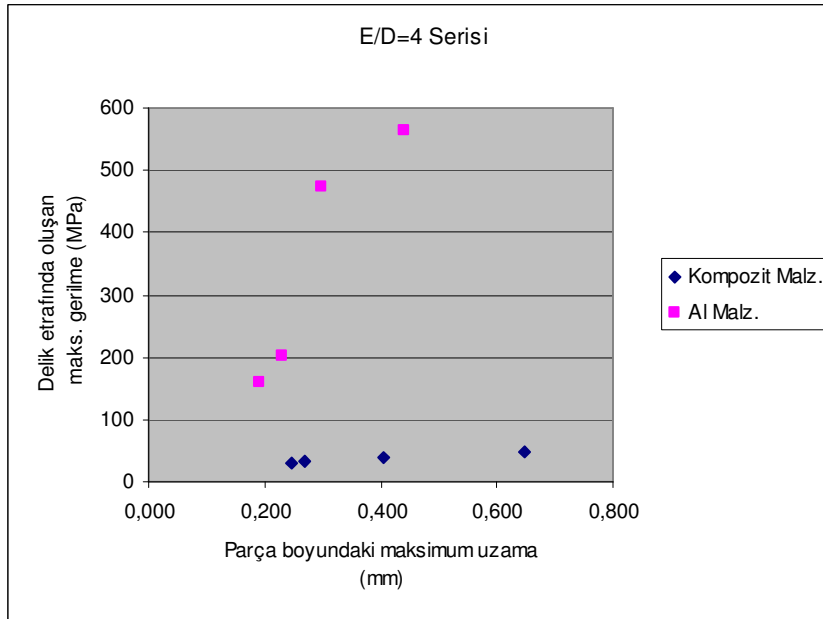


Şekil 5.3. E/D=5 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması

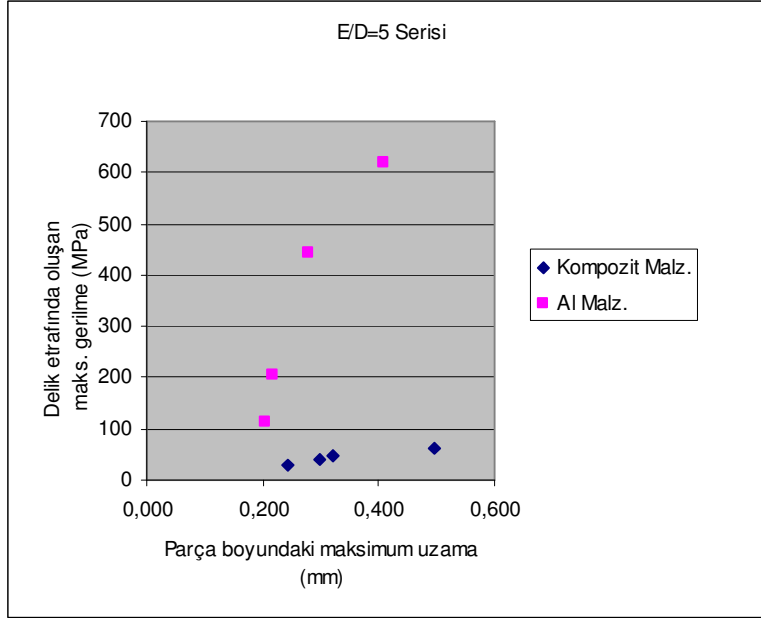
Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' da pim deliği etrafında meydana gelen en büyük gerilme değerleri ile parça boyunda oluşan maksimum uzama değerleri kompozit ve Al parçalar için, plakanın uç kısmının deliğin çapına oranı (E/D) serileri esas alınarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.4. E/D=3 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması

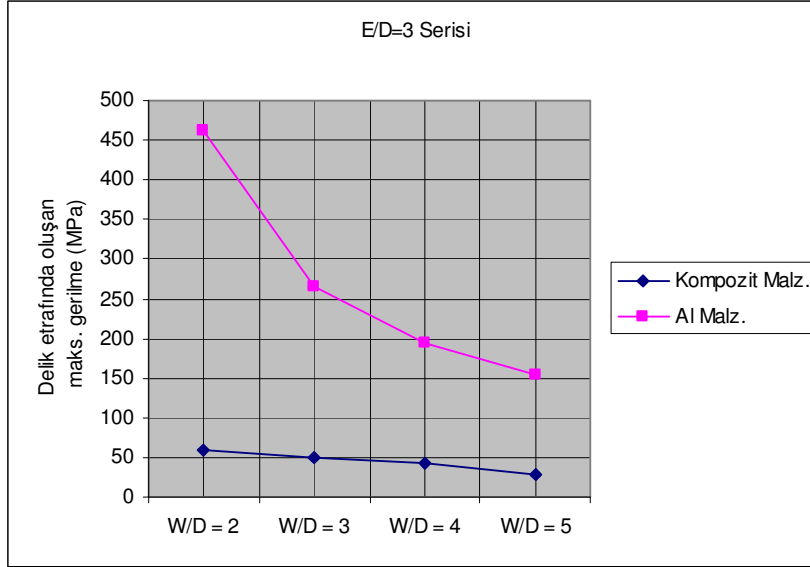


Şekil 5.5. E/D=4 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması

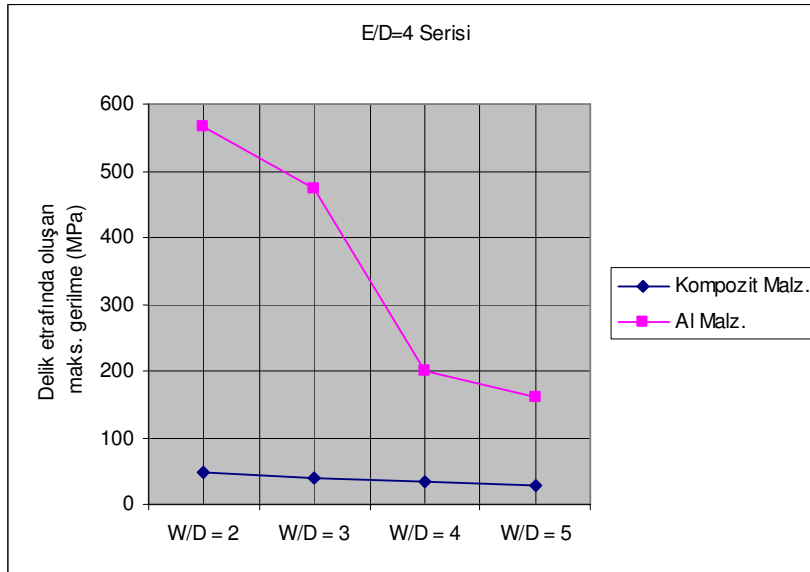


Şekil 5.6. E/D=5 durumunda kompozit malzeme ile alüminyum malzemede meydana gelen gerilmelerin ve parça boyunda meydana gelen maksimum uzama değerlerinin karşılaştırılması

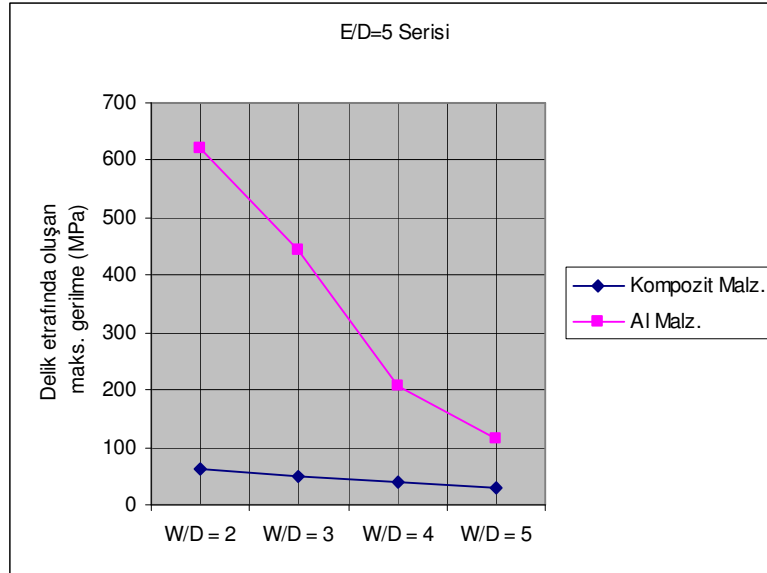
Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' da kompozit ve Al parçalar için pim deliği etrafında meydana gelen en büyük gerilme değerlerinin E/D serileri esas alınarak W/D geometrilerine göre karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 5.7. E/D=3 serisi için pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin W/D geometrilerine göre karşılaştırılması



Şekil 5.8. E/D=4 serisi için pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin W/D geometrilerine göre karşılaştırılması



Şekil 5.9. E/D=5 serisi için pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin W/D geometrilerine göre karşılaştırılması

5.2. Üzerinde İki Delik Bulunan Parçanın Analizi

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda, delik etrafındaki maksimum uzama (mm), parça boyundaki maksimum uzama (mm) ve pim deliğindeki maksimum gerilme değerleri Çizelge 5.3' te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Üzerinde iki delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları

E/D = 3		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
K/D = 2	M/D= 2	0,0381	0,255	151
	M/D= 3	0,0364	0,240	75,5
	M/D= 4	0,0318	0,214	66,9
	M/D= 5	0,0272	0,183	36,6
K/D = 3	M/D= 2	0,0324	0,221	35,6
	M/D= 3	0,0287	0,188	29,9
	M/D= 4	0,0275	0,149	25,2
	M/D= 5	0,0244	0,159	24,5
K/D = 4	M/D= 2	0,0279	0,171	175
	M/D= 3	0,0255	0,133	93,6
	M/D= 4	0,0208	0,127	78,9
	M/D= 5	0,0152	0,105	76,8

Çizelge 5.3.(Devam) Üzerinde iki delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları

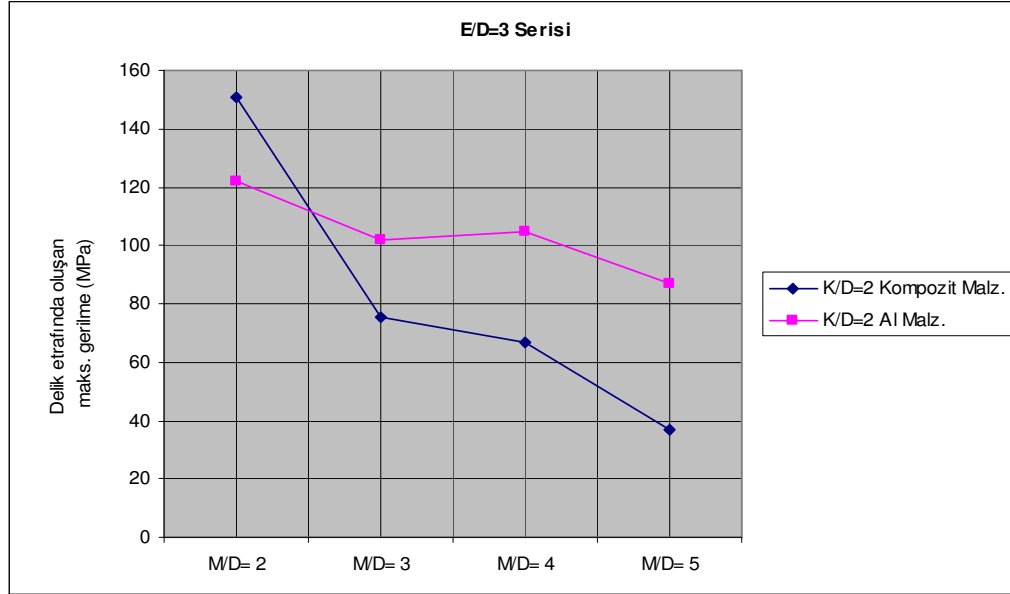
E/D = 4		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
K/D = 2	M/D= 2	0,0367	0,268	60,7
	M/D= 3	0,0354	0,240	48,2
	M/D= 4	0,0332	0,225	39
	M/D= 5	0,0264	0,185	31,9
K/D = 3	M/D= 2	0,0216	0,184	135
	M/D= 3	0,0206	0,176	121
	M/D= 4	0,0172	0,163	22,4
	M/D= 5	0,0139	0,156	21,3
K/D = 4	M/D= 2	0,0294	0,175	45
	M/D= 3	0,0285	0,155	35,9
	M/D= 4	0,0259	0,146	16,2
	M/D= 5	0,0239	0,140	15,7
E/D = 5		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
K/D = 2	M/D= 2	0,0398	0,299	100
	M/D= 3	0,0350	0,240	62,2
	M/D= 4	0,0303	0,208	39,3
	M/D= 5	0,0291	0,189	28,1
K/D = 3	M/D= 2	0,0343	0,217	32,5
	M/D= 3	0,0307	0,192	24,6
	M/D= 4	0,0285	0,152	23,9
	M/D= 5	0,0259	0,156	19,9
K/D = 4	M/D= 2	0,0288	0,165	114
	M/D= 3	0,0271	0,162	91,1
	M/D= 4	0,0267	0,153	31,9
	M/D= 5	0,0240	0,142	17,4

Çizelge 5.4' te kompozit parça ile aynı geometriye sahip Al izotropik malzemeye 11 000 N eksenel kuvvet uygulanması durumunda delik etrafındaki maksimum uzama (mm), parça boyundaki maksimum uzama (mm) ve pim deliğindeki maksimum gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.

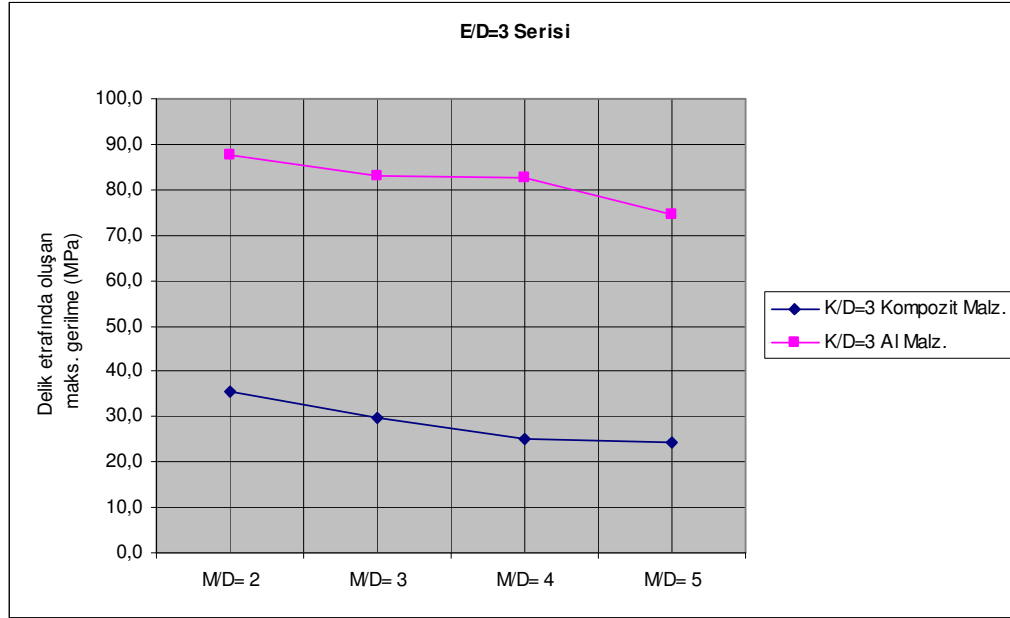
Çizelge 5.4. Üzerinde iki delik bulunan Al parçanın analiz sonuçları

E/D = 3		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
K/D = 2	M/D= 2	0,0274	0,206	122
	M/D= 3	0,0243	0,180	102
	M/D= 4	0,0217	0,158	105
	M/D= 5	0,0197	0,144	86,9
K/D = 3	M/D= 2	0,0214	0,161	87,5
	M/D= 3	0,0195	0,144	83,2
	M/D= 4	0,0181	0,131	82,8
	M/D= 5	0,0167	0,120	74,5
K/D = 4	M/D= 2	0,0176	0,132	73,6
	M/D= 3	0,0163	0,117	68,2
	M/D= 4	0,0153	0,113	66,3
	M/D= 5	0,0138	0,103	61,8
E/D = 4		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
K/D = 2	M/D= 2	0,0282	0,207	116
	M/D= 3	0,0248	0,180	115
	M/D= 4	0,0227	0,160	109
	M/D= 5	0,0207	0,146	103
K/D = 3	M/D= 2	0,0226	0,162	106
	M/D= 3	0,0206	0,145	88,2
	M/D= 4	0,0191	0,133	79,7
	M/D= 5	0,0178	0,121	73,9
K/D = 4	M/D= 2	0,0187	0,134	78,8
	M/D= 3	0,0174	0,121	79,1
	M/D= 4	0,0164	0,114	76,1
	M/D= 5	0,0156	0,104	69
E/D = 5		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
K/D = 2	M/D= 2	0,0284	0,209	131
	M/D= 3	0,0254	0,180	107
	M/D= 4	0,0229	0,161	111
	M/D= 5	0,0214	0,145	96,7
K/D = 3	M/D= 2	0,0232	0,162	113
	M/D= 3	0,0212	0,146	96,6
	M/D= 4	0,0197	0,132	85,5
	M/D= 5	0,0185	0,121	90,7
K/D = 4	M/D= 2	0,0192	0,135	81,5
	M/D= 3	0,0179	0,122	77,4
	M/D= 4	0,0172	0,115	75,6
	M/D= 5	0,0164	0,107	74,6

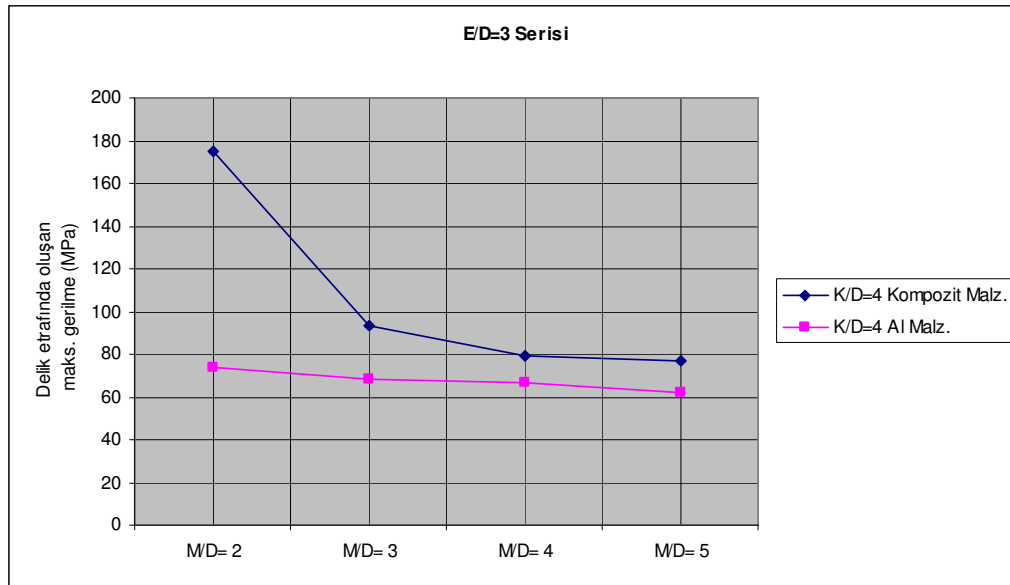
Şekil 5.10' dan Şekil 5.18' e kadar, iki pim deliğine sahip parçalarda; E/D, K/D ve W/D geometrilerine göre pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerleri, kompozit ve Al parçalar için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



