



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPIŞTIRILARAK BAĞLANTI SAĞLANAN KOMPOZİT PLAKALARIN  
BAĞLANTI PERFORMANSININ ARTTIRILMASI

BERTAN BEYLERGİL

Temmuz 2010



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPIŞTIRILARAK BAĞLANTI SAĞLANAN KOMPOZİT PLAKALARIN  
BAĞLANTI PERFORMANSININ ARTTIRILMASI

BERTAN BEYLERGİL

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU

İkinci Danışman

Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ

Temmuz 2010

**Bertan BEYLERGİL** tarafından **Yrd. Doç. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU** ve **Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ** danışmanlığında hazırlanan “**Yapıştırılarak Bağlantı Sağlanan Kompozit Plakaların Bağlantı Performansının Arttırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ, (Uşak Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU, (Niğde Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAPICI, (Mustafa Kemal Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat GÖKÇEK, (Niğde Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yahya Erkan AKANSU, (Niğde Üniversitesi)

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../200..

Doç. Dr. Nurettin ACIR

Enstitü Müdürü

## ÖZET

### YAPIŞTIRILARAK BAĞLANTI SAĞLANAN KOMPOZİT PLAKALARIN BAĞLANTI PERFORMANSININ ARTTIRILMASI

BEYLERGİL, Bertan

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU

İkinci Danışman : Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ

Temmuz 2010, 90 sayfa

Malzemeler; cıvata, perçin, kaynak, lehimleme, yapıştırma gibi değişik metotlar kullanılarak birleştirilebilmektedir. Bu metotlardan yapıştırma bağlantılarının günümüz endüstrisinde kullanımı hızla artmaktadır. Yapıştırma bağlantıları ile birleştirmelerde hafiflik sağlanmakta, farklı özelliklerdeki ve kalınlıklardaki malzemeler birleştirilebilmekte, düzgün bir gerilme dağılımı elde edilebilmekte ve daha ekonomik birleşimler meydana getirilebilmektedir. Bu avantajları nedeniyle yapıştırma bağlantıları diğer mekanik birleştirme yöntemlerine alternatif olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada, tek tesirli kompozit/ kompozit yapıştırma bağlantılarının mukavemetini iyileştirmek amacıyla Aktaş ve Polat [86] tarafından çalışılan bağlantı türleri (B ve C tipi) farklı sıcaklıklar altında deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Statik çekme deneyleri dört farklı sıcaklıkta(20, 40, 60, 80<sup>0</sup>C) gerçekleştirilmiş ve nümerik çalışmada Ansys 11.0 yazılımı kullanılmıştır. Nümerik ve deneysel çalışmalar sonucunda, B ve C tipi bağlantıların, oda sıcaklığında geleneksel A tipi bağlantı sistemlerine göre bağlantı mukavemetinde sırasıyla %80.7 ve %127'lik bir iyileştirme sağladığı ve buna ek olarak, yöntemin yüksek sıcaklıklarda da bağlantının mekanik performansını iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: tek tesirli kompozit/kompozit yapıştırma bağlantıları, cam fiberler, yüksek sıcaklık

## SUMMARY

### INCREASING JOINT PERFORMANCE OF ADHESIVELY BONDED COMPOSITE PLATES

BEYLERGIL, Bertan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Yusuf CUNEDIOGLU  
Co-Advisor : Associate Professor Dr. Alaattin AKTAS

July 2010, 90 pages

The materials can be connected by welding, soldering, using rivets, bolts or adhesives. In today's industries usage of adhesive bonding joints has been rapidly spreading. The adhesively bonded joints provide some advantages such as joining of different thickness materials, joining of different type materials, lighter constructions, more uniform stress distribution. Because of these advantages adhesive bonding joints were started to be used as an alternative to the other bonding methods. The present study investigates the effect of temperature on a new reinforced method (Type B and Type C joints) for glass fiber reinforced composites proposed by Aktas and Polat [86] experimentally and numerically. Static tensile tests are performed under four different temperatures (20, 40, 60, 80<sup>0</sup>C) and numerical analysis is carried out by using ANSYS software. The experimental and numerical results show that on comparing the average failure load of traditional type A specimens with that of type B and type C specimens at room temperature, it is found that an average strength increase of 80.7% and %127 respectively. Additionally, this study has demonstrated that this method also improves the mechanical performance of lap joints at temperatures up to 80<sup>0</sup>C.

Keywords: single lap composite joints, glass fibers, elevated temperature

## TEŞEKKÜR

Tez alıŐmamn gerekleŐtirilmesinde bana her konuda yardımcı olan, desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Do. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU' na ve ikinci danıŐmanım Sayın Do. Dr. Alaattin AKTAŞ' a, tez sÜresince laboratuvarını kullanmama izin veren Yrd. Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK'e, deneylerde bana yardımcı olan AraŐtırma Görevlisi Serkan TOROS' a, AraŐtırma Görevlisi Emre ESENER'e, Proje Asistanı Emrah UYSAL'a, en sıkıntılı zamanlarımda beni yalnız bırakmayan, destek olan annem Gülümser BEYLERGİL'e ve ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Volkan BEYLERGİL'e teŐekkürü bir borç bilirim.

Bertan BEYLERGİL

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
SUMMARY .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ.....	xiii
KISALTMA VE SİMGELER.....	xiv
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Çalışması .....	4
2.1. Yapışma Olayı ve Yapıştırıcıların Genel Özellikleri .....	19
2.1. Giriş.....	19
2.2. Yapışma.....	19
2.2.1. Adhezyon .....	19
2.2.2. Kohezyon .....	21
2.2.3. Islanabilirlik .....	22
2.3. Yapıştırıcı ile Birleştirme Şekilleri .....	24
2.4. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilmeler .....	26
2.5. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözümeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması.....	29
2.5.1. Perçin bağlantıları .....	29
2.5.2. Kaynak bağlantıları .....	29
2.5.3. Lehim bağlantıları .....	30
2.5.4. Vida ve civata ile yapılan bağlantılar.....	30
2.5.5. Sıkı geçme bağlantıları.....	31
BÖLÜM III. KOMPOZİT MALZEMELER .....	32
3.1. Tanım .....	32
3.2. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi.....	32
3.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	36
3.3.1. Elle yatırma (hand lay-up) yöntemi .....	36
3.3.2. Püskürtme ( spray-up) yöntemi .....	36
3.3.3. Elyaf sarma (filament winding) yöntemi .....	37



3.3.4. Reçine transfer kalıplama RTM / reçine enjeksiyonu yöntemi.....	37
3.3.5. Profil çekme / pultrüzyon (pultrusion) yöntemi.....	38
3.3.6. Hazır kalıplama / compression molding (SMC, BMC) yöntemi .....	38
3.3.6.1. Hazır kalıplama pestili / SMC (Sheet Moulding Composites).....	39
3.3.6.2. Hazır kalıplama hamuru / BMC (Bulk Moulding Composites).....	39
3.3.7. Vakum bonding/ vacuum bagging yöntemi .....	40
3.3.8. Otoklav / autoclave bonding Yöntemi .....	41
3.4. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	41
<b>BÖLÜM IV. DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>44</b>
4.1. Malzeme Temini .....	44
4.2. Yüzey Hazırlama .....	44
4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	45
4.4. Deneyin Yapılışı.....	46
4.5. Sonuçlar ve Tartışma.....	48
<b>BÖLÜM V. ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR HASAR ANALİZİ .....</b>	<b>53</b>
5.1. Giriş.....	53
5.2. Problemin Tanıtılması .....	53
5.3. Adhezyon Hasar Kriteri .....	55
5.4. Kohezyon Hasar Kriteri .....	56
5.5. A Tipi Bağlantıların Modellenmesi.....	56
5.5.1. Analiz tipinin tanımlanması .....	56
5.5.2. Kullanılacak eleman tiplerinin seçilmesi .....	56
5.5.3. Real constantların girilmesi.....	56
5.5.4. Malzeme özelliklerinin girilmesi .....	57
5.5.5. Modelleme.....	57
5.5.6. Lokal koordinat sisteminin oluşturulması.....	57
5.5.7. Mesh işlemi .....	58
5.5.8. Sınır şartlarının girilmesi ve yükleme .....	59
5.5.9. Çözüm .....	60
5.6. Sonuçların Okunması .....	60
5.6.1. Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler.....	61
5.6.2. Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler .....	62
5.6.3. Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler.....	63
5.6.4. Hasar indeksleri.....	63