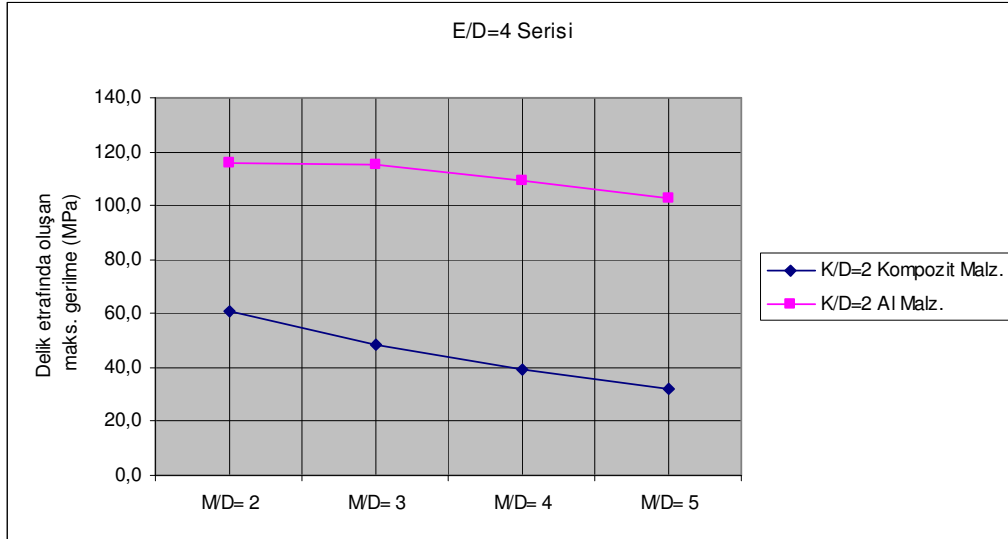
Şekil 5.10. E/D=3, K/D=2 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



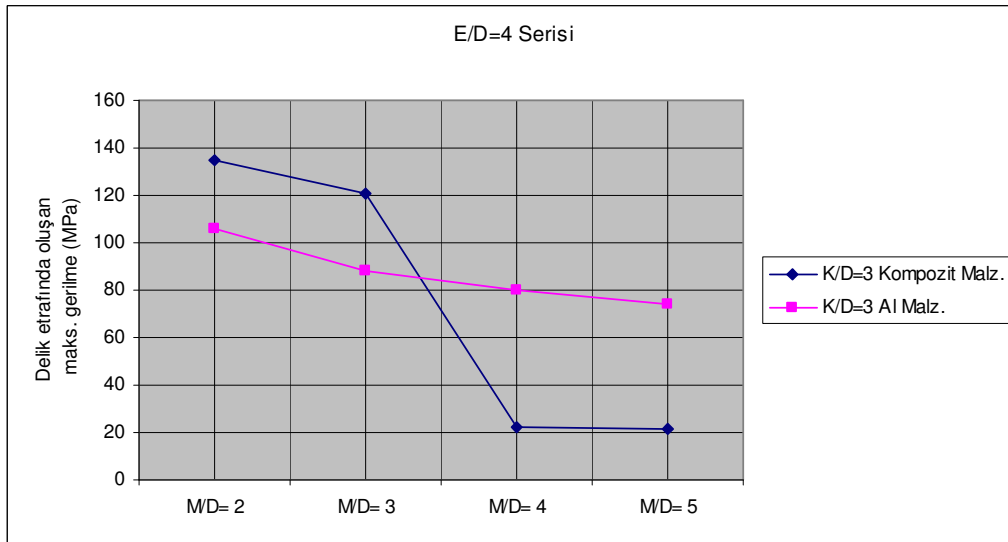
Şekil 5.11. E/D=3, K/D=3 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



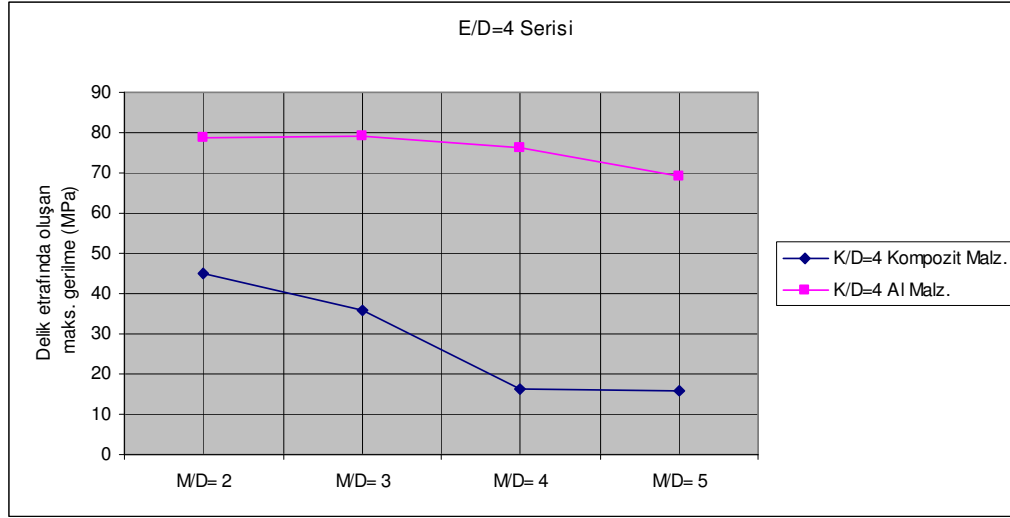
Şekil 5.12. E/D=3, K/D=4 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



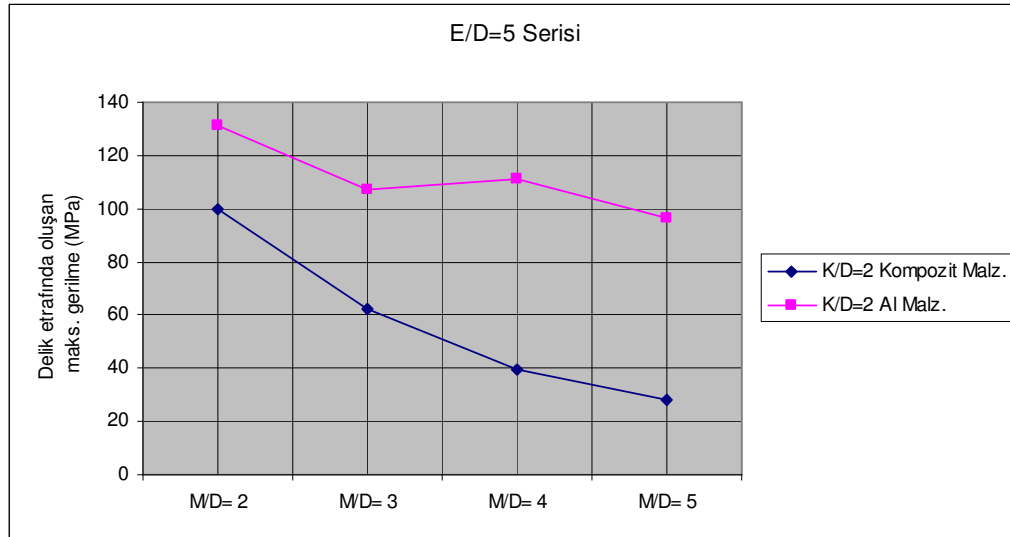
Şekil 5.13. E/D=4, K/D=2 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



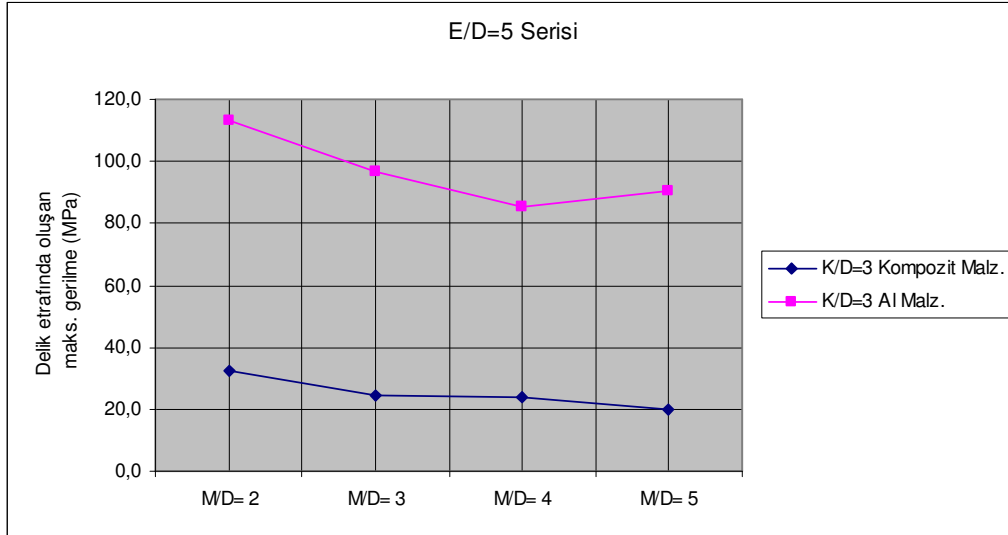
Şekil 5.14. E/D=4, K/D=3 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



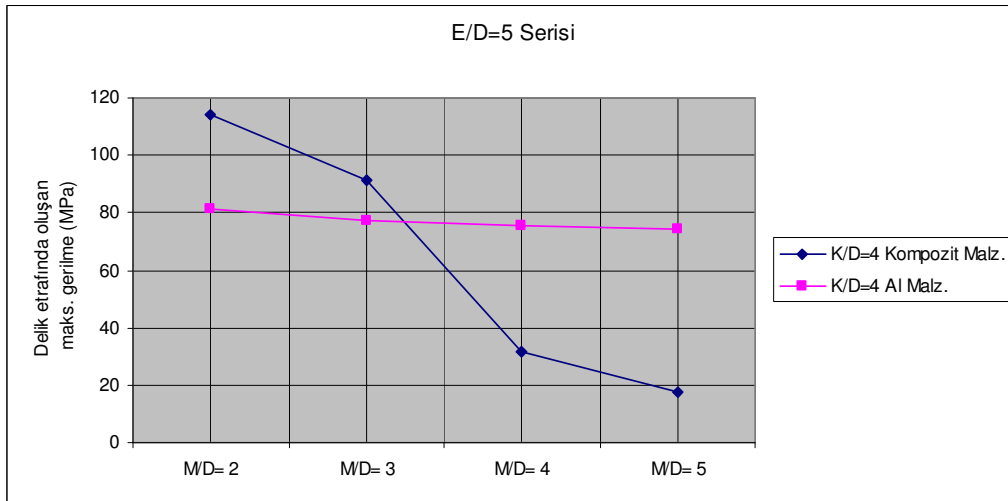
Şekil 5.15. E/D=4, K/D=4 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 5.16. E/D=5, K/D=2 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 5.17. E/D=5, K/D=3 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 5.18. E/D=5, K/D=4 geometrisi için M/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

5.3. Üzerinde Dört Delik Bulunan Parçanın Analizi

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda, delik etrafındaki maksimum uzama (mm), parça boyundaki maksimum uzama (mm) ve pim deliğindeki maksimum gerilme Çizelge 5.5' te verilmiştir.

Çizelge 5.6' da kompozit parça ile aynı geometriye sahip Al izotropik malzemeye 11 000 N aksenal kuvvet uygulanması durumunda delik etrafındaki maksimum uzama (mm), parça boyundaki maksimum uzama (mm) ve pim deliğindeki maksimum gerilme değerleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 5.5. Üzerinde dört delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları

E/D = 2		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
F/D =2	G/D = 2	0,0315	0,163	87,6
	G/D = 4	0,0278	0,160	84,8
	G/D = 6	0,0265	0,165	85,9
F/D =4	G/D = 2	0,0312	0,164	123
	G/D = 4	0,0228	0,146	112
	G/D = 6	0,0258	0,148	120
F/D =6	G/D = 2	0,0230	0,152	94
	G/D = 4	0,0219	0,137	89
	G/D = 6	0,0228	0,139	96
E/D = 3		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
F/D =2	G/D = 2	0,0303	0,168	85,2
	G/D = 4	0,0206	0,162	73
	G/D = 6	0,0228	0,139	87
F/D =4	G/D = 2	0,0310	0,167	45,8
	G/D = 4	0,0276	0,164	41,8
	G/D = 6	0,0296	0,165	51
F/D =6	G/D = 2	0,0313	0,164	66,7
	G/D = 4	0,0247	0,149	51
	G/D = 6	0,0320	0,167	70,6

Çizelge 5.5.(Devam) Üzerinde dört delik bulunan kompozit parçanın analiz sonuçları

E/D = 4		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
F/D =2	G/D = 2	0,0303	0,162	49,5
	G/D = 4	0,0283	0,162	38,9
	G/D = 6	0,0259	0,150	52
F/D =4	G/D = 2	0,0255	0,145	72,6
	G/D = 4	0,0240	0,162	59,3
	G/D = 6	0,0283	0,166	70
F/D =6	G/D = 2	0,0309	0,179	59,9
	G/D = 4	0,0234	0,162	46,3
	G/D = 6	0,0247	0,151	55,7

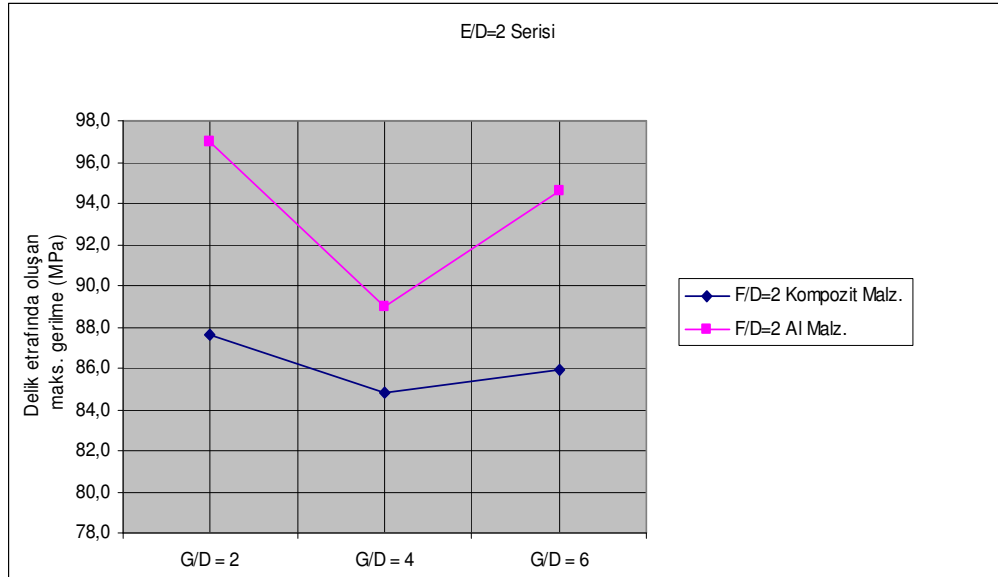
Çizelge 5.6. Üzerinde dört delik bulunan Al parçanın analiz sonuçları

E/D = 2		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
F/D =2	G/D = 2	0,0203	0,129	97
	G/D = 4	0,0205	0,121	89
	G/D = 6	0,0204	0,125	94,6
F/D =4	G/D = 2	0,0215	0,128	101
	G/D = 4	0,0214	0,125	92,2
	G/D = 6	0,0213	0,125	96,7
F/D =6	G/D = 2	0,0220	0,128	103,3
	G/D = 4	0,0227	0,126	101
	G/D = 6	0,0224	0,128	106
E/D = 3		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
F/D =2	G/D = 2	0,0204	0,125	91,4
	G/D = 4	0,0205	0,122	88,2
	G/D = 6	0,0208	0,122	98,6
F/D =4	G/D = 2	0,0217	0,127	102
	G/D = 4	0,0214	0,125	94
	G/D = 6	0,0213	0,125	99,4
F/D =6	G/D = 2	0,0221	0,127	99
	G/D = 4	0,0222	0,125	93
	G/D = 6	0,0223	0,125	109

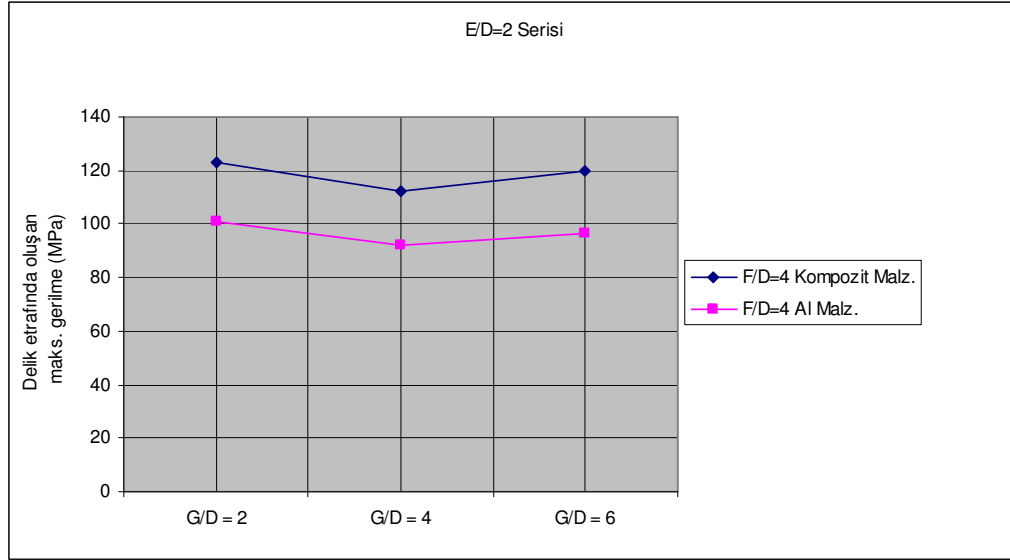
Çizelge 5.6.(Devam) Üzerinde dört delik bulunan Al parçanın analiz sonuçları

E/D = 4		Delik etrafındaki maksimum uzama (mm)	Parçanın boyundaki maksimum uzama (mm)	Delik etrafındaki maksimum gerilme (MPa)
F/D = 2	G/D = 2	0,0209	0,126	102
	G/D = 4	0,0207	0,127	89,5
	G/D = 6	0,0208	0,123	97,9
F/D = 4	G/D = 2	0,0216	0,128	89,6
	G/D = 4	0,0218	0,125	84,7
	G/D = 6	0,0220	0,125	102
F/D = 6	G/D = 2	0,0226	0,129	112
	G/D = 4	0,0218	0,125	99,5
	G/D = 6	0,0219	0,125	106

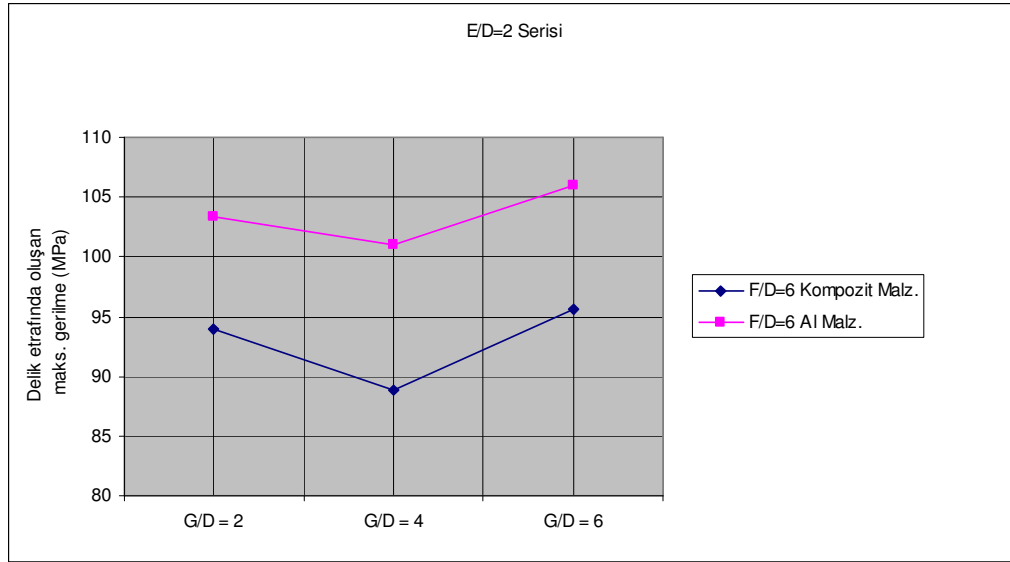
Şekil 5.19' dan Şekil 5.27' ye kadar, dört pim deliğine sahip parçalarda; E/D, F/D ve G/D geometrilerine göre pim deliği etrafında meydana gelen maksimum uzama değerleri kompozit ve Al parçalar için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



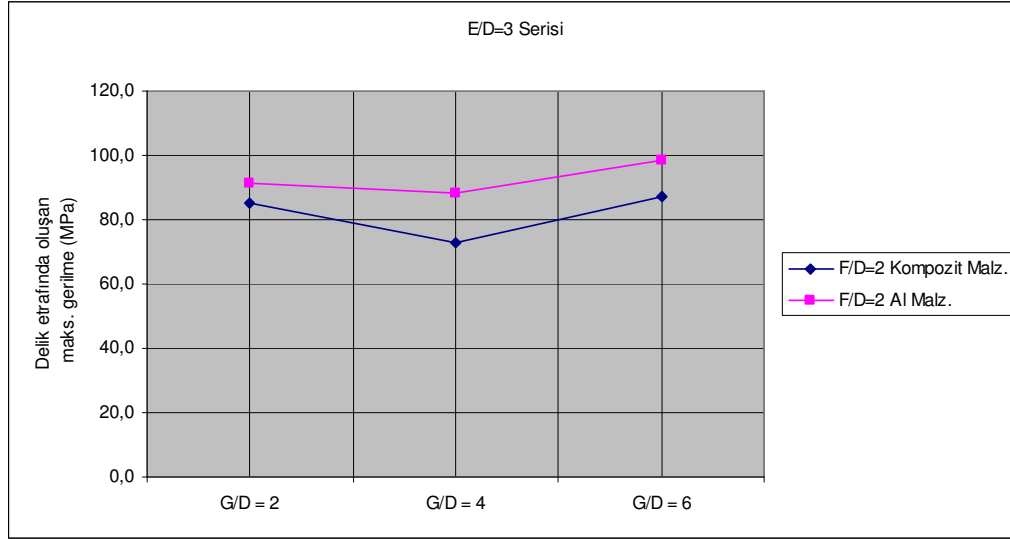
Şekil 5.19. E/D=2, F/D=2 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



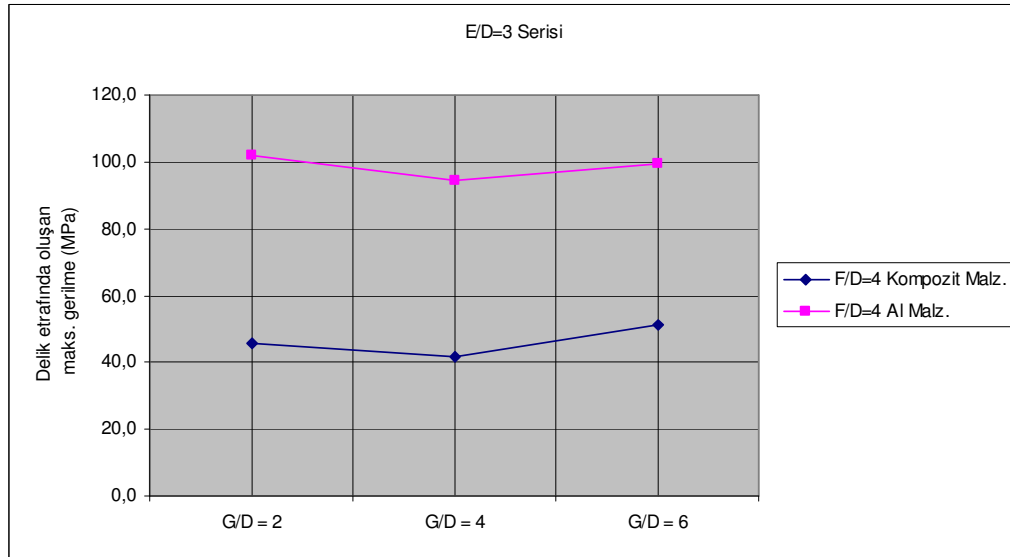
Şekil 5.20. E/D=2, F/D=4 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



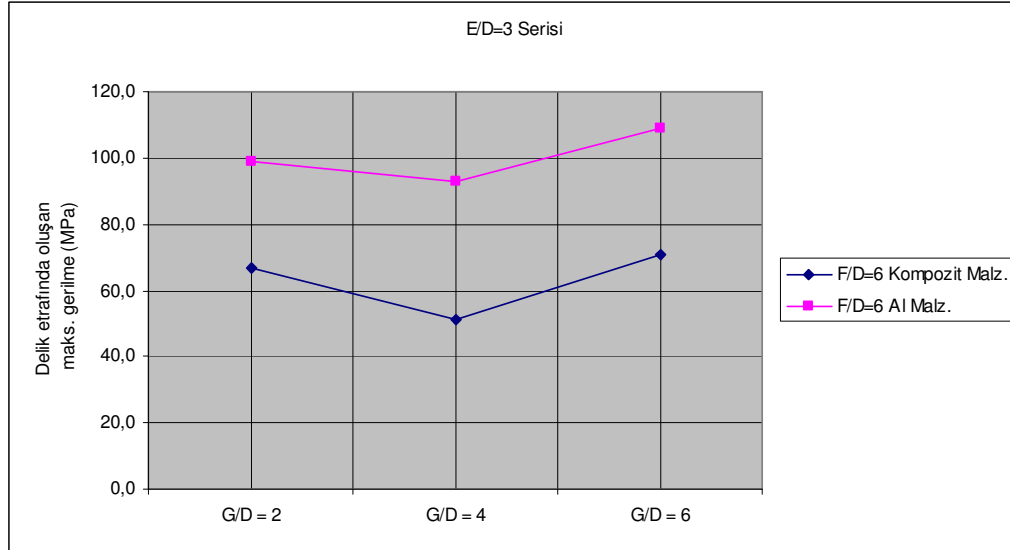
Şekil 5.21. E/D=2, F/D=6 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



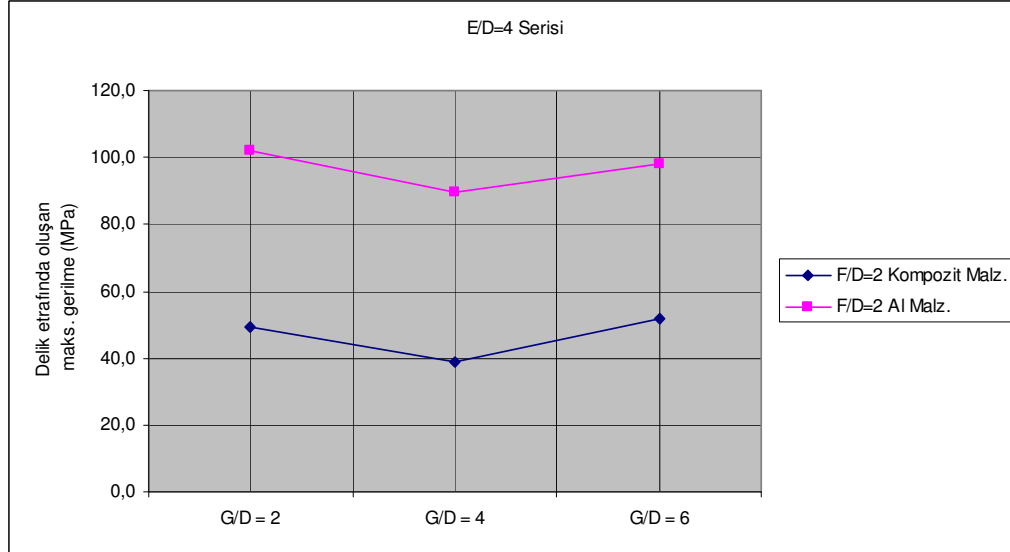
Şekil 5.22. E/D=3, F/D=2 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



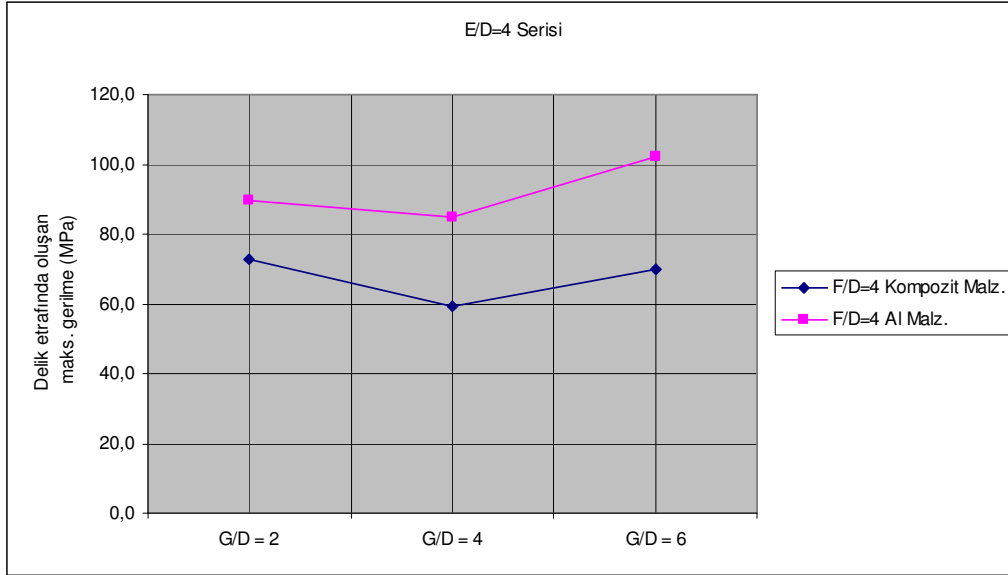
Şekil 5.23. E/D=3, F/D=4 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



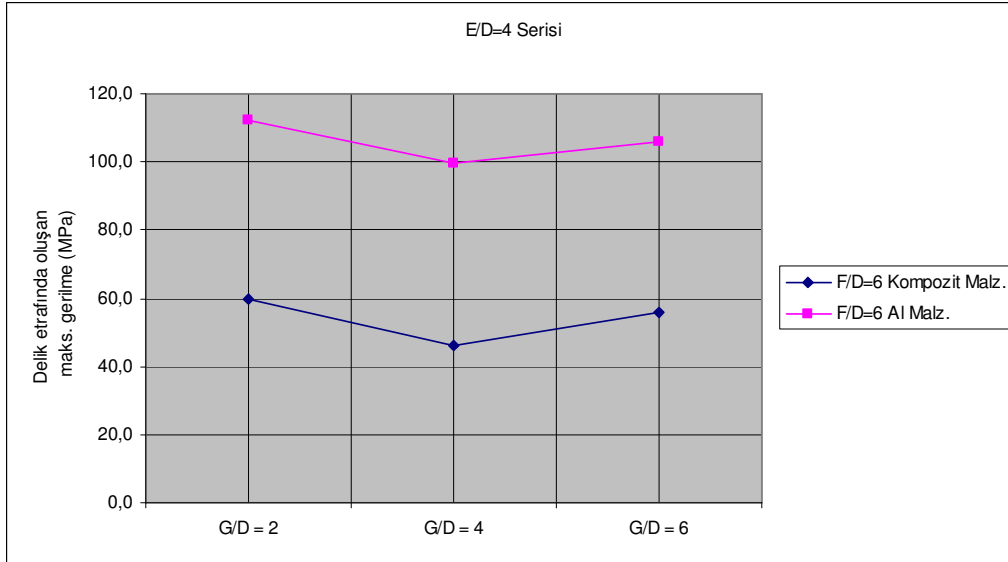
Şekil 5.24. E/D=3, F/D=6 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 5.25. E/D=4, F/D=2 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 5.26. E/D=4, F/D=4 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 5.27. E/D=4, F/D=6 geometrisi için G/D geometrilerinde, kompozit malzeme ile Al malzemede pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

ANSYS sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda, üç ayrı geometri için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Üzerinde tek delik bulunan tabakalı kompozit malzemeye uygulanan yük neticesinde elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- E/D serilerinde, $W/D=5$ geometrisinde dayanımın en yüksek, $W/D=2$ geometrisinde ise dayanımın en düşük olduğu,
- Parça boyunda ve pim deliği etrafında oluşan maksimum uzama değerlerinin, W/D oranının artmasıyla azaldığı,
- Pim deliği etrafında oluşan gerilmelerin, W/D oranının artmasıyla azaldığı,
- Kompozit malzemenin aynı geometri ve eksenel yük altında izotropik alüminyum malzemeye göre daha mukavim olduğu,
- E/D oranının, pim deliği etrafında meydana gelen gerilmeleri çok etkilemediği gözlemlenmiştir.

Üzerinde iki delik bulunan tabakalı kompozit malzemeye uygulanan yük neticesinde elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- E/D ve K/D serilerinde, M/D oranı arttıkça, pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin azaldığı,
- Pim deliği etrafındaki uzamanın, K/D oranından bağımsız, parça boyundaki uzamanın ise K/D oranının artmasıyla azalmaya başladığı,
- Pim deliği etrafında meydana gelen gerilmelerin, E/D oranından etkilenmediği,
- Kompozit malzemenin aynı geometri ve eksenel yük altında izotropik alüminyum malzemeye göre daha mukavim olduğu,

- Bütün serilerin $M/D=2$ olduğu durumlarda, parça boyundaki uzama ve delik etrafındaki uzama miktarları en yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

Üzerinde dört delik bulunan tabakalı kompozit malzemeye uygulanan yük neticesinde elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler aşağıdaki gibidir;

- $F/D=2$, $G/D=8$ olan bütün durumlarda, parçada çok büyük hasarların olduğu daha önceki çalışmalarda belirlendiğinden, $G/D=8$ parametresi bu çalışmada kullanılmamıştır [11],
- $E/D=3$, 4 serilerinde ortotropik kompozit malzemenin pim deliği etrafında oluşan gerilme ve delik etrafında oluşan şekil değiştirme değerlerinin, Al izotropik malzemeye göre daha uygun olduğu, $E/D=2$ serisinde ise Al malzemenin daha uygun olduğu,
- Kompozit ve Al malzemelerin her ikisinde de en dayanıklı geometrinin $G/D=4$ serisinde olduğu,
- Kompozit malzemenin aynı geometri ve aksenal yük altında izotropik alüminyum malzemeye göre daha mukavim olduğu,
- Delik etrafında meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmelerin G/D parametresine bağlı olduğu,
- E/D oranının artmasıyla parçanın dayanımının arttığı, G/D ' nin 4 olduğu değerlerde parçanın en dayanıklı olduğu, 2 ve 6 olduğu değerlerde ise dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir.

Analizi yapılan geometriler içinde kullanıcıya önerilecek olan optimum pim ile bağlantı geometrisi, $E/D=4$, $F/D=4$ ve $G/D=4$ olan geometridir.

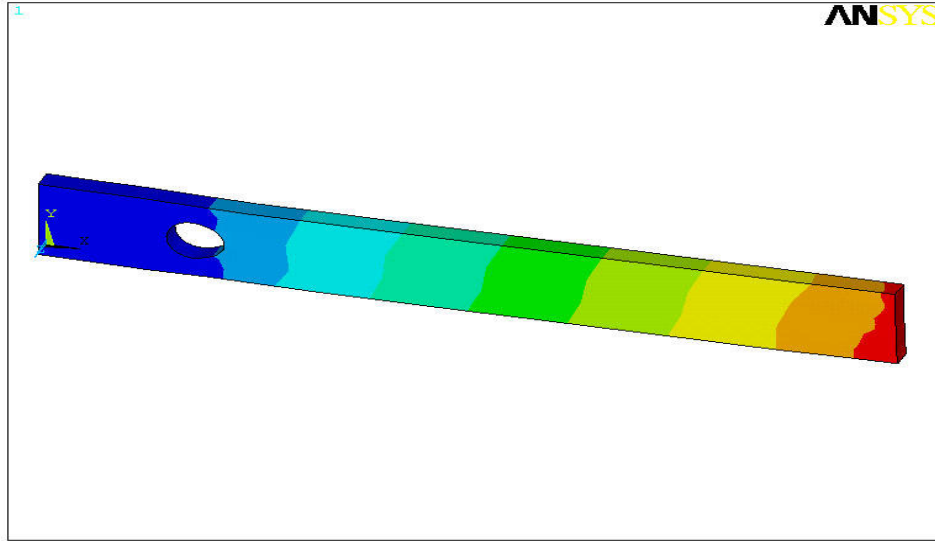
KAYNAKLAR

1. Camanho, P.P. ve Matthews, F.L., "Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP : a Review", **Composites Part A**, 28: 529-547 (1997).
2. Chen, W-H. ve Lee, S.S., "Numerical and Experimental Failure Analysis of Composite Laminates with Pin Joints under Bending Loads", **Journal of Composite Materials**, 29: 15-36 (1995).
3. Camanho, P.P., ve Matthews, F.L., "A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates", **Journal of Composite Materials**, 33: 2248-2280 (1999).
4. Aktaş, A., Karakuzu, R., "Failure analysis of two-dimensional carbon–epoxy composite plate pinned joint", **Mech Compos Mater Struct**, 6: 347-361 (1999).
5. Dano, M.L., Gendron, G., Picard, A., "Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates", **Composite Structures**, 50: 287-296 (2000).
6. İçten, B.M., Karakuzu, R., "Progressive failure analysis of pin loaded carbon–epoxy woven composite plates", **Compos Sci Technol**, 62: 1259-1271 (2002).
7. Okutan, B., "The effects of geometrical parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional elyaf-glass reinforced epoxy laminate", **Composites Part B**, 33: 567-578 (2002).
8. Okutan, B., Karakuzu, R., "The strength of pinned joints in laminated composites", **Composite Science and Technology**, 63: 893-905 (2003).
9. Akkuş, A., "Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading", **Composite Structures**, 67: 485-489 (2005).
10. Taylak, N., "Effect Of Hole Number To Bearing Strength in Pin Loaded Laminated Composite Plates", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 22-45 (2006).
11. Tekinşen, Ö., " Failure Strength Of Laminated Composite Plates With Multi-Pin Loaded Holes", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 46-100 (2006).