5.7. B Tipi Bağlantıların Modellenmesi.....	64
5.7.1. Analiz tipinin tanımlanması .....	64
5.7.2. Kullanılacak eleman tiplerinin seçilmesi .....	64
5.7.3. Real constantların girilmesi.....	65
5.7.4. Malzeme özelliklerinin girilmesi .....	66
5.7.5. Modelleme.....	67
5.7.6. Lokal koordinat sisteminin oluşturulması .....	73
5.7.7. Mesh işlemi .....	73
5.7.8. Sınır şartlarının girilmesi ve yükleme .....	74
5.7.9. Çözüm .....	75
5.8. Sonuçların Okunması .....	75
5.8.1. Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler.....	76
5.8.2. Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler.....	77
5.8.3. Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler .....	78
5.8.4. Hasar indeksleri.....	79
5.9. Nümerik Doğrulama.....	80
BÖLÜM VIII. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	81
KAYNAKLAR.....	82

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Kompozit plakaların ve yapıştırıcının özellikleri.....	44
Çizelge 4.2 Bağlantı türleri için hasar yükü ve yerdeğıştirmeler .....	49
Çizelge 5.1 Kompozit plakaların, yapıştırıcı ve fiberlerin özellikleri.....	53
Çizelge 5.2 Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması .....	80

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede gerilme yığılmaları.....	3
Şekil 1.2	Tek bindirme bağlantısında yüklem hattının eksantrikliğinin eğilme momentlerine nasıl sebep olduğunun ve yüklemeye bağlı olarak yapıştırılan malzemelerin deformasyonunun bu eğilme momentlerini nasıl azalttığı şematik gösterimi.....	5
Şekil 1.3	Bindirme bağlantılarının sonlu eleman modelleri için sınır şartları .....	11
Şekil 2.1	Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler.....	20
Şekil 2.2	Islanabilirlik .....	22
Şekil 2.3	Temas açısı ile mukavemet değişimi .....	23
Şekil 2.4	Islanabilirlik testi.....	24
Şekil 2.5	Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri .....	25
Şekil 2.6	Tek tesirli bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve şekil değiştirdikten sonraki görünümü .....	25
Şekil 2.7	Yüklenmiş haldeki tek tesirli bindirme bağlantısının deforme olmuş hali ve kayma gerilmesi dağılımı .....	27
Şekil 2.8	Yüklenmiş haldeki çift tesirli bindirme bağlantısında ve yapıştırıcıda oluşan gerilmeler .....	27
Şekil 2.9	En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları .....	28
Şekil 2.10	Kaynak, perçin ve yapıştırıcı birleştirmelerinde gerilme yığılmaları .....	30
Şekil 2.11	Şeffaf ve ışığa duyarlı malzemelerden yapılmış yapıştırıcı ve mekanik birleştirmelerde gerilme dağılımı .....	31
Şekil 3.1	Kompozit malzemenin temel şekli.....	32
Şekil 3.2	Malzemelerin tarihsel gelişimi.....	34
Şekil 3.3	Püskürtme yöntemi .....	36
Şekil 3.4	Profil çekme yöntemi.....	38
Şekil 3.5	Hazır kalıplama yöntemi.....	39

Şekil 3.8	Vakum bagging yöntemi .....	40
Şekil 4.1	Cam elyaf takviyeli yapıştırma bağlantı sistemi .....	45
Şekil 4.2	(a) B tipi bindirme bağlantısı (b) C tipi bindirme bağlantısı.....	46
Şekil 4.3	A, B ve C tipi bağlantı sistemleri için yük-yerdeğiştirme eğrileri .....	48
Şekil 4.4	A, B ve C tipi bağlantı sistemleri için yük-yerdeğiştirme eğrilerinin sıcaklıkla değişimi .....	50
Şekil 4.5	A, B ve C tipi bağlantı sistemleri için ortalama kayma gerilmesinin sıcaklıkla değişimi.....	51
Şekil 5.1	Problemin tanıtılması (a) A tipi bağlantı sistemleri (b) B tipi bağlantı sistemleri.....	54
Şekil 5.2	Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarında karşılaşılan hasar türleri.....	55
Şekil 5.3	A tipi yapıştırma sistemi modeli .....	58
Şekil 5.4	Eleman tiplerinin ve malzeme özelliklerinin atanması .....	58
Şekil 5.5	Mesh işlemi .....	59
Şekil 5.6	Çözüm işlemi .....	60
Şekil 5.7	Sonuçların okunması.....	60
Şekil 5.8	Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler .....	61
Şekil 5.9	Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler.....	62
Şekil 5.10	Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler.....	63
Şekil 5.11	Hasar indeksleri.....	63
Şekil 5.12	Analiz tipinin tanımlanması .....	64
Şekil 5.13	Eleman tiplerinin seçimi .....	65
Şekil 5.14	Real constantların girilmesi .....	65
Şekil 5.15	Kompozit malzemenin özelliklerinin girilmesi.....	66
Şekil 5.16	Fiberlerin özelliklerinin girilmesi .....	67
Şekil 5.17	Yapıştırıcının özelliklerinin girilmesi .....	67
Şekil 5.18	Bağlantının modellenmiş hali .....	68

Şekil 5.19	Alt yapışan kompozit levhayı oluşturma işlemi.....	68
Şekil 5.20	Alt yapışan kompozit levhada daireleri oluşturma işlemi.....	69
Şekil 5.21	Alt yapışan bindirme bölgesinde delikleri oluşturma işlemi .....	69
Şekil 5.22	Alt yapışan bindirme bölgesindeki deliklerin etrafında yapıştırıcı bileşenlerinin oluşturulması .....	70
Şekil 5.23	Keypointlerin oluşturulması.....	70
Şekil 5.24	Pimlerin alt yüzey alanlarının oluşturulması .....	71
Şekil 5.25	Çizgilerin oluşturulması .....	71
Şekil 5.26	Pim ve çevresindeki yapıştırıcının oluşturulması .....	72
Şekil 5.27	Alt yapışan, fiber ve çevresindeki yapıştırıcı.....	72
Şekil 5.28	Model .....	73
Şekil 5.29	Mesh işleminin bitmiş hali.....	74
Şekil 5.30	Çözüm işlemi .....	75
Şekil 5.31	Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler .....	76
Şekil 5.32	Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler.....	77
Şekil 5.33	Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler.....	78
Şekil 5.34	Hasar indeksleri.....	79

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1 Elyaf sarma makinesi.....	37
Fotoğraf 3.2 Otoklav makinesi.....	41
Fotoğraf 4.1 Cam fiberler.....	46
Fotoğraf 4.2 Düz yapıştırırmalı (A tipi) ve cam elyaf takviyeli yapıştırma sistemleri (B ve C tipi) .....	47
Fotoğraf 4.3 Deney düzeneği .....	47
Fotoğraf 4.4 B tipi bağlantılarda oluşan hasarlar .....	51
Fotoğraf 4.5 C tipi bağlantılarda oluşan hasarlar .....	52

## KISALTMA VE SİMGELER

$\psi_{LS}$	sıvı-katı temas yüzey enerjisi
$\psi_{LV}$	sıvı-gaz temas yüzey enerjisi
$\psi_{SV}$	katı-gaz temas yüzey enerjisi
$\theta$	temas açısı
$\sigma$	normal gerilme
$\tau$	kayma gerilmesi
P	yük
$b$	bağlantı genişliği
$l$	bağlantı uzunluğu
c	basma
t	çekme
S	Kayma mukavemet değeri
X	X yönünde izin verilen mukavemet değeri
Y	Y yönünde izin verilen mukavemet değeri
Z	Z yönünde izin verilen mukavemet değeri



# BÖLÜM I

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Günümüzde düşük özgül ağırlığa karşılık yüksek mukavemet ve korozyona dayanıklılığı, iyi şekillenebilme özelliği ve yorulmaya karşı iyi dayanımı nedeniyle kompozit malzemeler metal malzemelere nazaran daha fazla tercih edilmektedir. Fiber takviyeli kompozitler uçaklarda, uzay araçlarında, otomobillerde, spor malzemelerinde, mimari tasarımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fiber takviyeli kompozitle bağlanan yapılar birbirleriyle veya metallerle birleşimleri pim bağlantıları ile yapılmaktadır. Bağlantı yüke maruz kaldığında pim bağlantı noktaları gerilme yığılmaları nedeniyle büyük problemler oluşturmaktadır. Bunun için tasarımcılar bağlantı noktalarının yüke az maruz kalmasına özen gösterirler. Tabii ki bu her zaman mümkün olmayabilir. Bütün pim bağlantı noktaları zayıf nokta olduğundan yapı mukavemeti pim bağlantısının mukavemetine bağlıdır. Bunun için bu bağlantıların tasarımı iyi bir şekilde yapılmalıdır. Pimli bağlantılar özel yüzey işlemlerine gerek kalmadan hasarsız olarak kolayca çözülebilir. Fakat deliklerde gerilme yığılmaları oldukça fazladır. Hasar muayenesi kolaydır. Muayene kolay değildir. Bağlantı yapılırken yüzeyi hazırlamak oldukça güçtür. Ayrıca çevre şartlarından etkilenirler.

Yapıştırıcı (adhesive) ASTM tarafından yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen malzeme olarak tanımlanmıştır [1]. Yapıştırıcı ile birleştirme (adhesive bonding) son yıllarda kendisini birçok uygulamada perçin, kaynak ve mekanik bağlama gibi alışılmış metotlara tamamlayıcı olabileceğini veya yerine kullanılabileceğini göstermiş olan malzemeleri birleştirme tekniğidir. Uçak konstrüksiyonlarında ve ahşap yapılarda yapıştırılmış elemanların dayanımı ve gerilme değişimlerine olan etkileri yıllardır araştırılmaktadır. Yapıştırıcı kullanımı makine imalat sanayinde de artmaktadır. Yapıştırıcılar cıvata bağlantılarının ve mil göbek bağlantılarının emniyete alınması, rulmanlı yatakların montaj işlemlerinde, akış borularının sızdırmazlık işlemlerinde, motor bloğu-kapak sızdırmazlıklarının sağlanmasında sıvı conta olarak döküm parçalarının yapıştırılmasında, boşlukların doldurulmasında ve değişik tamirat işlemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Buna rağmen cıvata, kaynak ve perçin hala

otomotiv sanayinde, deniz araçlarında ve metallerin birleştirilmesini gerektiren birçok kitle üretim ürünlerinde önde gelmektedir [2]. Bununla birlikte yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analizi yoğun teknik bir çalışma alanına sahiptir. Çalışmalardaki temel amaç bağlantılar tarafından taşınan yükün şiddetinin tespit edilmesidir. Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılar, dayanıklı yapısal yapıştırıcıların son zamanlardaki gelişmelerine bağlı olarak bu bağlantıların mukavemetindeki tatmin edici iyileşme ile havacılık, uzay, otomobil, yarı iletken gibi sanayinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik olarak birleştiren bağlantılar ile karşılaştırıldıklarında yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılar daha az gerilme yığılması kaynağı, daha üniform yük dağılımı, daha fazla tasarım esnekliği ve imalat kolaylığı, hafiflik, sızdırmazlık, korozyon direnci, ısı ve ses yalıtımı, sönümlenme ve daha mükemmel yorulma özelliklerine sahiptirler.

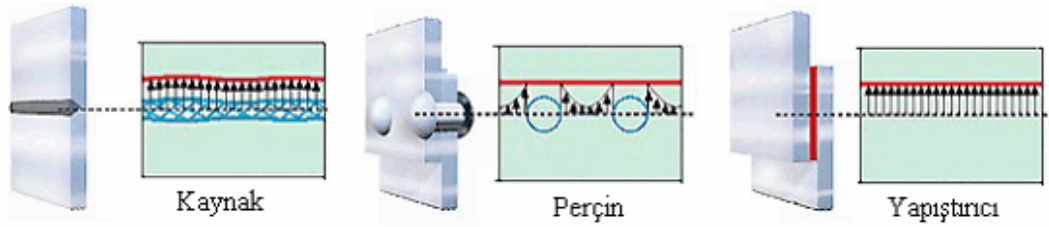
Kırılan ve kopan malzemeleri tekrar kullanabilmek için, mekanik birleştirme yöntemleri kullanılabilir. Ancak yapıştırıcılarla yapılan birleştirme daha kolay ve daha uzun ömürlüdür. Bu tip birleştirmelerde parçalar eski mukavemetine gelmese bile yine de uzun süre kullanılabilir. Yapıştırıcılarla sadece kırılan ve kopan malzemeler değil, endüstride yeni kullanıma sunulacak birçok malzemeyi daha kolay ve kısa sürede birleştirmek mümkündür.

Günümüz dünyasında sistemlerin enerji tüketimini azaltmak için birçok sebep vardır. Yakıtta tasarrufa gitmenin başlıca yollarından bir tanesi sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı sistemleri daha hafif hale getirmiştir. Alternatif bir birleştirme ve onarım metodu olan yapıştırıcıların diğer metotlara göre bir takım avantaj ve dezavantajları vardır. Avantajları,

- Metaller ve polimerler gibi farklı malzemeler birleştirilebilir.
- Şekil. 1.1'de görüldüğü gibi düzgün gerilme dağılımı elde edilir.
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir,
- İnce metal parçalarını etkili bir şekilde birleştirebilir.
- Bağlantılara çok iyi dinamik-yorulma direnci sağlar.
- Maliyet yönünden etkili ve uygun bir tekniktir.

- Farklı ve karmaşık geometri şekilleri birleştirebilir.
- Daha pürüzsüz aerodinamik yüzeyler elde edilir.
- Korozyon direnci geliştirilebilir.
- Ağırlığı azaltır.
- Titreşimi sönümler.

Yapıştırıcılar, yüzeylere sürülüp katılaştırıldığında parçaları birbirine bağlama özelliğine sahiptir. Yapıştırıcılar birkaç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar, iki bileşenli sıvı yapıştırıcılar ve film yapıştırıcılar, fiziksel hallerine göre sınıflandırmayı; metal-metal yapıştırıcılar, kağıt yapıştırıcılar ve ahşap yapıştırıcılar, esas malzemeye göre sınıflandırmayı göstermektedir. Epoksi yapıştırıcılar, siyanoakrilit yapıştırıcılar ve polikloropen yapıştırıcılar da kimyasal formlarına göre sınıflandırmaya birkaç örnektir. Yapıştırma şartlarına göre sınıflandırmaya ise çözücü ile katılan yapıştırıcılar, soğuk katılan yapıştırıcılar ve erimiş durumda uygulanan ve soğuyup sertleştiğinde yapışma sağlayan (hot-melt) yapıştırıcılar örnek gösterilebilir [3].



Şekil 1.1 Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede gerilme yığılımları [4].

Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde yaşanan zorluklar, bu teknolojinin benimsenmesinde güçlüklerle karşılaşılmasına sebep olmaktadır. Bir yapıştırma bağlantısında karmaşık gerilmelerin analizi ve yapısal tasarımında yapıştırıcı tabakasının iki temel özelliğinden dolayı zorlukla karşılaşılır.

- Polimerik yapıştırıcının visko-elastoplastik davranışının bir yansıması olan gerilme şekil değiştirme davranışındaki non-lineerlik
- Yapıştırıcı tabakasındaki üç boyutlu gerilme durumu

Yapısal yapıştırıcıların doğru olarak tespit edilmiş mekanik özelliklerinin bilinmesine, yapıştırma bağlantısının tasarımında hasar kriterlerini belirlemek ve yüklü bağlantıdaki

gerilme dağılımlarını hesaplayabilmek için ihtiyaç duyulur. Böyle özellikler bulk numuneler ve plastikler için geliştirilmiş standart deney yöntemleri veya yapıştırıcı tabakasında üniform ve tek eksenli gerilme durumunu temin edecek önlemler almak şartıyla yapıştırma bağlantıları kullanılarak belirlenir.

Genel olarak yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların mukavemeti; birleşen parçaların büyüklüğüne, kalınlığına, geometrisine, elastik modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma uzunluğuna, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine, yapışma işlemine ve yapıştırıcı birleştirmeli bağlantının maruz kalacağı şartlara bağlıdır.

## 1.2 Literatür Çalışması

Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların gerilme analizi karmaşıktır ve 60 yılı aşkın bir süredir analitik, nümerik ve deneysel olarak çalışılmaktadır. Genellikle yapılan çalışmalarda yapıştırıcı lineer elastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Ancak son yapılan çalışmalarda yapıştırıcının elasto-plastik özellikleri de dikkate alınmıştır. Bu bölümün amacı mevcut çalışmaların genel bir incelemesini sunmaktır [99].