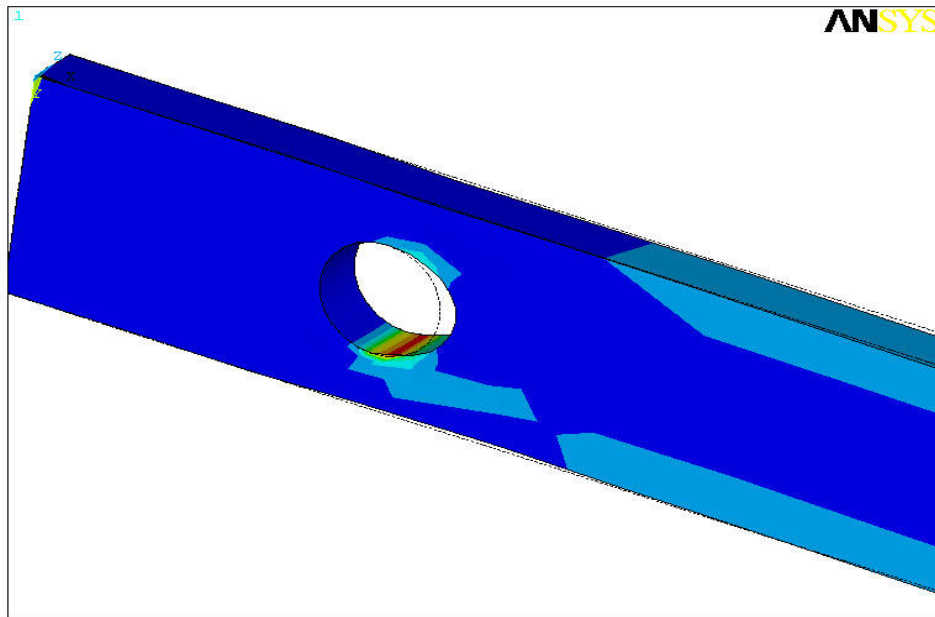
12. Kaw, A.K., "Mechanics of Composite Materials", **CRC Press LLC**, New York, 71-128 (1997).
13. İnternet: HexPly 8552 Ürün Kataloğu, " Mechanical Properties of HexPly 8552", <http://www.hexcel.com/NR/rdonlyes/B99A007A-C050-4439-9E59-828F539B03A4/0/HEXPPLY85528PPA4.pdf>
14. Konish, H.J., Whitney, J.M., "Approximate stress as in an orthotropic plate containing a circular hole", **J Compos Mater**, 9:157-166 (1975).
15. Mazumdar, S.K., "Composites manufacturing : materials, product, and process Engineering", **USA: CRC Press LLC**,(2002).
16. Daniel, I.M., Ishai, O., "Engineering Mechanics of Composite Materials", **Oxford University Press**, New York, 37-187 (1994).
17. Fagan, M.J., "Finite element Analysis Theory and Practice", **Longman**, NewYork, 61-201 (1992).
18. Cook, R.D., "Finite Element Modeling for Stress Analysis", **John Wiley & Sons Ltd.**, New York, 1-144 (1995).
19. Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.V., "Composite Materials Design and Applications 4th Ed.", **CRC Press LLC**, Boca Raton, 135-198 (2003).
20. Peters, S.T., "Handbook of Composites", 2nd Ed., **Chapman & Hall**, London, 610-626 (1998).
21. Sayman, O., ve Aksoy, S., "Kompozit Malzemeler", **DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları** (1980).
22. "ANSYS Release 10.0 Documentation", **ANSYS**, Pittsburgh, 1-100 (2005).
23. Shigley, J.E., "Mechanical Engineering Design", 1st Ed., **McGrawHill**, Singapore, 291-328 (1986).
24. Jones, R.M., "Mechanics of Composite Materials", 2nd Ed., **Taylor & Francis**, New York, 147-235 (1999).

EKLER

EK -1. Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi

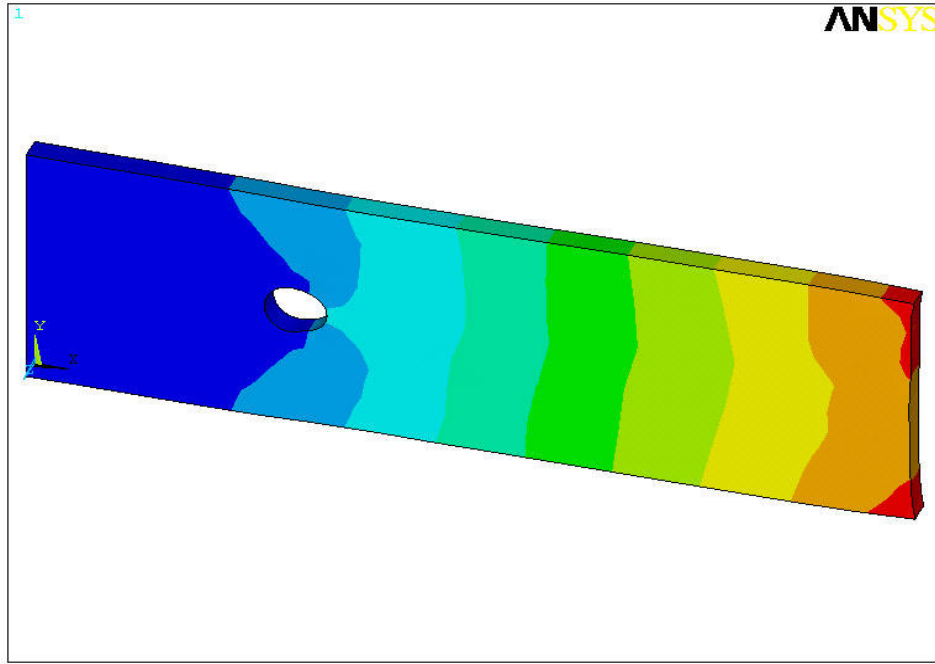


Şekil 1.1. $E/D=3$, $W/D=2$ geometrisi için parça boyunda uzama hali

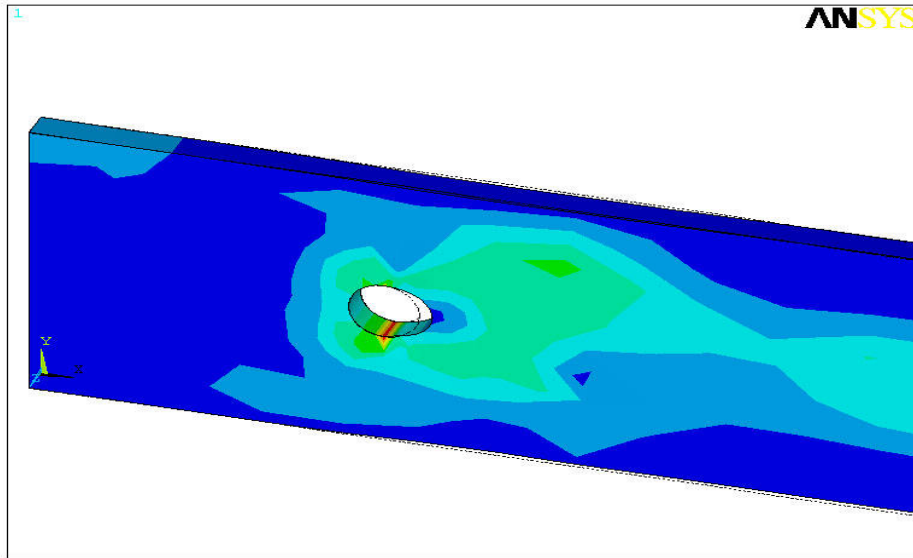


Şekil 1.2. $E/D=3$, $W/D=2$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali

EK-1.(Devam) Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi

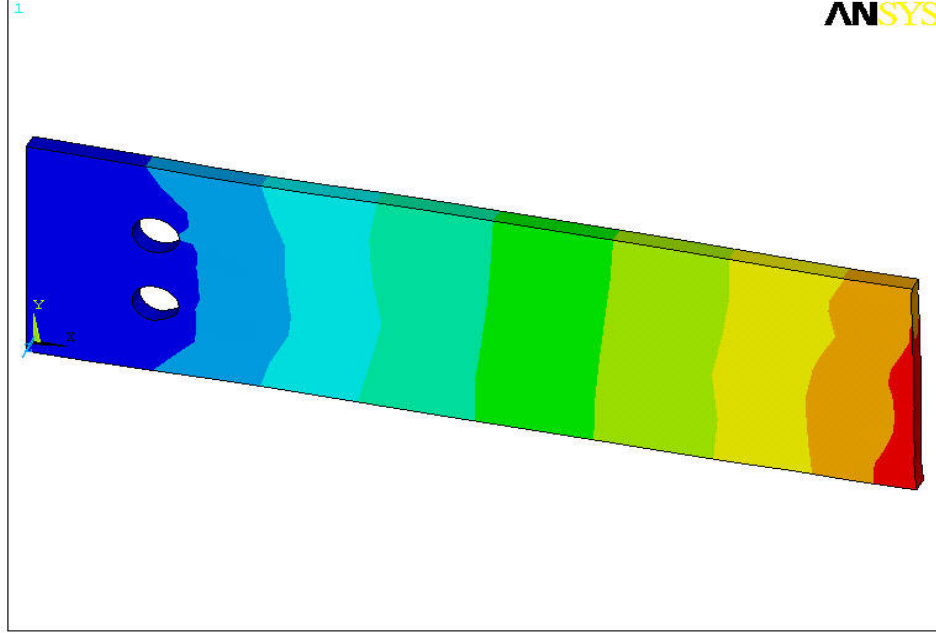


Şekil 1.3. $E/D=5$, $W/D=5$ geometrisi için parça boyunda uzama hali

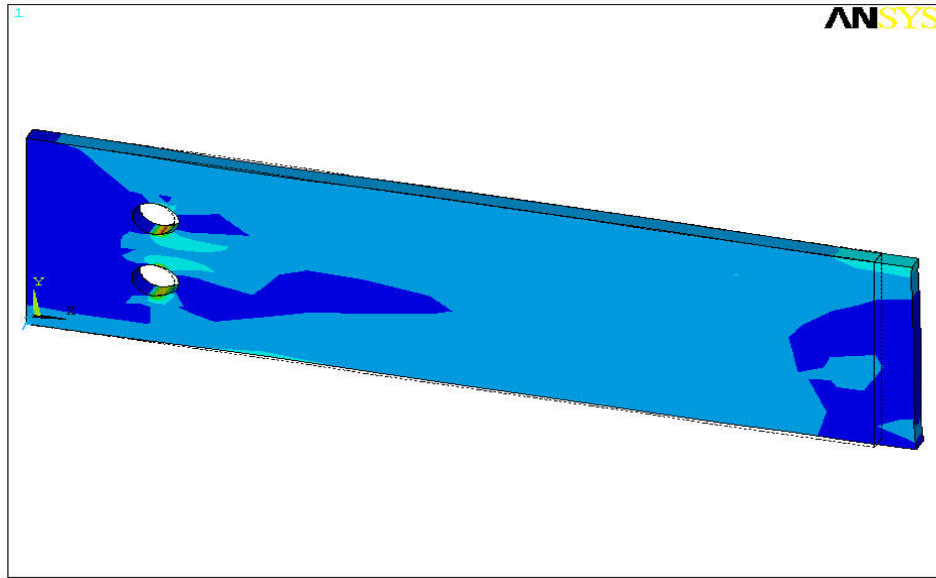


Şekil 1.4. $E/D=5$, $W/D=5$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali

EK-1.(Devam) Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi

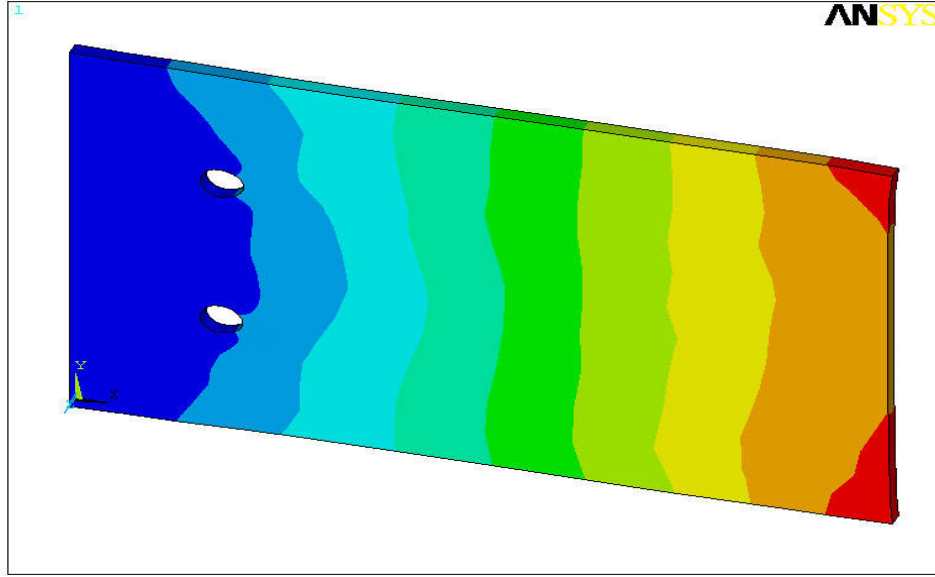


Şekil 1.5. $E/D=3$, $K/D=2$, $M/D=2$ geometrisi için parça boyunda uzama hali

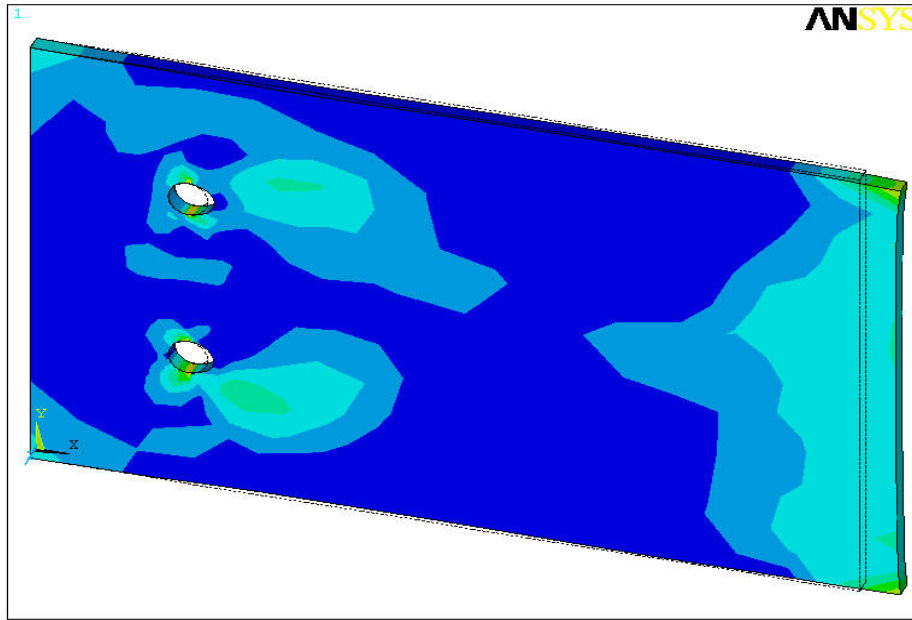


Şekil 1.6. $E/D=3$, $K/D=2$, $M/D=2$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali

EK-1.(Devam) Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi

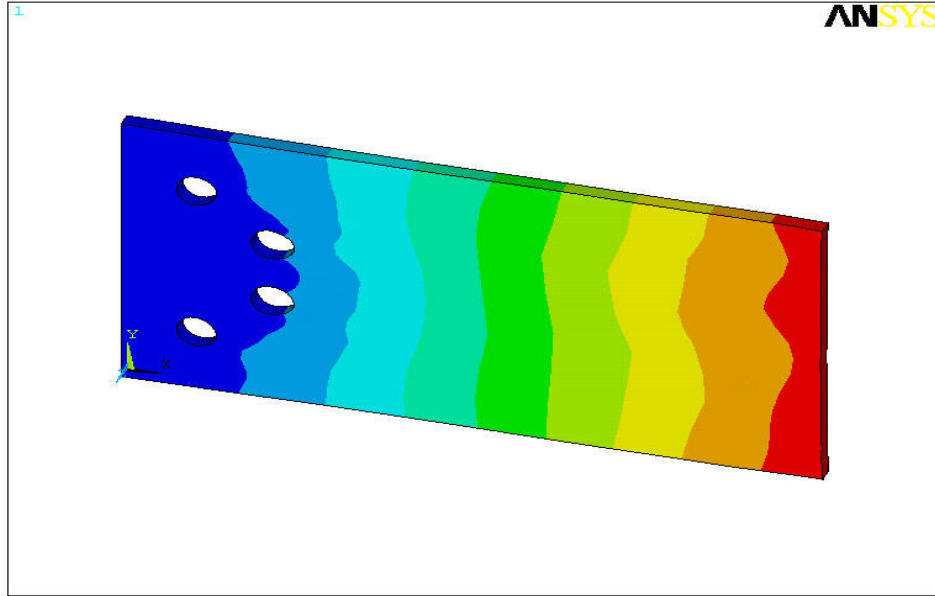


Şekil 1.7. $E/D=4$, $K/D=4$, $M/D=5$ geometrisi için parça boyunda uzama hali

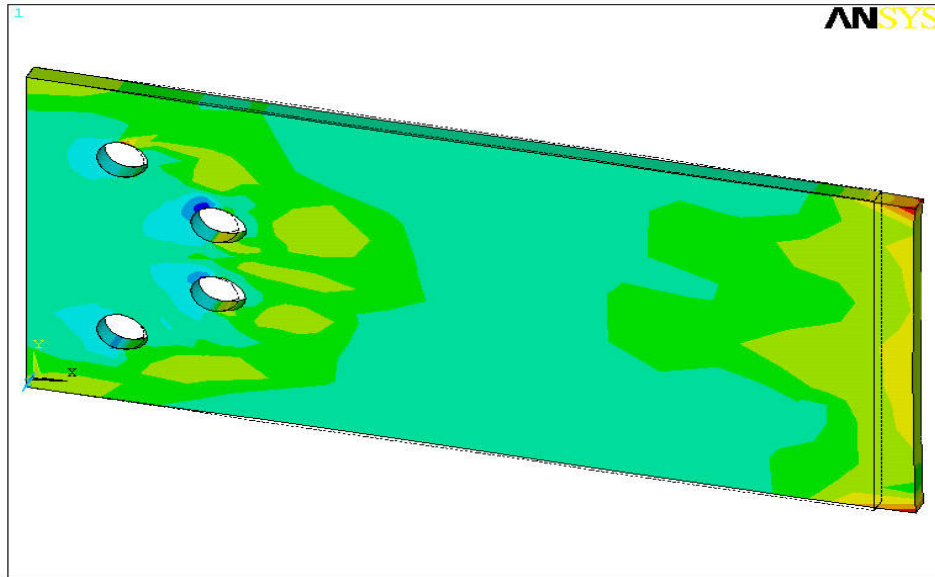


Şekil 1.8. $E/D=4$, $K/D=4$, $M/D=5$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali

EK-1.(Devam) Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi

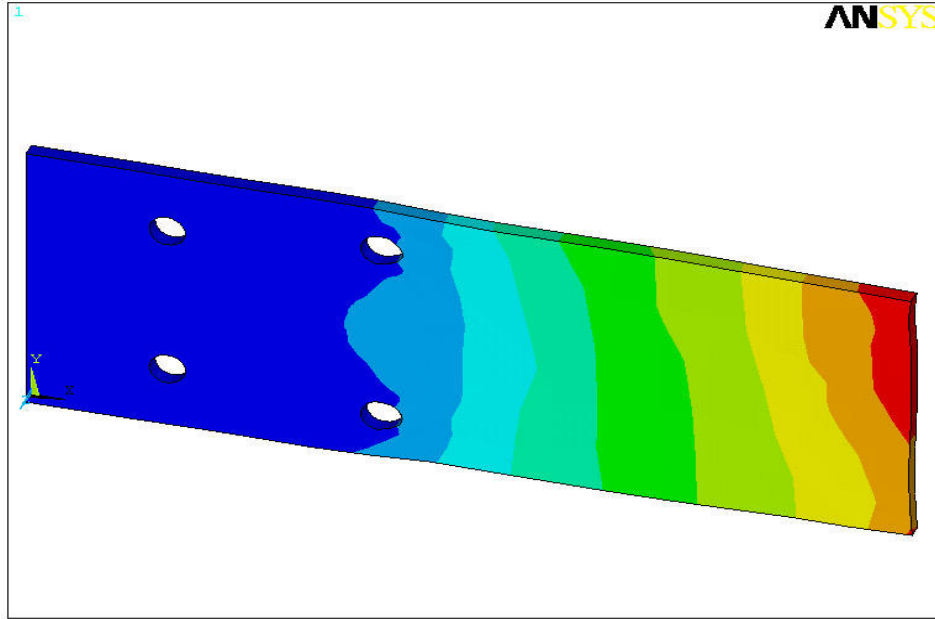


Şekil 1.9. $E/D=2$, $F/D=2$, $G/D=2$ geometrisi için parça boyunda uzama hali

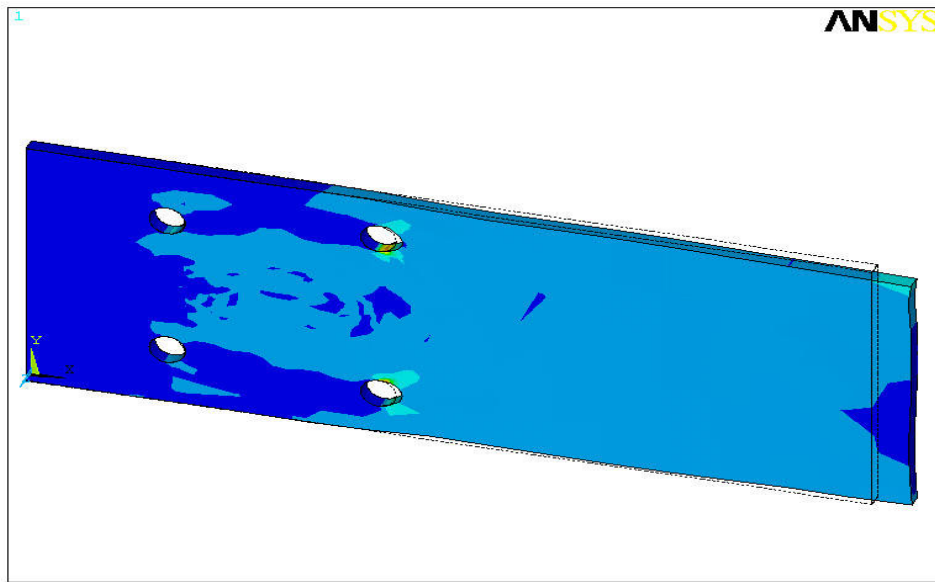


Şekil 1.10. $E/D=2$, $F/D=2$, $G/D=2$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali