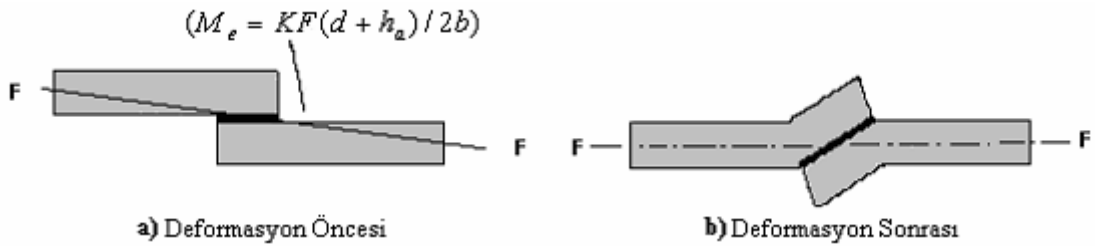
Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analitik analizinin ilk girişimleri Volkersen [5] tarafından 1938 yılında yapılmıştır. Volkersen çalışmasında, tek bindirme bağlantısında yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımını, yapıştırılan iki malzemenin çok direngen olduğunu ve çekme yükü altında deforme olduğunu, yüklemeye dolaylı eğilmediğini kabul ederek analiz yapmıştır. Ayrıca, yapıştırıcının lineer elastik bir katı olduğu ve yalnızca kayma gerilmelerinden dolayı deforme olduğunu kabul etmiştir. Volkersen, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmelerinin bindirme hattının her iki ucunda en yüksek değeri aldığını göstermiştir.

Goland ve Reissner [6] tarafından geliştirilen klasik yapıştırma modelinde ise genel olarak yapıştırıcının gerilme analizi çalışılmıştır. Goland ve Reissner Şekil 1.2'de gösterildiği gibi bağlantının eksantrik yüklenmesinin neticesinde yapıştırıcı tabakasında oluşan çekme gerilmelerini dikkate alarak tek bindirme bağlantısını çalışmışlardır. Bu teoride, yapıştırıcı kalınlığı boyunca kayma ve soyulma gerilmesi sabit kabul edilmiş boyca deformasyon ve yapıştırıcının poisson oranı ihmal edilmiştir. Goland ve Reissner de yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemelerin lineer elastik bir malzeme gibi

davrandıklarını kabul etmişler ve bir eğilme moment faktörü  $\kappa$  tarif ederek aşağıdaki iki farklı durumu göz önüne almışlardır:

- Yapıştırıcı tabakası oldukça incedir ve deformasyonu çok küçük öneme sahip olacak kadar yapıştırılan malzemelerin direngenliğine denk bir direngenliğe sahiptir. Ayrıca çekme kuvveti yapıştırılan malzemelerin dik kesitlerinde düzenli bir şekilde dağılmıştır.
- Yapıştırıcı tabakası incedir ve deformasyonu bağlantı da gerilme dağılımına önemli miktarda bir katkı da bulunur. Yapıştırılan malzemeler silindirik plakalar olarak davranabilir ve yapıştırıcı ise iki yapıştırılan malzeme arasına yerleştirilmiş sonsuz küçük bir çekme/basma yaylar sistemi olarak kabul edilebilir.

Birinci durum, ağaç ve plastik malzemelerin yapıştırılmasında pratikte öneme sahip iken, ikinci durum yapıştırılan metal malzemelerin analizinde oldukça önemlidir. Goland ve Reissner son diferansiyel denklemlerini düzlem şekil değiştirme kabulü ile çözerek uygulanan yükten dolayı bağlantı uçlarındaki yükü ve bağlantıdaki gerilmeleri tespit etmişlerdir. Ayrıca plakaların eğilmesinden dolayı bağlanmış elemanların çökmesinin etkisiyle tek bindirme bağlantısının yapıştırılan malzemelerin soyulmasına sebep olan normal gerilmeleri de göz önüne almışlardır.



Şekil 1.2 Tek bindirme bağlantısında yüklem hattı eksantrikliğinin eğilme momentlerine nasıl sebep olduğunu ve yüklemeye bağlı olarak yapıştırılan malzemelerin deformasyonunun bu eğilme momentlerini nasıl azalttığını şematik gösterimi [6].

Goland ve Reissner'in teorisindeki temel sınırlamalar Benson [7] tarafından gösterilmiştir. Benson, teorisin eğilme moment faktörünün türetilmesinde bindirme bölgesinin dönmesine müsaade ettiğini ancak bu dönme olayının olmadığını kabul ederek bağlantıdaki iç gerilmeleri türettiğini ve bunun düşük yükler için mümkün

olmadığını göstermiştir. Benson'un çözümü bu bakımdan yapıştırıcı kayma ve çekme gerilmelerini tamamen doğru olarak vermektedir.

Demarkless [8] ve Sazhin [9], Golan ve Reissner'in teorisini ve Volkersen teorisini kullanarak benzer çalışmalar sunmuşlar. Segerlind [10] ise bir çift bindirme bağlantısında kayma gerilmelerinde bağlantı boyunun etkisini tespit ederek optimum bir bağlantı tasarımının mevcut olduğunu ortaya koymuştur.

Hart-Smith [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada bu teori biraz daha geliştirilmiş Ojalvo ve Idinoff [12] ve Carpenter [13], yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilme değişimlerini araştırmak için yapıştırıcılarda 2-boyutlu gerilme durumunu göz önüne aldıkları çalışmalarında kalınlık boyunca kayma gerilmesinin lineer değişken, soyulma gerilmesinin ise sabit olduğunu ortaya çıkararak Golan ve Reissner'in teorisini geliştirmişlerdir. Oplinger [14], bindirme kısmının yüksek yer değiştirmelerine müsaade ederek bu teoriyi daha da geliştirmiştir.

Kline [15] yapıştırıcı ile birleştirmede gerilme dağılımı üzerine yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemiştir. Kalınlık boyunca gerilmelerin değişimini lineer kabul ederek, kalınlık etkisini de içeren yapıştırıcı tabakasındaki değişken bağlantı parametrelerinin etkisini araştırmıştır.

Daha önce yapılan klasik çalışmalar kayma ve normal gerilmelerin bindirme bölgesinin orta kısımları boyunca sabit uçlarında ise maksimum değere sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, daha sonraki çalışmalarda yapıştırıcı tabakasının uçlarındaki yüksek gerilmeler büyük önem kazanmış ve bu olay genellikle uç etkileri olarak anılmıştır. İlk olarak, birbirine sürekli bir yapıştırıcı tabakası boyunca bağlanmış, düzlem içi yüklemeye maruz, farklı kalınlık ve malzeme özelliklerine sahip iki ince plaka arasındaki yük iletiminin incelendiği Muki ve Sternberg [16] çalışmasını temel alan Erdoğan [17], malzemelerden birinin balta ucu şekline sahip olduğu ve diğerinin bunu çevrelediği ortamdaki gerilmelerin tespiti için bir metod sunmuştur. Birbirine bağlanan iki plakanın yine bir elastik plaka ile tabandan desteklenmesi halinde, yapıştırıcı tabakası üçüncü bir ortam olarak göz önüne alınmazsa, iki plaka arasındaki yük iletiminin yalnızca yapışma alanının sınırları boyunca ortaya çıktığını ve problemin daha gerçekçi çözümünün ise, yapıştırıcı tabakasının temel olarak iki plaka arasında bir

kayma yayı gibi davranan üçüncü bir ortam olarak göz önüne alınması halinde elde edilebileceğini göstermiştir. Daha sonra, Erdoğan ve Ratwani [18] kademeli bindirme bağlantılarında yapıştırılan plakalardaki gerilme dağılımını tespit etmek için problemi genelleştirilmiş bir düzlem gerilme hali olarak kabul ederek Erdoğan'ın yaklaşımını kullanmışlardır. Bu yaklaşım ile birkaç plaka geometrisi ve malzeme kombinasyonu için analizi tekrarlamış ve kademeli yapışma alanlarındaki uç etkilerini, her bir birleşim için çalışmışlardır. Sonuç olarak;

- Bir alüminyum/çelik bağlantısı için maksimum kayma gerilmesinin bağlantının iki ucunda oluştuğunu ve yapıştırıcı kalınlığı azaltıldığında bu gerilmelerin arttığını,
- Bir alüminyum/boron epoksi bağlantısı için boron epoksinin fiberler doğrultusunda çelikte yaklaşık aynı çekme modülüne sahip olması nedeniyle, ortotropik özelliklerin güçlü bir etkiye sahip olmadığını aynı yapıştırıcı kalınlığı için alüminyum neticelerine benzer bir gerilme dağılımının oluştuğunu,
- Yapıştırılan malzemelerin hafifçe eğilendirildiği bağlantılar için kayma gerilmesi dağılımının en düşük bir değere doğru monoton bir şekilde azalan en yüksek bir değere sahip olduğunu,
- Yük iletimi mekanizmasının kayma ve çekmenin bir bileşimi olması halinde yapıştırıcıdaki meydana gelen yüksek gerilmelerin değerinin azalacağını ve yapıştırılan malzemedeki en yüksek gerilmelerin bir bindirme bağlantısındakinden daha düşük olduğunu, en yüksek gerilmenin ise daha direngen olan malzemede oluşacağını gösterdiler.

Ayrıca Wah [19] anizotropik malzemelerin yapıştırıcı ile bağlandığı bir bindirme bağlantısındaki gerilme dağılımını, bağlantıyı düzlem şekil değiştirme hali kabulü yapılabilecek kadar geniş alarak analiz etmiş ve yapıştırılan malzemelerdeki eğilme momentlerinin yapıştırıcı tabakasının mevcut olmadığı uç bölgelerinde en yüksek değere ulaştığını göstermiştir.

Chang ve Muki [20] yapıştırıcı kullanılan bir bindirme bağlantısının modellenmesinde çekme yükünün statik olarak iletilmesi ile Muki ve Stenberg'in çalışmasını göz önüne alarak uğraşmış ve yapıştırıcı tabakasında ortaya çıkan normal ve kayma gerilmeleri ve yapıştırıcı tabakasının uçlarındaki gerilme yoğunluğu faktörleri için nümerik neticeler

sunmuştur. Ayrıca yapıştırıcı hattının uçlarında yapıştırılan malzemelerin geometrisinin etkilerinin çok önemli olduğunu göstermiştir.

Adams [21] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bindirme bağlantıları için klasik lineer çözümler tartışılmış ve sonlu elemanlar yönteminin kullanımıyla yapıştırma bağlantılarının analizinin yapılabileceği ileri sürülmüştür. Bu çalışma neticesinde yeni bir model geliştirilerek kompozit malzemeler için yeni tasarım şekilleri önerilmiştir.

Kompozit yapılar cıvata, perçin ya da yapıştırıcı kullanılarak birleştirilebilir. Bahsedilen bağlantı tiplerinin performansları tabakalı kompozit malzemelerin karakteristikleriyle etkilenmektedir. Fakat yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılar mekanik olarak birleştiren bağlantılardan çok daha etkili bir şekilde yük transferi sağlamaktadır.

Kompozitlerin yapıştırma bağlantıları üzerine Mazumdar ve Mallick [22] tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, epoksi yapıştırıcı ile birleştirilen iki kompozit malzemenin statik kopma yükü ve yorulma dayanımları araştırılmış ve kopma yükünün yapıştırıcı kalınlığı kadar bindirme uzunluğuna da bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Hart-Smith [23,24] titanyum ve karbon fiber takviyeli plastikler kullanarak yapıştırıcı/cıvata ile birleştirilmiş bindirme bağlantılarının teorik bir çalışmasına öncülük etmiştir. Yapıştırılmış bağlantılar için basma durumunda önemli bir mukavemet avantajı sağlanmazken, yapıştırıcı ve cıvata ile birleştirilmiş bağlantılarda hasar ilerlemesinde avantaj elde edilmiştir. Oda sıcaklığı ve çevre nem şartları altında uygulanan yükün %98 inin yapıştırıcı tarafından transfer edildiği anlaşılmıştır.

Chan ve Vedhagiri [25] tamirat için yapıştırıcı, cıvata ve yapıştırıcı ile cıvata bağlantısının her ikisini bir arada kullandıkları bir çalışmalarında başlangıç olarak tabakalardaki yük dağılımını göz önüne aldıkları karbon fiber takviyeli kompozit bir malzemeyi basit şerit olarak birleştirmişlerdir. Çalışma neticesinde karışık bağlantılarda tüm yükün yapıştırıcı tarafından transfer edildiğini bulmuşlardır.

Fu ve Mallick [26] kompozit malzemelerde karma bağlantının (yapıştırıcı /cıvata) statik ve yorulma mukavemetini araştırmışlar ve çalışılan malzeme sistemi için karma



bağlantının yapıştırıcı bağlantılara göre daha yüksek statik mukavemete ve daha düşük yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermişlerdir.

Bağlantı mukavemeti üzerine yapıştırıcı alanının etkisini araştırmak için yapılan deneysel bir çalışmada yapıştırma alanının artmasıyla bağlantının kesme mukavemetinin önemli oranda azaldığı belirlenmiş bu ise küçük alanlarda meydana gelen deformasyon direncinin büyük alanlarda meydana gelen deformasyon dirençlerinden fazla olmasına bağlanmıştır [27].

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizinde analitik ve nümerik olmak üzere iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Analitik yaklaşımlarda, diferansiyel denklemler ve sınır şartlarından oluşan bir formülasyon söz konusudur. Bu denklemlerin çözümünden bağlantının herhangi bir noktasındaki gerilme değeri tespit edilebilmektedir. Nümerik yaklaşımlarda ise diferansiyel denklemlerin çözümleri sayısal yöntemlerle elde edilir. Her iki yaklaşımda da yapıştırma bağlantısını oluşturan elemanların elastik ve elastik-plastik davranışı göz önüne alınarak analiz yapılabilir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantıları için geliştirilen analitik çözümler yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik davranışlarının anlaşılmasına yönelik olarak önemli bakış açıları sağlamaktadır. Ayrıca, tasarım kriterlerinin kurulduğu parametrik çalışmalarda ve deney planlamalarında oldukça faydalıdır. Fakat gerçek uygulamalarda bu yöntemlerin kullanımı hem kısıtlayıcı varsayımların kabul edilmesi hem de teorinin kurulduğu geometrilerin oldukça kısıtlı olmasından dolayı oldukça sınırlıdır. Bu yöntemlerin çoğu 3-boyutlu çözümün gerekli olduğu analizlerde direkt olarak kullanılamamaktadırlar. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı ve bilgisayarlarda meydana gelen teknolojik gelişmelerden dolayı nümerik analiz metotlarının kullanımı daha çekici ve uygulanabilir bir hale gelmiş ve farklı sınır şartlarında düzensiz geometrilerin modellenerek analizine imkân sağlamıştır.

Analitik yöntemler, yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımlarının belirlenmesinde lineer elastik analiz seviyesinde bile sınır şartlarını sağlamada yetersizdirler. Diğer taraftan nümerik yöntemler gerilme durumu, şekil değiştirme oranı, zaman ve sıcaklığa bağımlı olan gerilme-şekil değiştirme verilerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu durum ise yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tek eksenli çekme ve basma yükleri altında belirlenmesini gerektirmektedir. Son zamanlarda yapılan birçok araştırmada,

yapısal yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin tek eksenli çeki ve bası yükleri altında farklı davranışlar sergilediklerini ortaya koymuştur [28-30].

Nümerik modeller arasında sonlu elemanlar modeli geniş olarak kullanılmaktadır. Basitliğinden ve pratik uygulamalarından dolayı çalışmaların çoğunda basit-bindirme bağlantıları kullanılmaktadır.

Birçok araştırmacı yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların sonlu elemanlar analizinde, konuyu farklı teknik yaklaşımlara göre ele almış ve konu üzerinde farklı yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ya da yapışma bölgesi geometrisi gibi farklı parametrelerin bağlantıdaki gerilme dağılımına ve bağlantı mukavemetine etkilerini araştırmışlardır.