EK-1.(Devam) Parçada Meydana Gelen Uzama ve Gerilme Durumunun Gösterimi

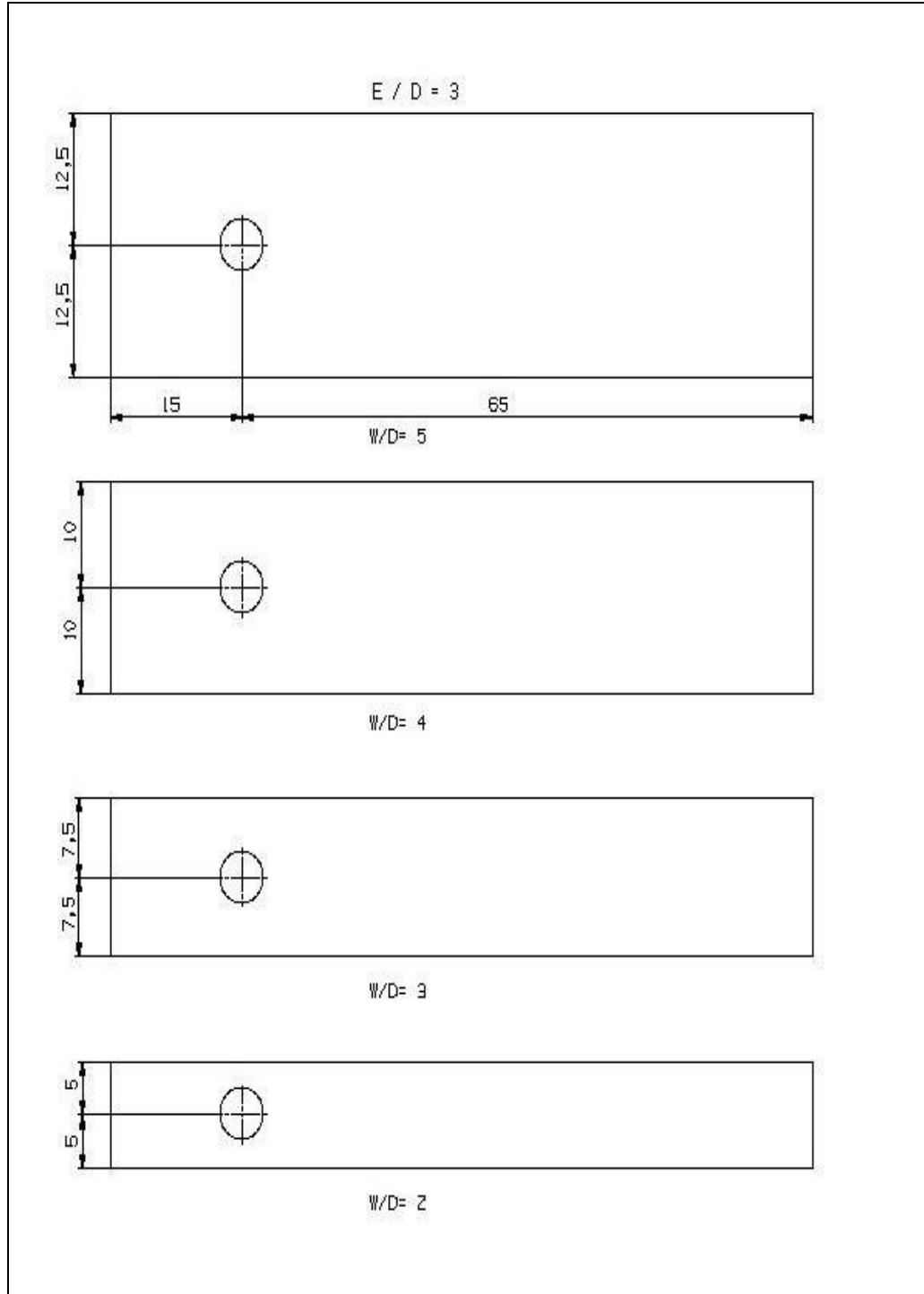


Şekil 1.11. $E/D=4$, $F/D=6$, $G/D=6$ geometrisi için parça boyunda uzama hali



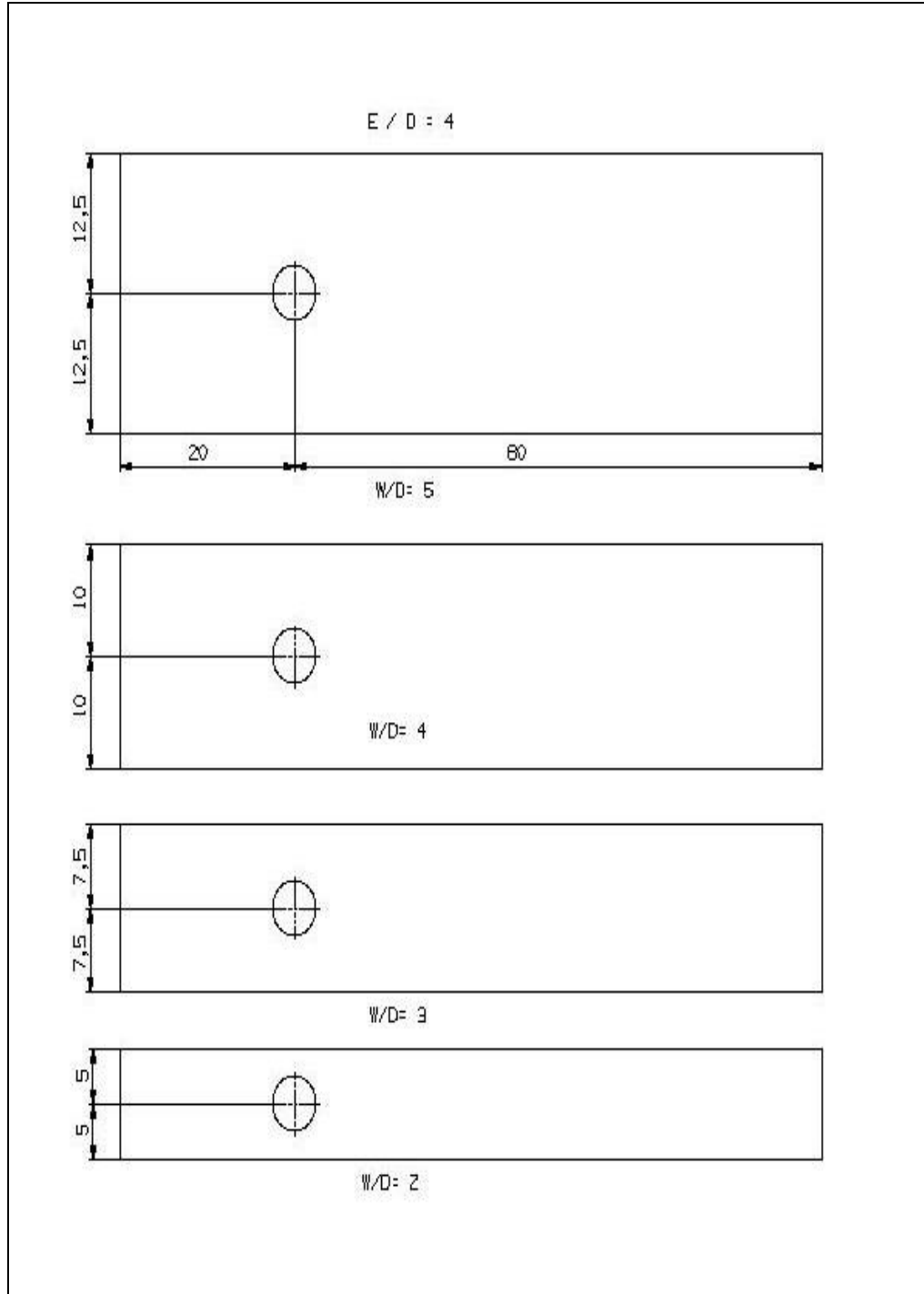
Şekil 1.12. $E/D=4$, $F/D=6$, $G/D=6$ geometrisi için pim deliği etrafında oluşan gerilme hali

EK-2. Parça Geometrilerine Ait Çizimler

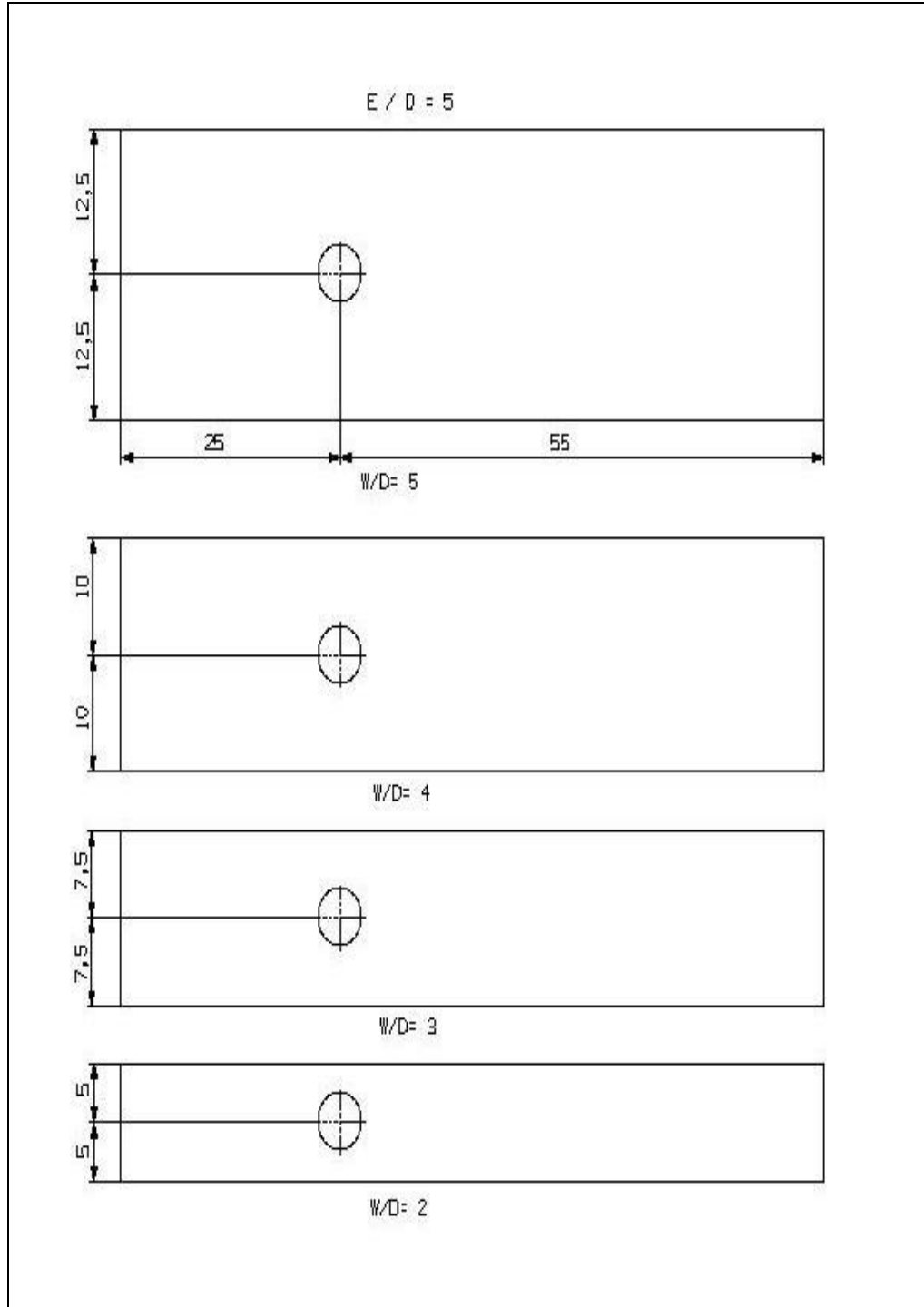


Şekil 2.1. E/D=3, W/D=2, 3, 4, 5 geometrilerine ait çizimler

EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

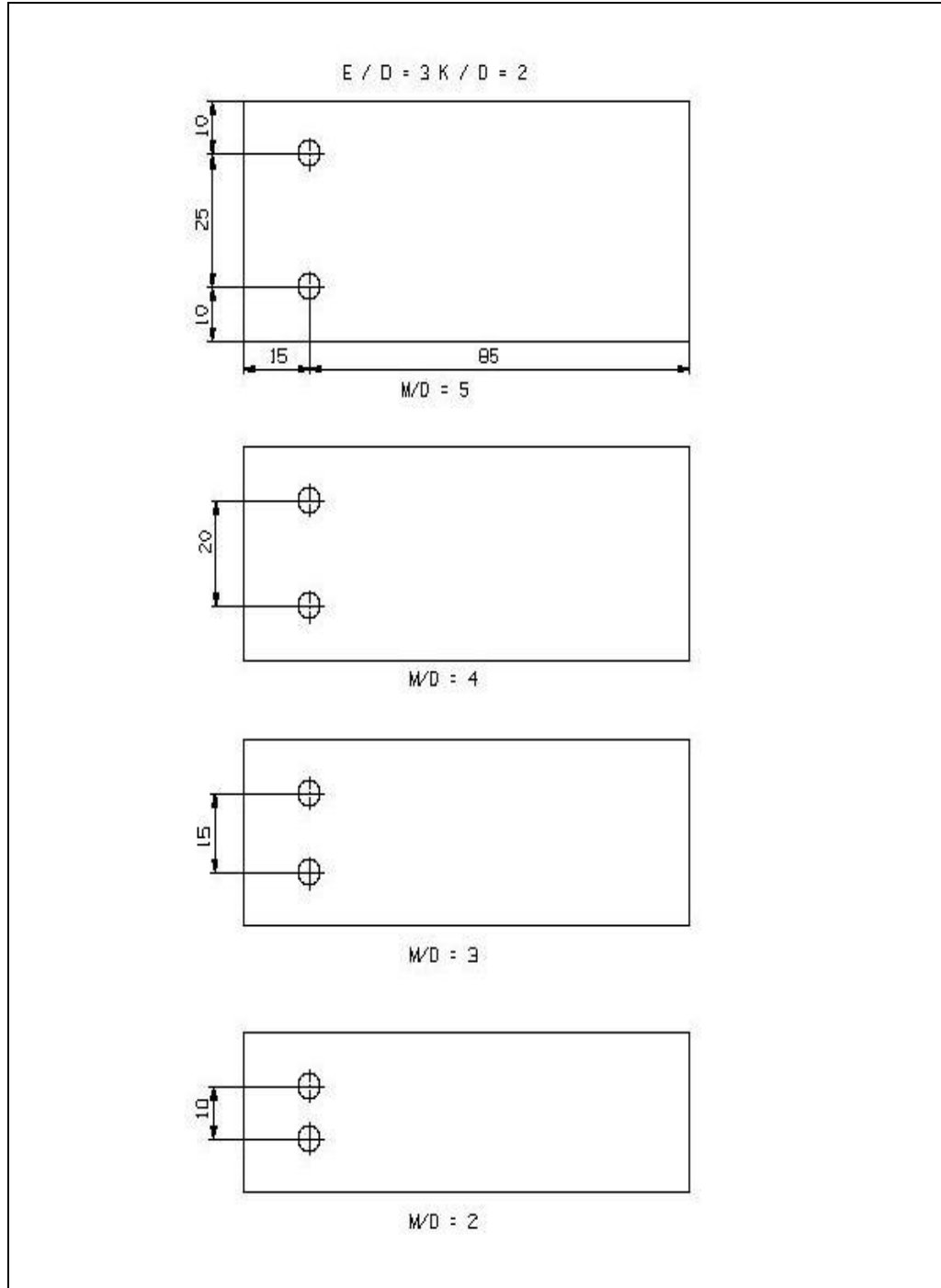
Şekil 2.2. $E/D=4$, $W/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

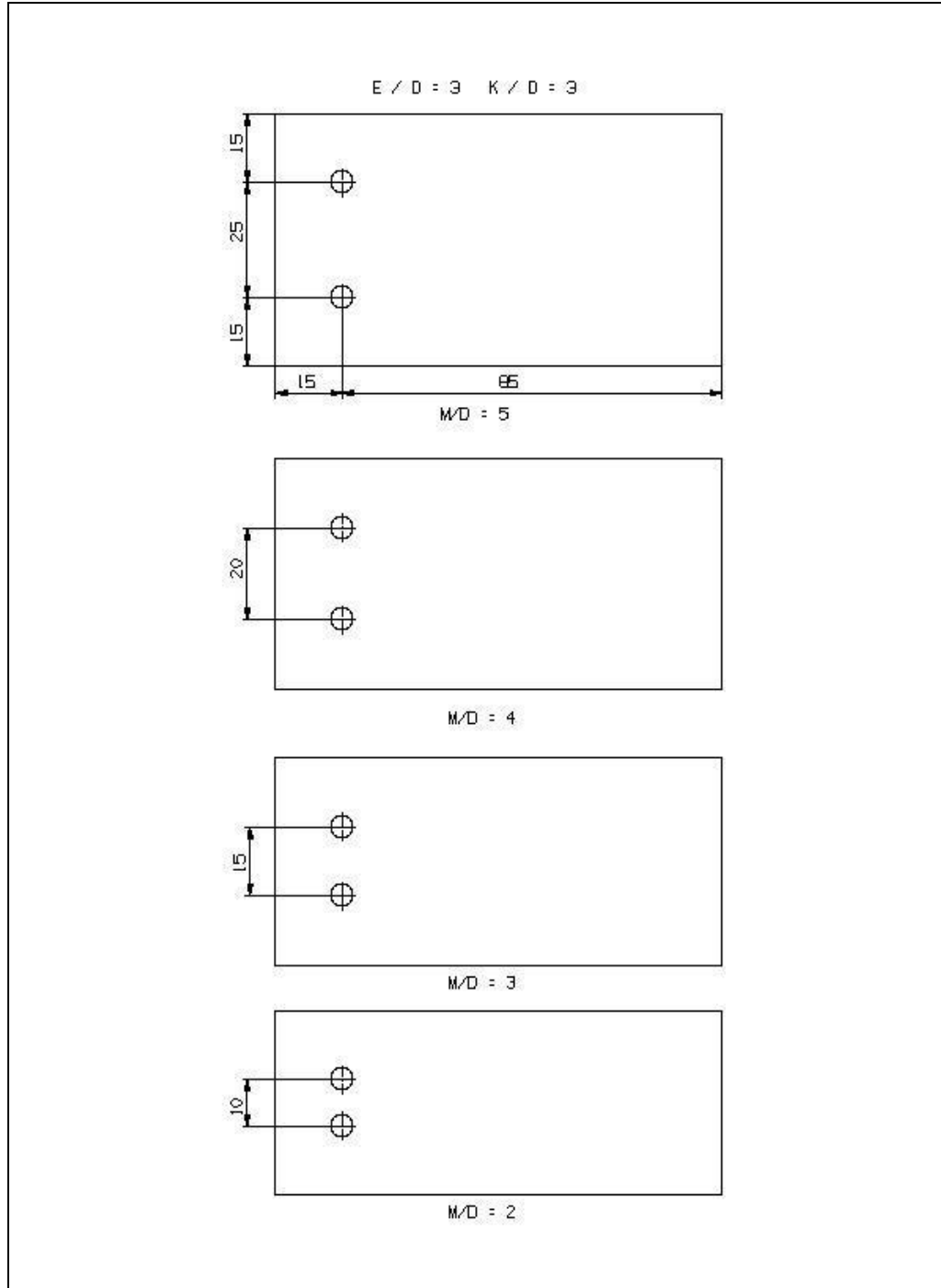


Şekil 2.3. E/D=5, W/D=2, 3, 4, 5 geometrilerine ait çizimler

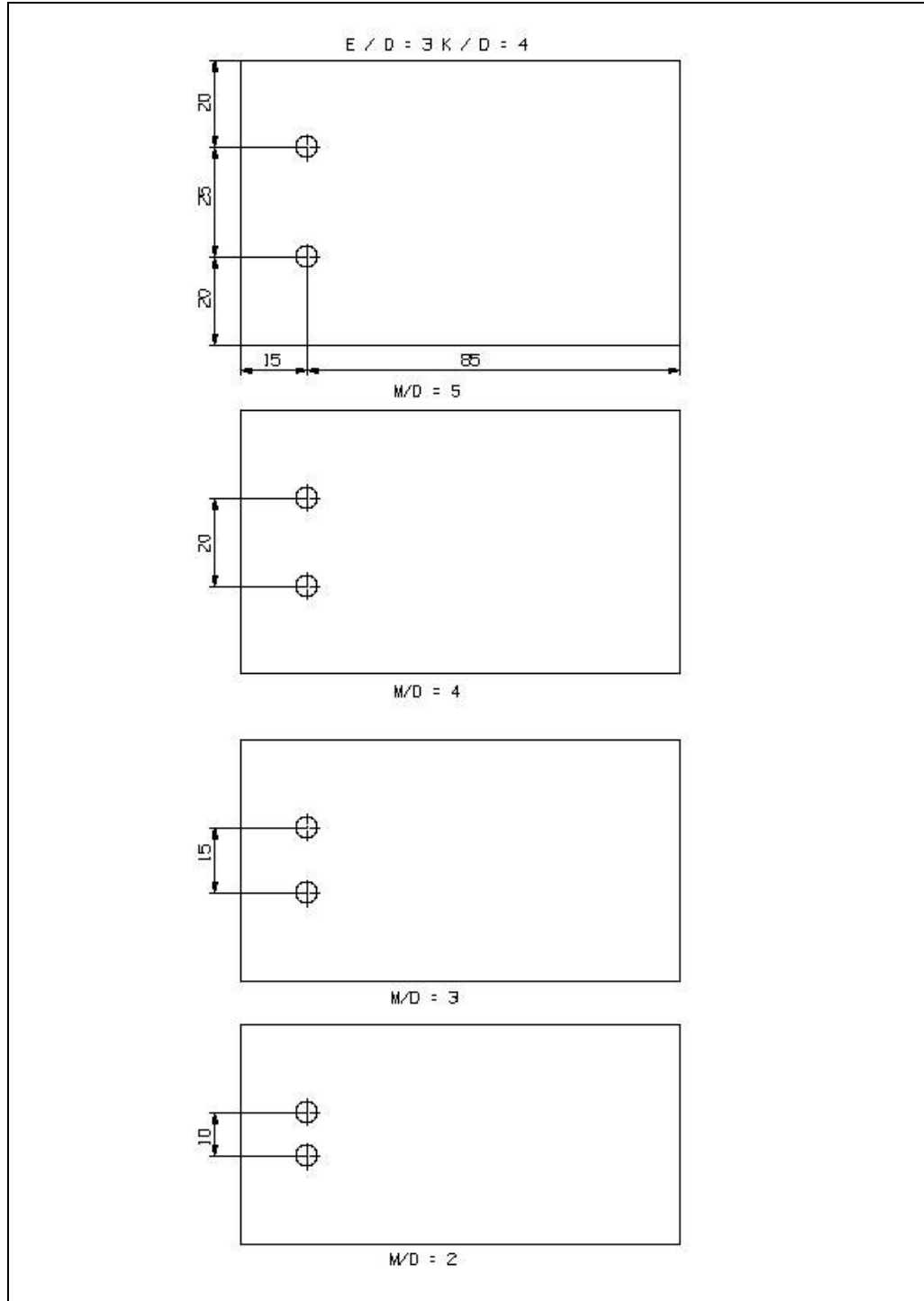
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.4. $E/D=3$, $K/D=2$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

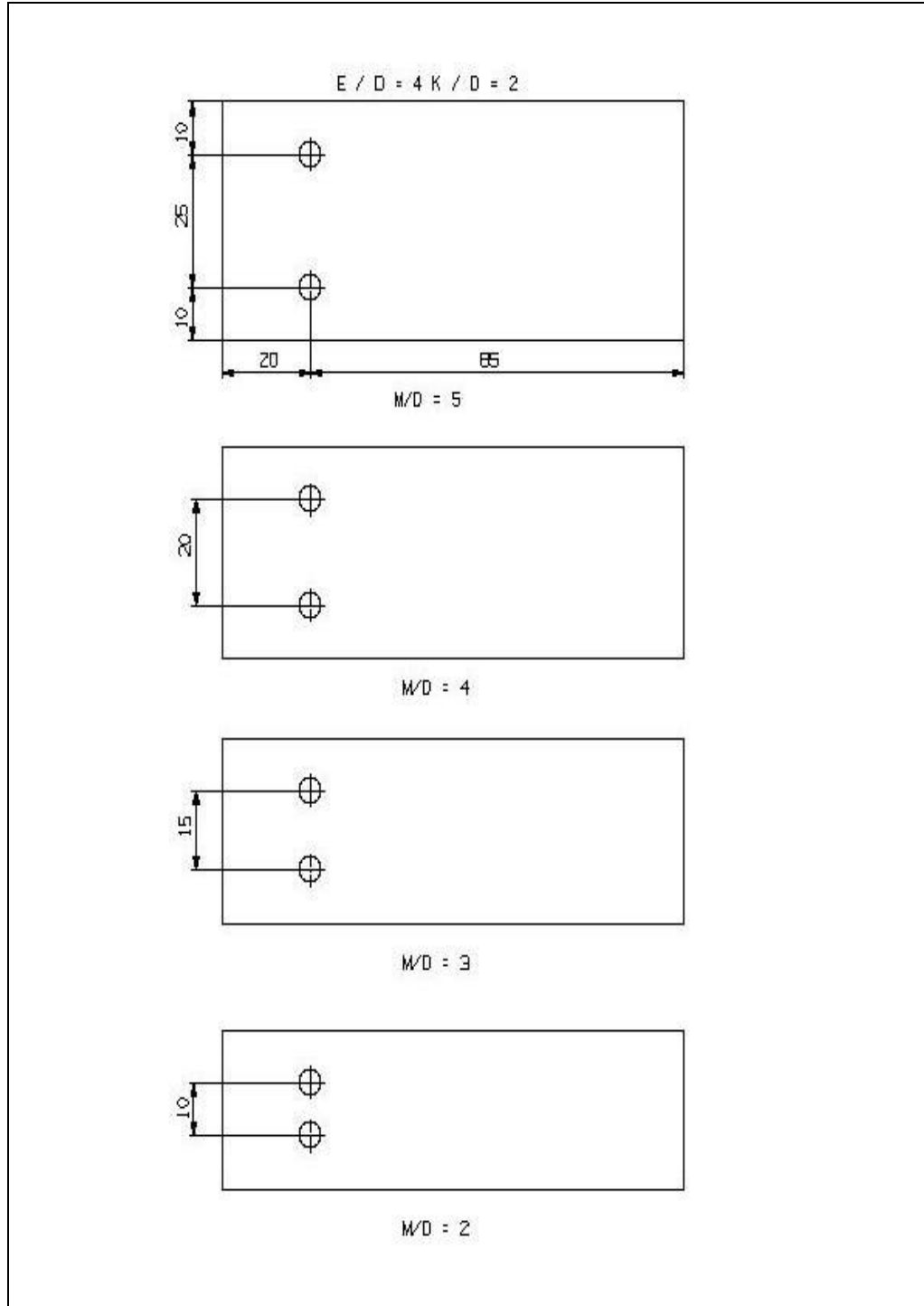
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.5. $E/D=3$, $K/D=3$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

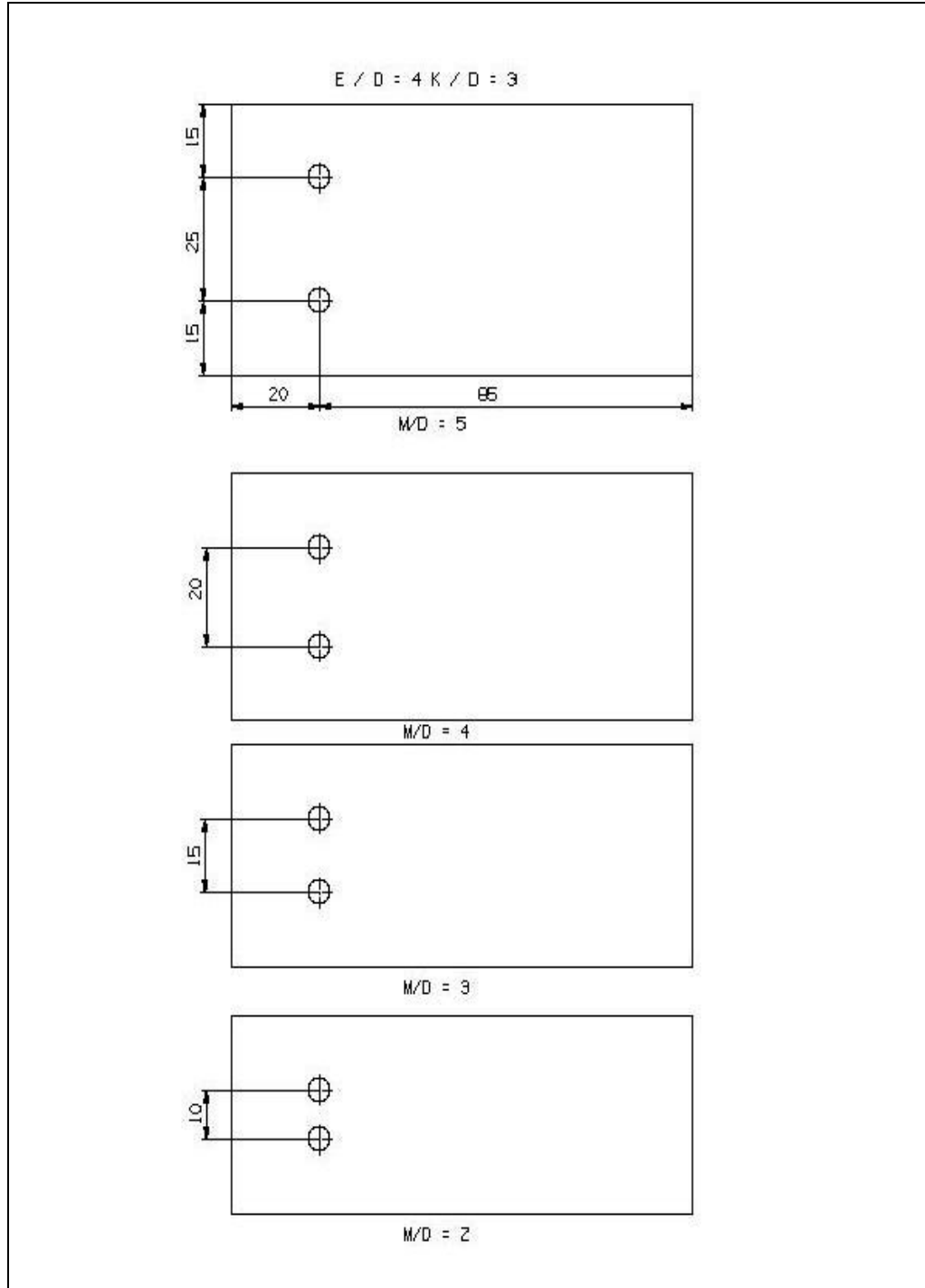
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.6. $E/D=3$, $K/D=4$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

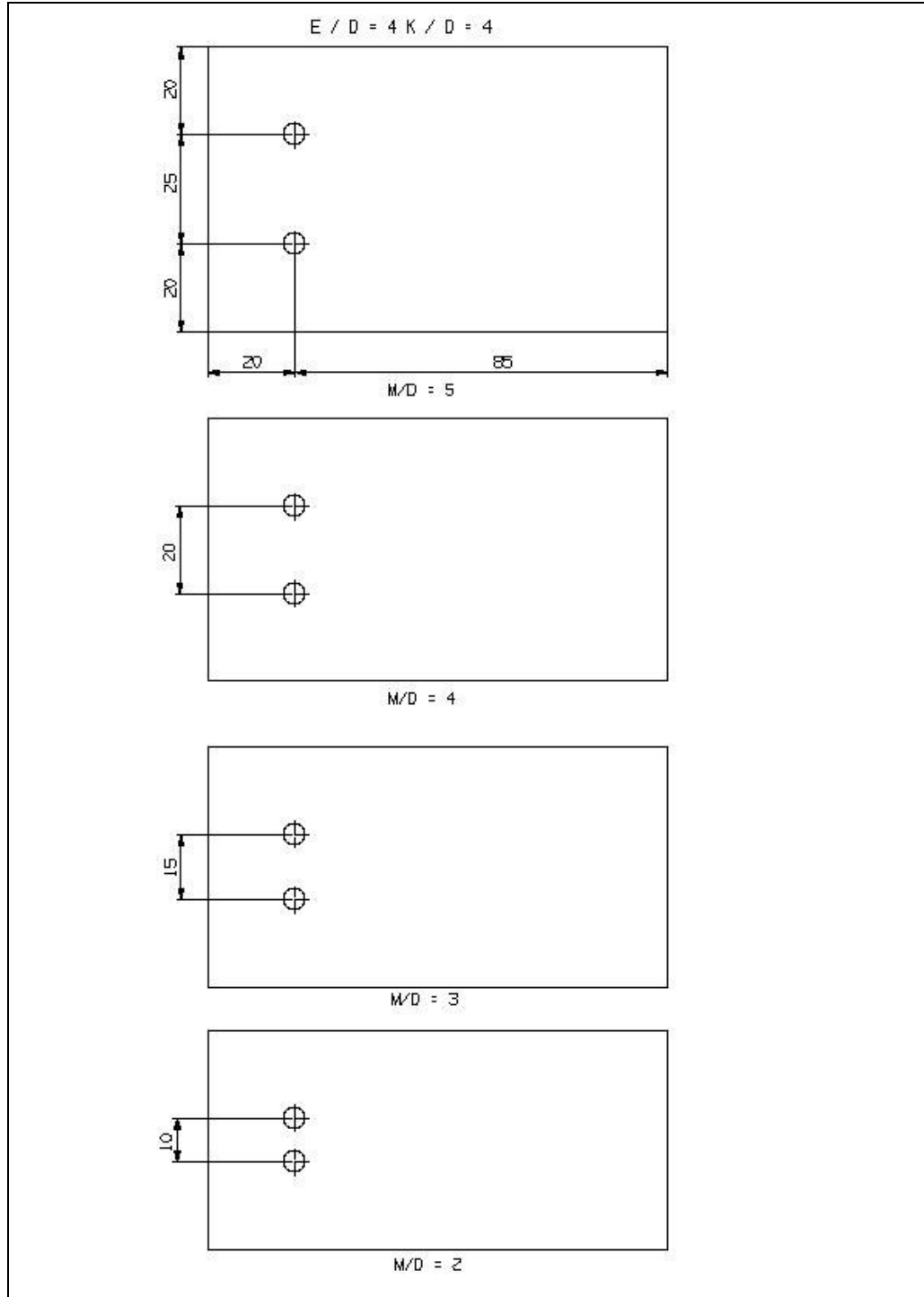
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.7. $E/D=4$, $K/D=2$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

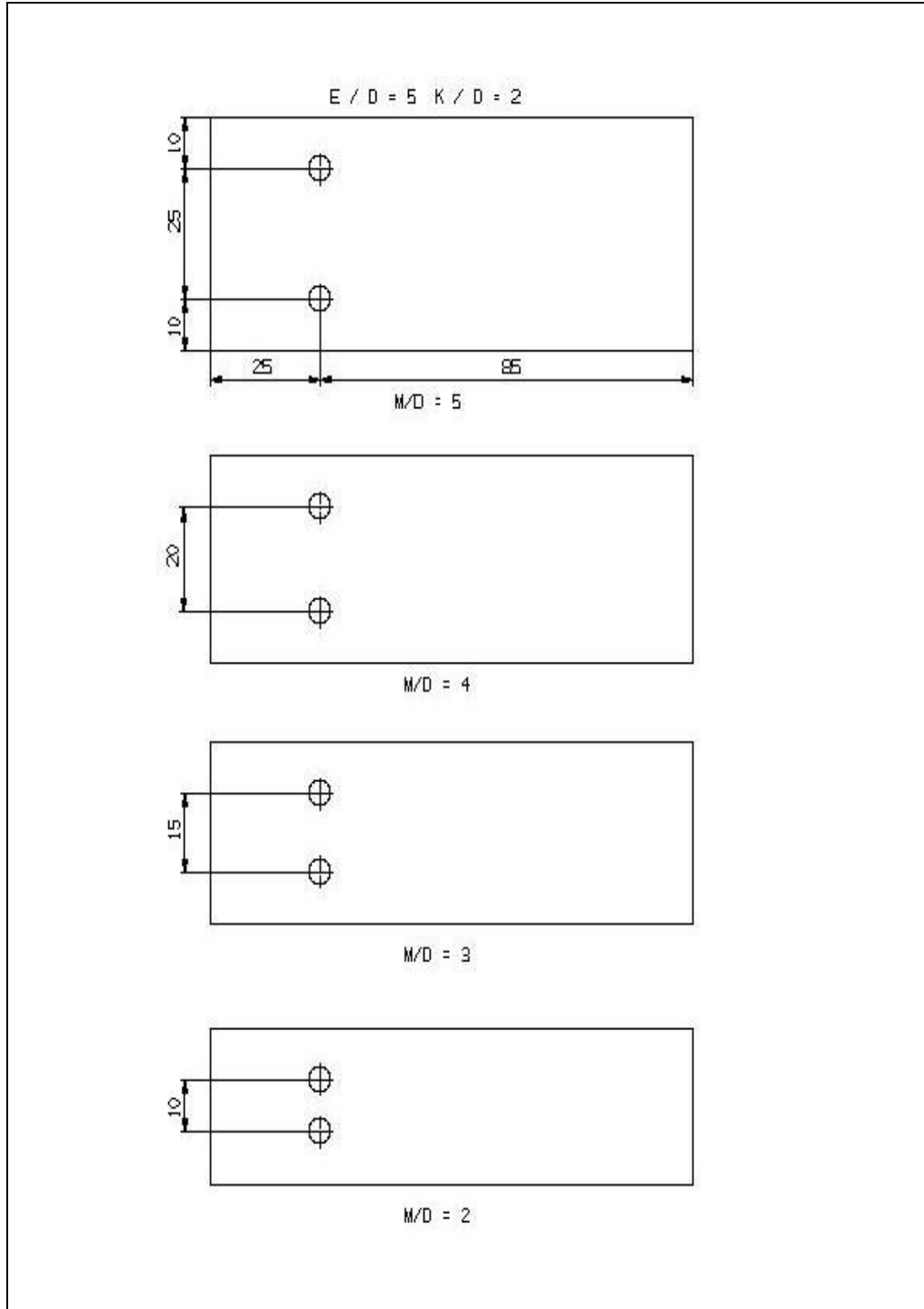
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.8. $E/D=4$, $K/D=3$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