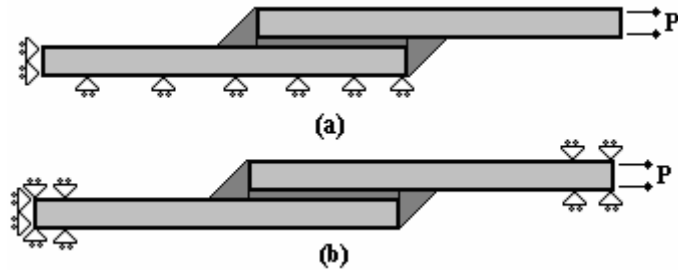
Yapıştırıcı bağlantılarının ilk sonlu elemanlar analizi Wooley ve Carver [31] tarafından gerçekleştirilmiş ve basit-bindirme bağlantılarında gerilme analizini konu edinmiştir. Wooley ve Carver düzlem gerilme elemanları kullanarak lineer analizler gerçekleştirmişler ve yapıştırıcı tabakayı iki sıralı elemanlar ile modelleyerek yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilme dağılımını elde etmişlerdir. Sonuçlar Goland ve Reissner'in çözümleriyle karşılaştırılmasına rağmen quadratik elemanların kullanımından dolayı çok hassas mesh kullanımı gerekmiştir. Basit-bindirme bağlantılarının ilk modellerinin diğer pek çoğu bu çalışmayı takip etmişlerdir. Bilgisayardan kaynaklanan güçlükleri aşmak için Carpenter ve Barsoum [32] iki düğümlü giriş elemanlı yapışan malzeme ve lineer düzlem elemanlı yapıştırıcı tabaka modelini çalışmışlardır. Bu sayede serbestlik derecesi sayısı önemli derecede azaltılmıştır.

Tsai ve Morton [33] da aynı fikri kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında iki boyutlu düzlem uzama durumu ve geometrik non-lineer sonlu elemanlar modeli kullanarak basit bindirme bağlantılarını analiz etmişlerdir. Modelleri iki boyutlu olması na rağmen sonuçları mevcut teorik sonuçlarla iyi bir uyum içerisindedir.

Richardson ve arkadaşları [34] yapıştırıcı ile birleştirilmiş birçok bağlantı için iki boyutlu sonuçların yeterince kabul edilebilir doğrulukta olduğunu göstermişlerdir.

Li ve Lee-Sullivan [35] son zamanlarda non-lineer iki boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanarak çekme altındaki basit bindirme bağlantıları üzerine çalışmalar

gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında düzlem gerilme ve düzlem uzama durumlarının her ikisi içinde sekiz düğümlü izoparametrik quadratik elemanlar kullanarak iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Non-lineerlik konusunda çalışan Andruet ve arkadaşları [36] basit bindirme bağlantılarını hem 2-boyutlu hem de 3-boyutlu olarak çalışmıştır. 2-boyutlu analizlerinde yapıştırıcı tabaka, düzlem gerilme ya da düzlem uzama elemanları ile modellenirken yapışan malzeme için aksenal deformasyon altındaki Bernoulli kiriş elemanlarını kullanmışlardır. Pandey ve arkadaşları [37] tarafından viskoplastisite göz önüne alınarak gerçekleştirilen yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların non-lineer analizinde, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mukavemeti üzerine yapıştırma boyu, yapıştırılan malzemenin açılı durumları ve yapıştırıcı kalınlığı göz önüne alınmıştır. Sonuç olarak, yapıştırma uzunluğunun artmasıyla bağlantıda meydana gelen maksimum kayma ve soyulma gerilmelerinin azaldığı tespit edilmiştir. Adams ve Peppiatt [38] bu kritik sahada sonlu elemanlar tekniğini yaygın şekilde kullanmış olan başlıca araştırmacılardandırlar. Çalışmalarında, Adams ve Peppiatt standart metal malzemelerin yapıştırılarak birleştirildiği tek ve çift bindirme bağlantılarındaki gerilmeleri Şekil 1.3’de gösterildiği gibi iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz etmişlerdir. Yapıştırılan malzemelerin izotropik olduğunu ve problemin düzlem şekil değiştirme problemi olduğunu kabul ederek yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeleri modellemek için sabit şekil değiştirme üçgen elemanlarını kullanmışlardır. Bu kabul, yapıştırıcı tabakası için tatminkâr iken yapıştırılan malzemelerin modellenmesinde daha az gerçekçidir. Adams ve Peppiatt, tek tesirli bindirme bağlantıları için sonlu elemanlar tekniğinden ve klasik analitik tekniklerden elde edilen gerilme dağılımları arasında iyi bir uyuma elde etmiştir. Ancak, kullandıkları eleman tipi kesinlikle gerilmelerin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesinde kullanılamaz. Bununla birlikte,



Şekil 1.3 Bindirme bağlantılarının sonlu eleman modelleri için sınır şartları [38].  
a) Tam boy çift bindirme bağlantısı, b) Tek bindirme bağlantısı.

- Yapıştırıcı birikintilerinin etkileri dikkate alındığı zaman, elde edilen en yüksek kayma gerilmesinin daha önceki analitik teorilerce dörtgen uçlu yapıştırıcı tabakasında tahmin edilen gerilmelerden daha düşük olduğunu,
- Yapıştırıcı tabakasının uçlarındaki en yüksek asal gerilmelerin kopmuş bindirme bağlantısının yapıştırıcı birikintisinde şekillenen çatlakların doğrultusuna dik açılarda olduğunu göstermişlerdir.

Gerçekte yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılar hem mekanik hem de termal yüklere maruz kalırlar. Farklı mekanik ve termal özelliklere sahip yapıştırıcı ve yapışan malzemelerden oluşan yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılarda yapıştırıcı ve yapışan malzemeler arasındaki termal mekaniksel uyumsuzlıklardan dolayı bu bağlantılar termal yükler altında farklı gerilme-uzama durumları gösterirler. Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılarda termal yüklemelerin dikkate alındığı farklı çalışmalar yapılmıştır.

Apalak ve Güneş [39] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada büyük yer değiştirmeler düşünülerek yapıştırıcı ile birleştirilmiş basit bir bindirme bağlantısının termal gerilme analizi çalışılmıştır. Termal analizlerde basit-bindirme bağlantısının dış yüzeylerinin farklı sıcaklık ve hızlarda hava akışına maruz kaldığı kabul edilmiş ve yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıdaki son sıcaklık dağılımı, termal zorlanmaları hesaplamak için kullanılmıştır. Daha sonra basit-bindirme bağlantısının geometrik olarak non-lineer gerilme analizi sonlu elemanlar analizi kullanılarak 4 yapışan malzemenin köşe durumu için çalışılmıştır. Yapışan malzeme tabakasının serbest uçları boyunca yapıştırıcı içerisinde ve aynı zamanda yapışan malzemelerin (adherend) üst ve alt yüzeylerinde yüksek termal gerilme yoğunlaşmaları gözlenmiştir. Detaylı analizler en kritik yapıştırıcı bölgenin yapıştırıcı -yapışan malzeme ara yüzeyinin serbest uçları olduğunu göstermiştir. Termal yüklerin yapısal yükler gibi bağlantı elemanlarında ciddi gerilme ve uzama konsantrasyonlarına neden olduğu gözlenmiştir. Soyulma gerilmelerini azaltmak için kritik yapıştırıcı -yapışan malzeme bölgelerinin artması bütün yapışan malzeme kenar durumları için fayda sağlamamıştır.

Lee ve Lee [40] üretimden kaynaklanan kalıntı termal gerilmelerin göz önüne alındığı yapıştırıcı bir tabakanın hasar durumları üzerine odaklanmış ve yapıştırıcı birleştirmeli bir boru bindirme bağlantısının optimum tasarımını tespit edebilmek için yeni bir metot sunmuşlardır. Redy ve Guess [41] bir yapıştırıcı uç bağlantısında bağlantı mukavemeti

üzerine kalıntı gerilmelerin etkilerini araştırmışlar ve uç bağlantı mukavemeti üzerine kalıntı gerilmelerin etkisinin lineer analizlerden tahmin edilenden daha düşük olduğunu göstermişlerdir.

Ioka ve arkadaşları [42] ara yüzey ile etkileşimdeki bölge ve birleştirilmiş farklı numunelerin serbest yüzeyleri üzerine sınır eleman metodunu kullanarak termal kalıntı gerilme dağılımını çalışmışlardır. Humfeld ve Dillard [43] viskoelastik polimerik malzemelerde kalıntı gerilmeler üzerine termal çevrimin etkilerini araştırdılar ve elastik-viskoelastik bir malzeme sisteminde malzeme termal bir çevrime maruz bırakıldığında kalıntı gerilmelerin artarak değiştiğini bulmuşlardır.