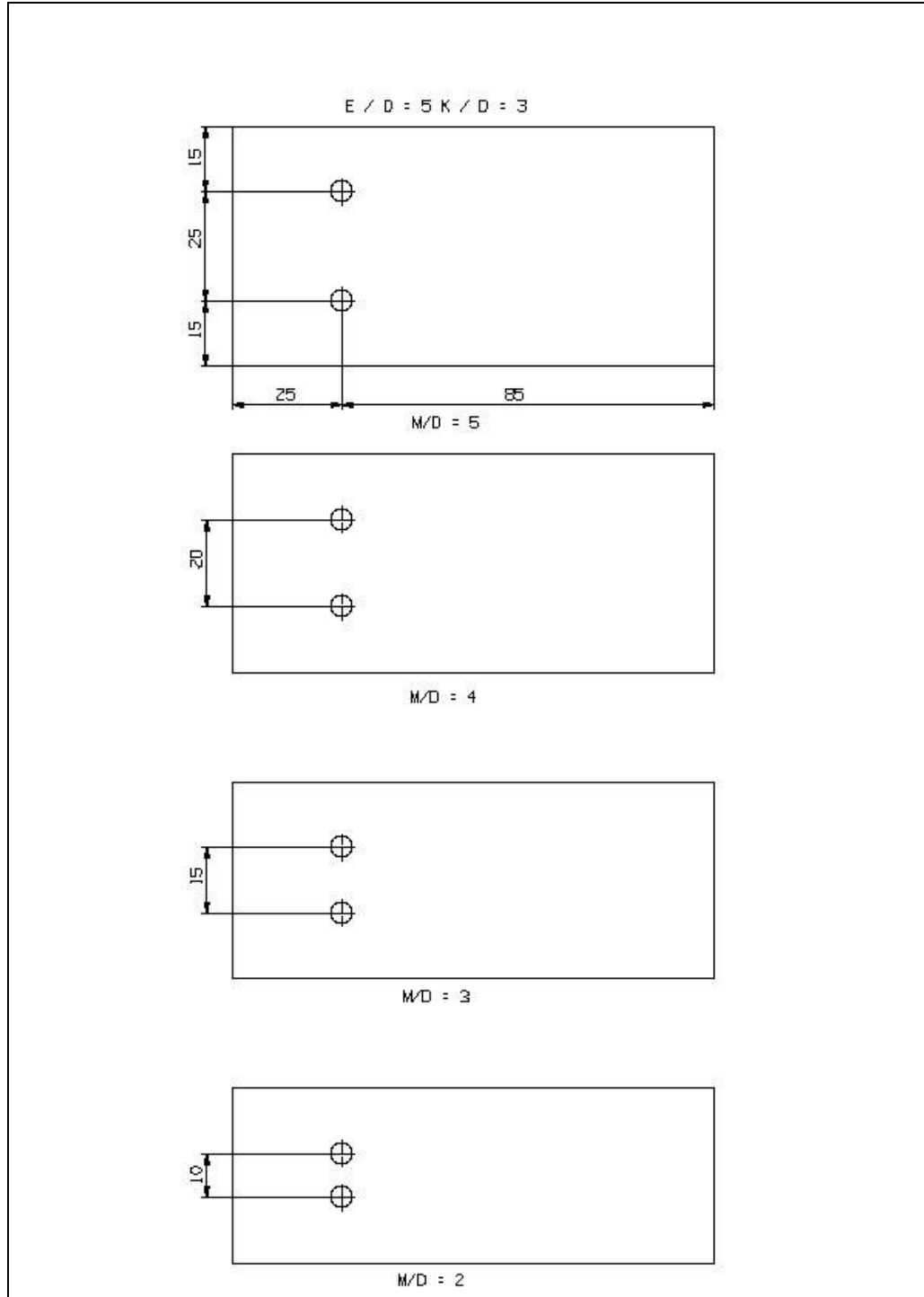
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.9. $E/D=4$, $K/D=4$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

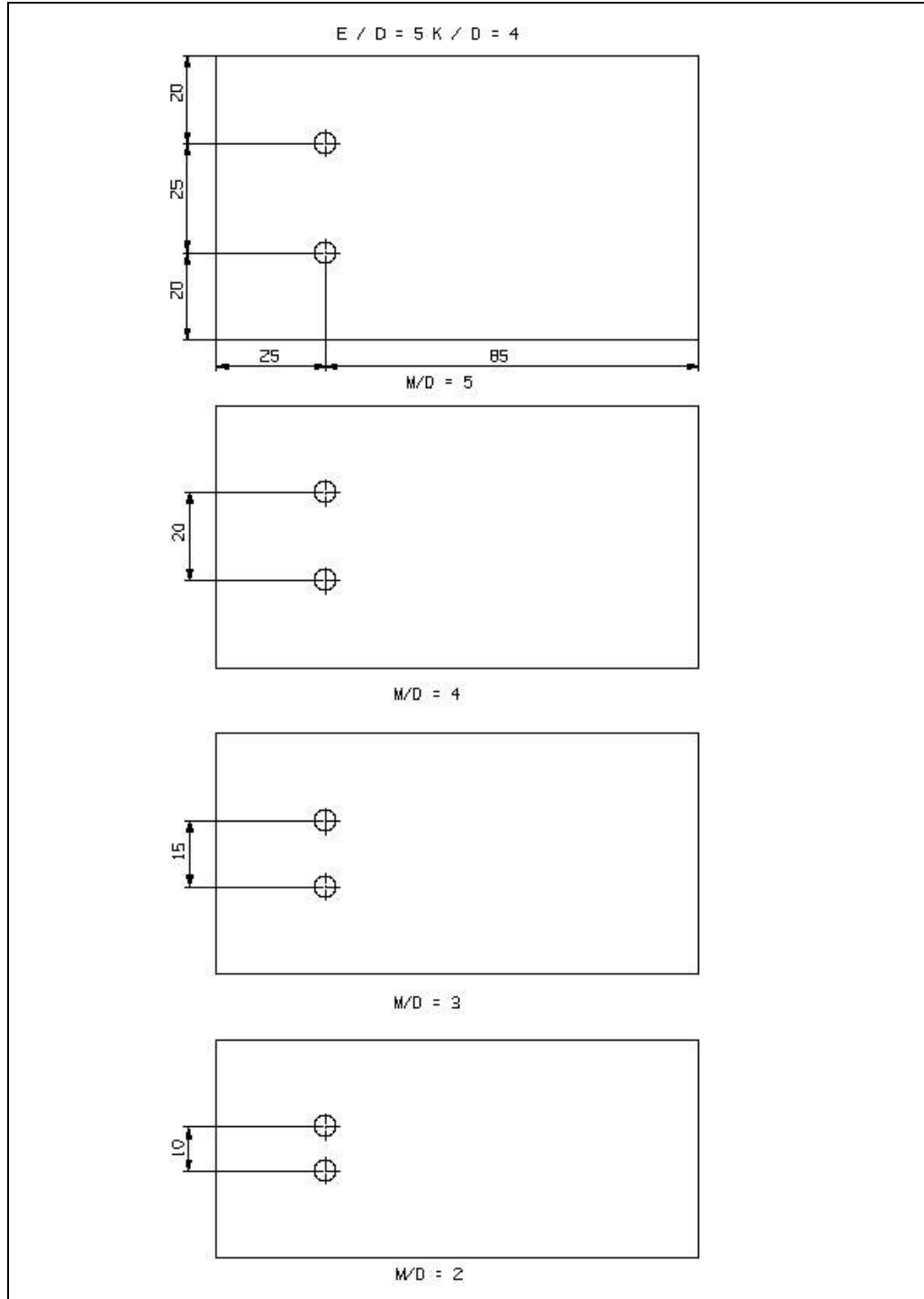
Şekil 2.10. $E/D=5$, $K/D=2$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

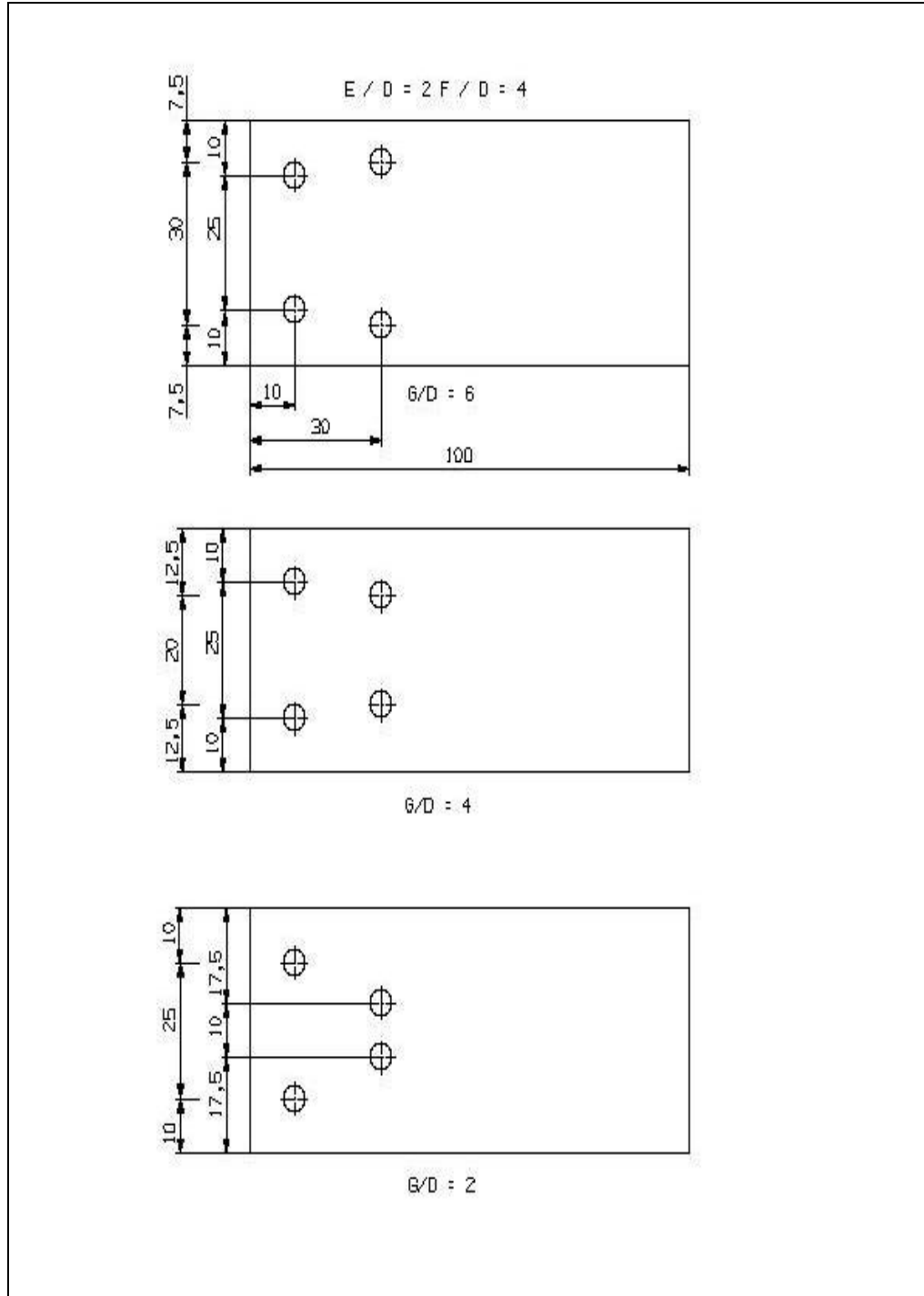


Şekil 2.11. E/D=5, K/D=3, M/D=2, 3, 4, 5 geometrilerine ait çizimler

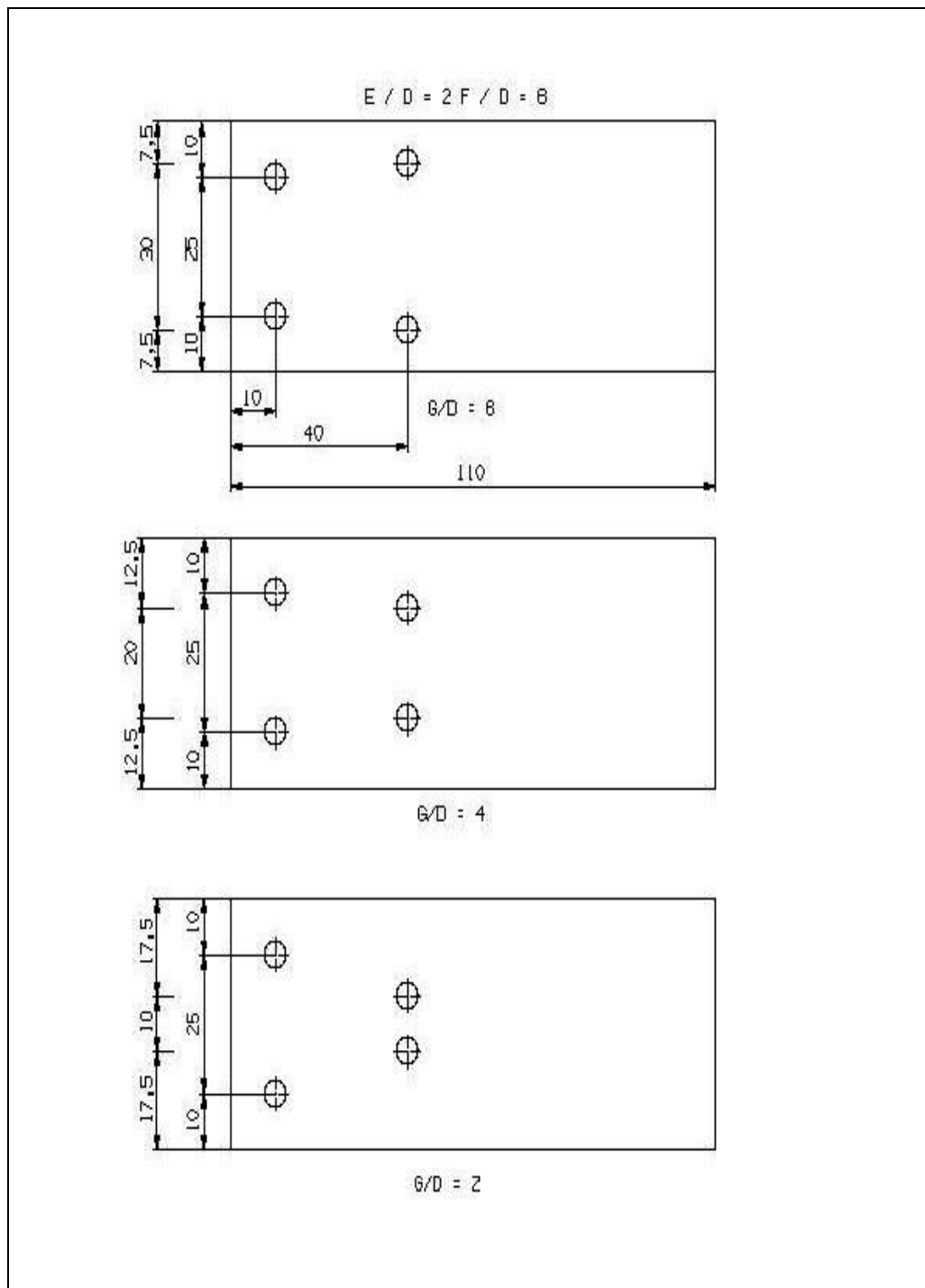
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.12. $E/D=5$, $K/D=4$, $M/D=2, 3, 4, 5$ geometrilerine ait çizimler

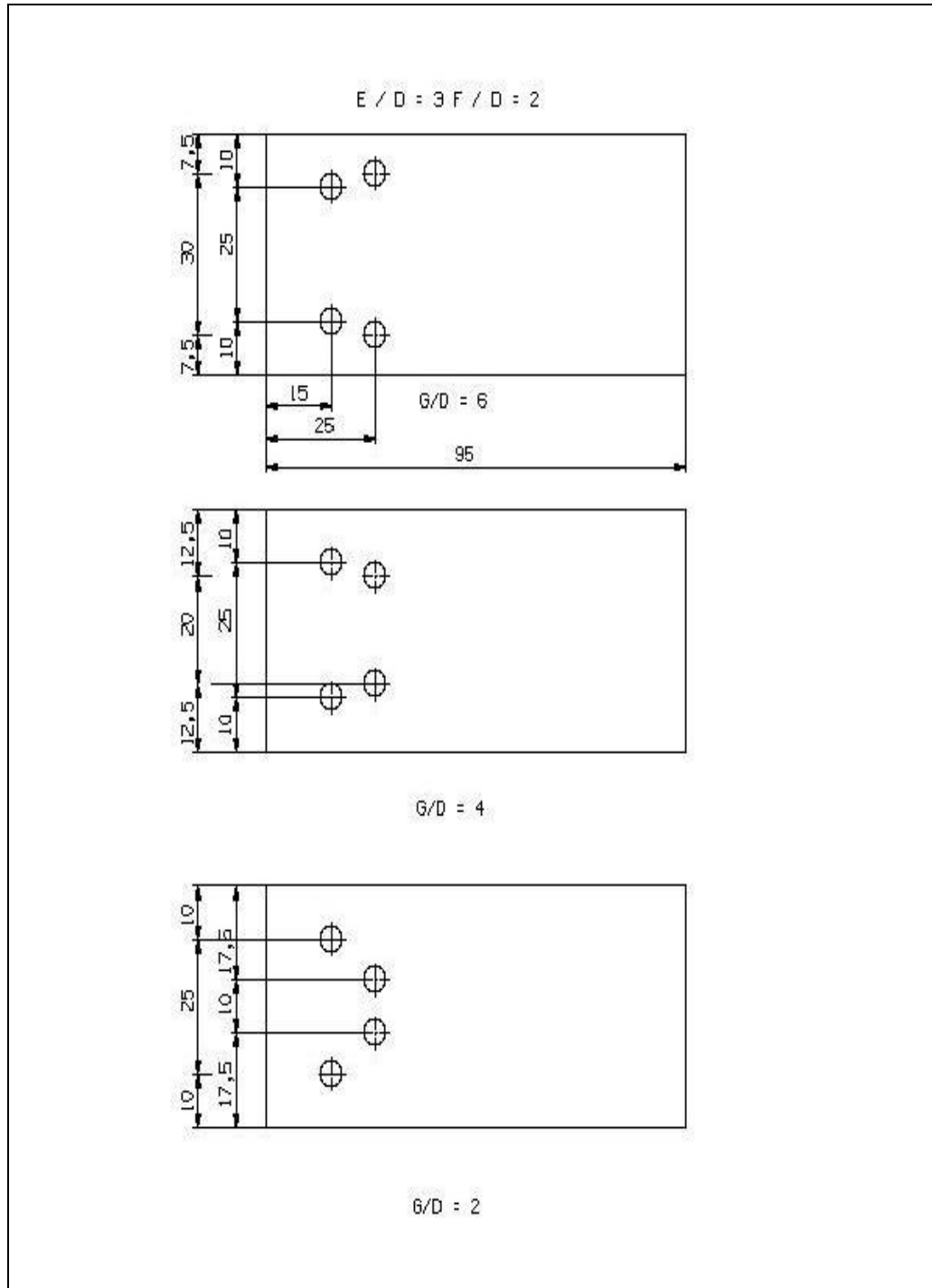
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.14. $E/D=2$, $F/D=4$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

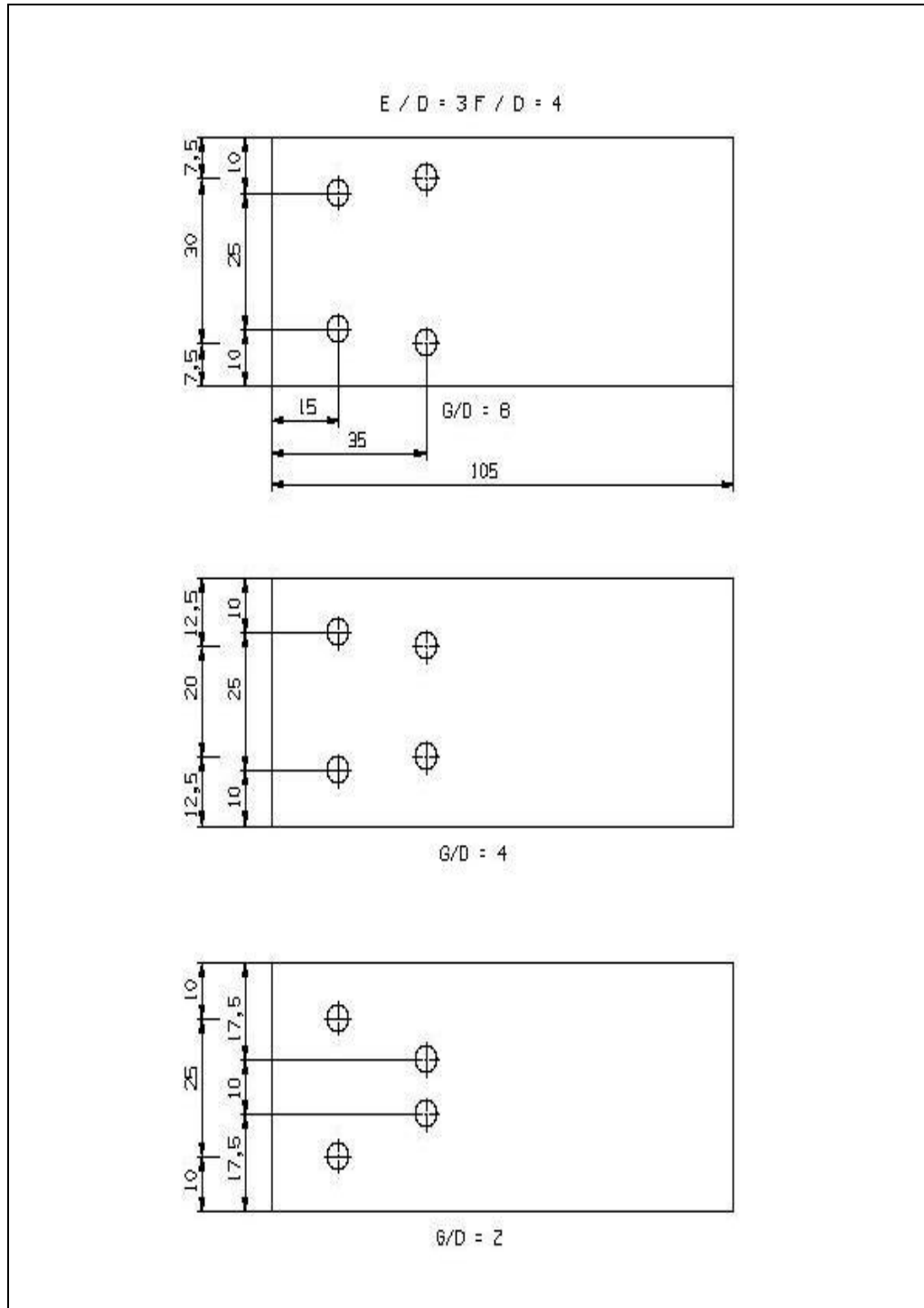
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.15. $E/D=2$, $F/D=6$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

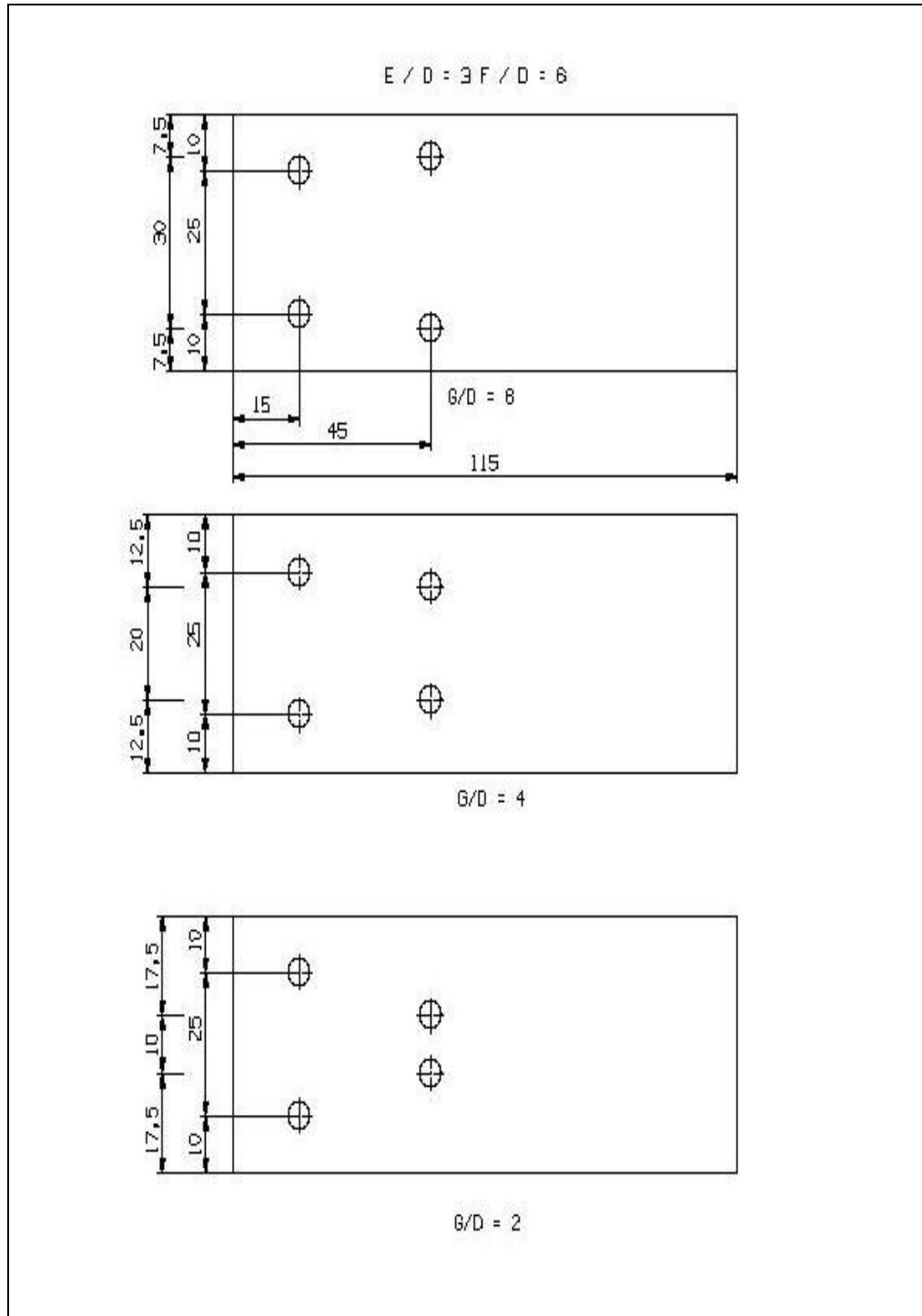
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.16. $E/D=3$, $F/D=2$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

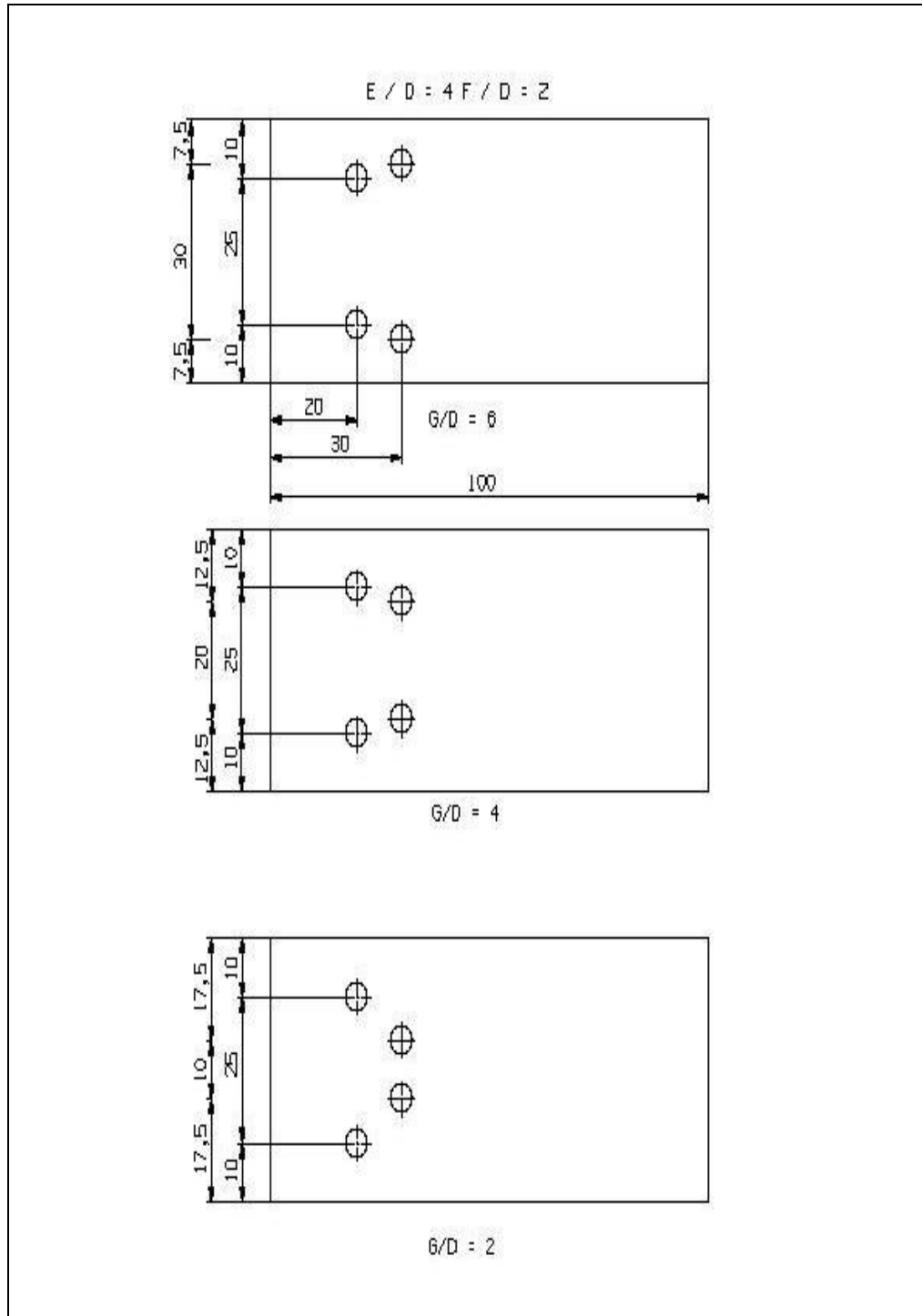
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.17. $E/D=3$, $F/D=4$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

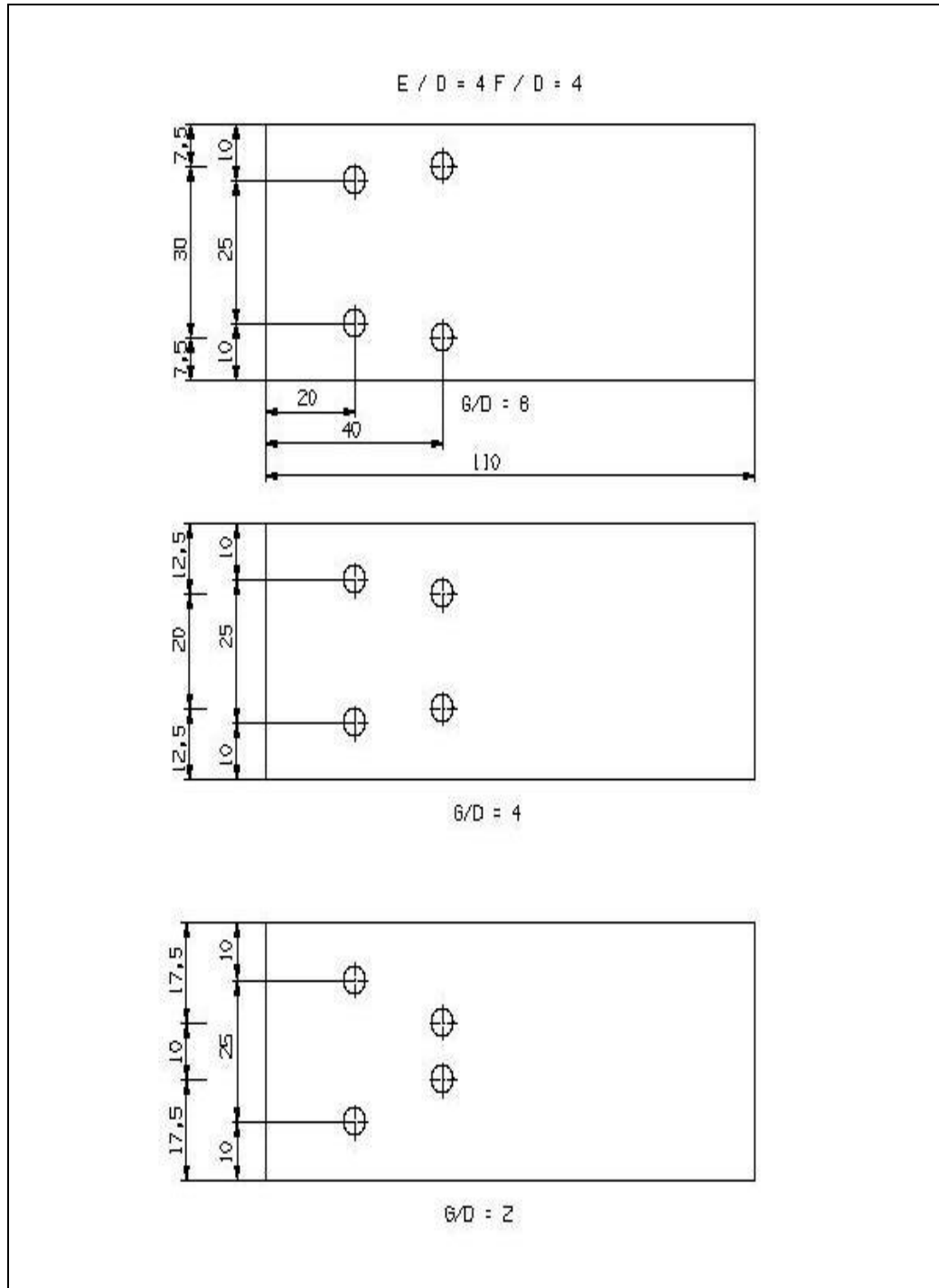
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.18. $E/D=3$, $F/D=6$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

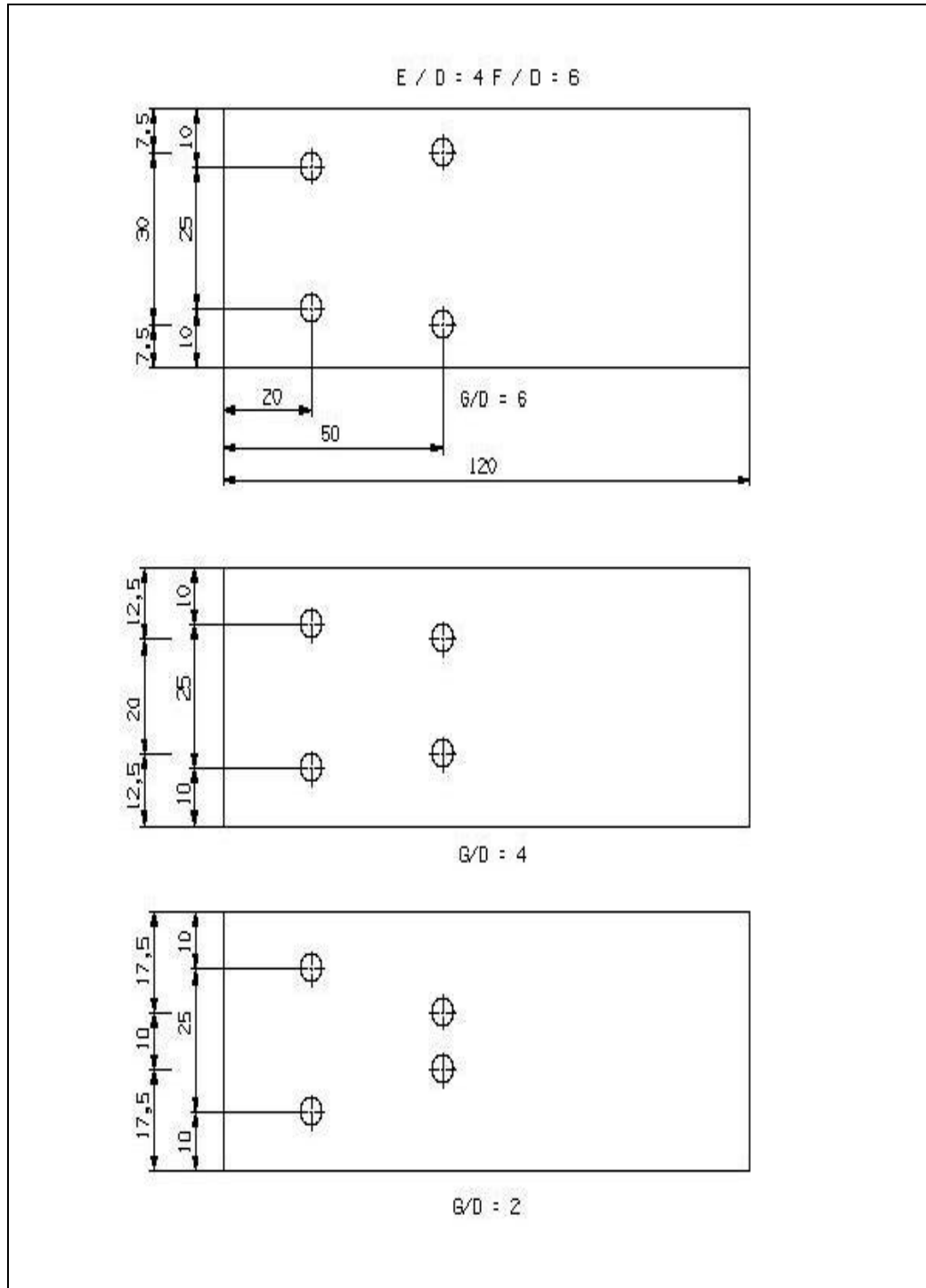
EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.19. $E/D=4$, $F/D=2$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.20. $E/D=4$, $F/D=4$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

EK-2.(Devam) Parça Geometrilerine Ait Çizimler

Şekil 2.21. $E/D=4$, $F/D=6$, $G/D=2, 4, 6$ geometrilerine ait çizimler

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YÜCEDAĞ, Sinan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 08.08.1979 İstanbul
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (228) 314 55 00
Faks : 0 (228) 314 55 20
e-mail : sinany@demirdokum.com.tr

Eğitim

<u>Derece</u>	<u>Eğitim Birimi</u>	<u>Mezuniyet tarihi</u>
Lisans	DEÜ/ Makine Mühendisliği	2003
Lise	İzmir Atatürk Lisesi	1998

İş Deneyimi

<u>Yıl</u>	<u>Yer</u>	<u>Görev</u>
2007- devam	Türk DemirDöküm Fabrikaları A.Ş.	AR-GE Mühendisi
2004-2007	Kaan Yapı Denetim Ltd. Şti.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce
Almanca