Abedian ve Szyszkowski [44] termal gerilme dağılımı üzerine kompozit malzemenin yüzey geometrisinin etkilerini teorik olarak araştırmışlar ve kompozit malzemede serbest yüzey civarındaki gerilme durumunun yüzeyin geometrik özelliklerine çok duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Harris ve Adams [45] yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin elastik-plastik davranışları yanında geometrik olarak non-lineer etkileri de dikkate aldıkları bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı kullanarak hem pervazlı (spew fillet) hem de pervazsız modeller üzerinde analizler yapmışlardır. Yapıştırılan malzemelerde von-Mises akma kriterini, dayanımı yüksek yapıştırıcılar için maksimum gerilme kriterini, esnek yapıştırıcılar için ise modifiye edilmiş von-Mises akma kriterini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçları teorik ve deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır.

Sancaktar ve Simmons [46] tek tesirli bindirme bağlantılarının mukavemeti ve deformasyon davranışı üzerine yapıştırılan malzemede oluşturulan çentiğin etkisini incelemişlerdir. Başlangıçta sonlu elemanlar metodunu kullanarak en uygun çentik yerini, çentik boyutlarını ve çentik geometrisini tespit ederek bu parametrik çalışmalardan sonra daha detaylı sonlu elemanlar analiziyle bu verilerin farklı hasar kriterlerine uygulanabilirliğini değerlendirmek için deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlar çentikli numunelerin dayanımının, çentik olmayan numunelerden %29 daha fazla olduğunu göstermiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde ise pik gerilme değerlerinde %27'lik bir düşüş olduğunu rapor etmişlerdir.

Avila [47] tarafından kompozitler için dalgalı bindirme olarak birleştirilmiş bir bağlantının gerilme analizi çalışılmıştır. Bu çalışma yapıştırıcı bağlantıların yeni bir tasarımının deneysel ve nümerik analizini konu edinmiştir. Elde edilen bilgilerin tutarlılığı hem fazla sayı da numune kullanımı hem de basit-bindirme ve dalgalı bindirme bağlantıları arasındaki istatistiksel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Deneysel testlere ilave olarak bağlantı içerisindeki gerilme alanlarını tespit edebilmek için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Sonuçlar yüklemde yaklaşık olarak %41'lik bir artış olduğunu göstermiştir. Bu sonuçların dalgalı -bindirme bağlantıları içinde meydana gelen basma gerilme alanlarından kaynaklandığı ileri sürülmüştür.

Kelly [48] karma (hybrid/yapıştırıcı+cıvata) bağlantılı kompozit basit bindirme bağlantılarında yük transferi konusunda bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada karma kompozit basit bindirme bağlantılarındaki yük dağılımı, cıvata deliği teması ve non-linear malzeme davranışını içeren 3-boyutlu bir sonlu elemanlar modeli kullanımı sayesinde tespit edilmiş ve cıvata ile transfer edilen yük üzerine konuyla ilgili bağlantı tasarım parametrelerinin etkileri sonlu elemanlar çalışmasıyla araştırılmıştır.

Turgut ve Sancaktar [49] kompozit malzemelerde fiber-matris yapışması üzerine kürleşmenin ve yükleme durumlarının etkilerini incelemişlerdir.

Bigwood ve Crocombe [50] gerçekçi non-linear malzeme modeli üzerine temellenmiş genel bir non-linear yapıştırıcı bağlantının analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada yapıştırıcı tabaka non-linear malzeme olarak kabul edilirken yapışan malzemelerin linear elastik malzeme davranışı sergiledikleri kabul edilmiştir. Bu non-lineerlik, bağlantı mukavemeti üzerine yapıştırıcı tabaka kalınlığının etkilerinin çok daha doğru bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

Goncalves ve arkadaşları [51] yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların gerilme analizi için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Geometrik ve malzeme nonlineerliğinin yanı sıra yapıştırıcı tabaka kalınlığı boyunca gerilme değişimini de dikkate almışlardır. Çalışmalarında plastik deformasyondan dolayı malzeme nonlineerliğinin kritik bölgede gerilme konsantrasyonunda bir düşüşe neden olduğunu bulmuşlardır. Lang ve Mallick [52] farklı uç geometrilerini incelemiş ve basit bindirme

bağlantılarında farklı uç (spew) şekillerinin gerilme dağılımını ve maksimum gerilmeyi nasıl etkilediğini göstermişlerdir.

Dorn ve Liu [53] yapıştırıcı ile birleştirilmiş plastik/metal çiftinin basit bindirme bağlantılarında gerilme ve şekil değiştirme durumları üzerine uç dolgularının (spew fillet) etkilerini araştırmak için farklı yapıştırıcı ve yapışan malzemeler kullanmışlardır. Sünekliğin bir sonucu olarak yüksek uzama konsantrasyonunun bulunduğu bölgeler olan uç (spew) sonu bölgelerdeki plastik yapışan malzemelerde hasar meydana geldiğini bulmuşlardır.

Taib ve arkadaşları [54] sırasıyla basit bindirme bağlantısı ve ucu çökertilmiş bindirme bağlantısı için iki farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı konfigürasyonlarının sonlu elemanlar analizini çalışmışlardır. Gerçekleştirdikleri deneysel analizler neticesinde yapıştırıcı tabakayı non-lineer olarak kabul ederken yapışan malzemelerin davranışının ise lineer elastik olduğunu kabul etmişlerdir. Aynı zamanda bağlantının non-lineer geometrik deformasyonları da dikkate alınmıştır. Sonuç olarak sonlu elemanlar modeli ile doğru tespit edilen yüklerin altında ucu çökertilmiş bağlantılarda ayırt edici deformasyonlar gözlenmiştir.

Kaya ve arkadaşları [55] dinamik kuvvetlere maruz kalan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda çeşitli dinamik karakteristiklerin etkilerini sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmişlerdir. İncelemeler üç boyutlu model kullanılarak yürütülmüştür. Bağlantının sonlu elemanlar modelinde her biri sekiz düğümlü ve üç serbestlik derecesine sahip izoparametrik üç boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Meshleme işlemi bilgisayar tarafından otomatik olarak yapılmıştır. Bağlantı sol kenarından tutturulmuş olan ince plaka olarak modellenmiş ve titreşim analizi yapılmıştır. Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantının rezonans şiddetini büyük bir şekilde sönmülediği gözlemlenmiştir.

Özel ve arkadaşları [56] bir çalışmalarında iki boyutlu sonlu elemanlar analizini kullanarak, biri sert diğeri yumuşak iki yapıştırıcı ve sertleştirilmiş çelik yapışan malzemeden oluşan birbirlerinden çok farklı mekanik özelliklere sahip eğilme momentine maruz bir basit bindirme bağlantısının elasto-plastik gerilme analizini incelemişlerdir. Basit bindirme bağlantısının performansı üzerine geometrik

değişkenlerin etkilerini tespit edebilmek için dört farklı yapışan malzeme kalınlığı ve her bir yapıştırıcı için dört bindirme uzunluğu kullanmışlardır. Elde ettikleri analiz sonuçlarını doğrulamak için sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve yapışan malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine her iki yapıştırıcı bağlantısı içinde önemli etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. İlave olarak, şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan yapıştırıcı ile birleştirilmiş basit bindirme bağlantısı tarafından taşınan yükün artan bindirme mesafesi ile arttığını kaydetmişlerdir. Aydın ve arkadaşları [57] gerçekleştirdikleri bir çalışmalarında non-lineer sonlu elemanlar analizini kullanarak film tipi bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantının mukavemetini ve hasar tipini tespit edebilmek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. İlk olarak 4 farklı yapışan malzeme kalınlığı ve bindirme mesafesi kullandıkları basit bindirme bağlantılarında bindirme kayma testi gerçekleştirmişler ve kırılma yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu kullanarak incelemişlerdir. Daha sonra hem geometrik non-lineerliği hem de yapışan malzeme ve yapıştırıcının non-lineer malzeme davranışlarını göz önüne alarak basit bindirme bağlantılarında gerilme analizi yapmışlardır. Basit bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde iki farklı hasar tipi gözlemlemişlerdir. Hem gerilme analizi sonuçlarından hem de deneysel sonuçlardan, yapıştırıcı tabakanın serbest uçlarındaki hasar çekme etkisiyle soyulma gerilmesinden kaynaklanırken, bindirme bölgesinin merkezinde ise kayma gerilmesinin etkisinden dolayı yıkıcı bir hasar gözlenmiştir.

Temiz ve arkadaşları [58] viskoelastik ve basınç hassasiyetli bir yapıştırıcının yaşlanmasını incelemişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri yapıştırma bağlantılarını 20° C oda sıcaklığında laboratuvar ortamında ve 20° C oda sıcaklığında ve %100 bağıl nem ortamında toplam 90 gün bekletmişlerdir. Çalışma sonucunda yapıştırıcı bağlantılarının dayanımlarında %100 nem ortamında zamanla önemli derecede azalma gözlenirken, oda sıcaklığı ortamında ise önemli bir değişim olmamıştır. Aşağıda ülkemizde yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılarının analiz ve tasarımları konusunda çalışılmış olan birkaç tane yüksek lisans ve doktora tezi görülmektedir.

Kaya [59] sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çekme kuvveti altında tek ve çift yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirmelerde gerilme dağılımlarını araştırmıştır. Çalışmasında gerilme dağılımı üzerine farklı parametrelerin etkilerini bulmak için ilk olarak yapıştırıcı kalınlığı dikkate alınmış, ikinci olarak ise benzer ve farklı yapışan



malzemeler için yapıştırıcı kalınlığı dikkate alınmıştır. Model statik olarak ele alınmış ve daha sonra çalıştığı dinamik çalışmaların temelini biçimlendirmiştir. Apalak [60] tarafından yapılan bir çalışmada düz bindirme bağlantılarından farklı bir bağlantı şekli olan T-tipi bağlantıların, sonlu eleman metodu kullanılarak analiz ve tasarımları gerçekleştirilmiştir. Kodakoğlu [61] yapıştırıcıların genel özellikleri ve çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesinin analitik ve nümerik olarak incelenmesi konusunda çalışmıştır. Engin [62] yapıştırıcılar ile birleştirilmiş çift bindirmeli ankastre bağlantıların sonlu eleman metodu ile geometrik bakımdan lineer ve lineer olmayan analizini çalışmıştır. Şekercioğlu [63] yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi konusunda çalışmıştır. Aydın [64] yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi konusunu çalışmıştır.

Kompozit/kompozit tek tesirli yapıştırma bağlantılarını güçlendirmek için, dikiş (stitching) ve iğneleme (z-pinning) gibi yöntemler geliştirilmiştir. Dikiş işlemi, sıvı reçine dökülmesi işleminden önce uygulanır. Bu yöntem, kuru fiber istifinin karşılıklı taraflarına ikiden fazla iğnenin kalınlık boyunca yerleştirilmesi işlemidir. Birçok dikiş işlemi, kuru fiber istiflerinin güçlendirilmesinde uygulansa da, literatürde prepreg kompozitler için çalışmalar mevcuttur [65]. Viskoz prepreg tabakalardan iğnenin geçirilmesi çeşitli problemlere neden olur. Araştırmaların büyük çoğunluğu bu işlemin son kompozitin düzlem içi mekanik özelliklerine zarar verdiğini göstermiştir [66, 67]. Ancak, bu yöntemin karbon/epoksi kompozitlerde iki kata yakın iyileştirme sağlandığı da bir çalışmada gösterilmiştir [68]. Dikişin rijitliği, dikiş işleminde kullanılan iğnenin türü ve çapı, diziliş biçimi, kompozitin kalınlığı ve dikiş-matris etkileşimi önemli parametrelerdir. Bunların malzeme ve yapı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır [68-74].

Z pimler, prepreg kompozitlerin takviyelendirilmesi amacıyla kullanılan ince, rijit rodler olarak tanımlanabilir. Huang ve arkadaşları [75] polimer kompozitleri güçlendirmek amacıyla ilk kez rodleri 1978 yılında kullanmışlardır. Bu çalışmada, kısa çelik pimler,  $\pm 45^0$  düzeninde kalınlık boyunca karbon/epoksi kompozitlerin güçlendirilmesinde kullanılmışlar ve %73 oranında mukavemet iyileştirmesi sağlamışlardır. İğneleme işlemi (Z pinning), çatlak başlangıcını engelleme konusunda yeterli değildir [76-78] fakat daha uzun çatlakların oluşmasını geciktirmektedir [79-82].

Chang ve Mouritz [83] polimer kompozit bağlantılarında yüksek sıcaklıklarda bile bu yöntemin faydalı olduğunu göstermişlerdir. Mouritz [84] z pim yöntemi ile güçlendirilmiş tabakalı kompozitler üzerine bir literatür özeti çalışması yapmıştır.

Matsuzaki ve arkadaşları [85] alüminyum/cam elyaf takviyeli kompozit yapıştırma bağlantılarında delikler içerisinden fiberler geçirmek suretiyle bir iyileştirme önermiş ve yorulma davranışı üzerinde negatif bir etkisi olmaksızın statik mukavemet değerlerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

Bu tezin amacı, Aktas ve Polat [86] tarafından kompozit/kompozit yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantıların takviyelendirilmesi için önerilen yöntemi farklı sıcaklıklar altında deneysel ve nümerik olarak incelemektir. Bu yöntemde, geleneksel iğneleme (z pinning) yönteminden farklı olarak z pimler bindirme bölgesinin köşelerinde kullanılmıştır. Bindirme bağlantılarının statik çekme deneyleri üç farklı bindirme bağlantısı için (A tipi, B tipi ve C tipi) 20, 40, 60 ve 80<sup>0</sup>C sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile desteklenmiştir.

Bölüm-I'de, konu ile ilgili bazı temel kavramlar ve geniş bir literatür araştırması sunulmuştur. Bölüm-II'de, yapışma olayı, yapıştırma bağlantılarının diğer bağlantı türleri ile kıyaslanması, bağlantılarda oluşan gerilme türleri ile yapıştırıcıların genel özellikleri üzerinde durulmuştur. Bölüm-III'de kompozit malzemelerin temel özellikleri ve imalat yöntemleri anlatılmıştır. Bölüm-IV'de yapılan deneysel çalışma anlatılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Bölüm V'de ANSYS 11.0 sonlu elemanlar programı kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantılarının (A tipi) ve cam elyaf takviyeli (B tipi) yapıştırma bağlantılarının üç boyutlu hasar analizi aşamaları tek tek anlatılmış ve elde edilen nümerik sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bölüm VI'da ise çalışmada elde edilen sonuçlar ve tartışmalar yer almaktadır.

## BÖLÜM II

### YAPIŞMA OLAYI VE YAPIŞTIRICILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

#### 2.1 Giriş

İkinci Dünya Savaşından günümüze dek, kimya sanayinde büyük gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak, plastiklerde aynı hızda gelişmeler olmuş, değişik tür ve çeşitte plastikler üretilmiş, demir, seramik, cam, ağaç, kâğıt, deri ve tekstil gibi malzemelerin yerine plastikler kullanılmaya başlamıştır. Plastiklerin yapışkanlık özellikleri dikkate alınarak, yapıştırıcılar üretilmiş ve bu konuda da büyük ilerlemeler sağlanmıştır [87].

Bu bölümde, yapışma olayı ve yapıştırıcı mühendisliği terimlerini açıklamak amacıyla yapıştırıcı teknolojisi temelleri ele alınmış, yapıştırıcılar ve çeşitleri hakkında bilgi verilerek sonraki bölümler için bir temel oluşturulmaya çalışılmıştır.

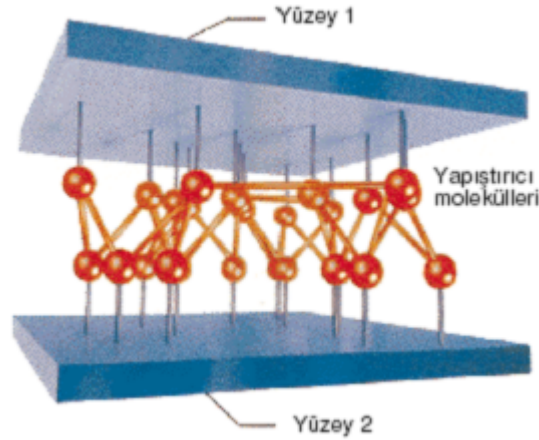
#### 2.2 Yapışma

Yapışma olayı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen adhezyon ve yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kohezyon kuvvetleri neticesinde oluşan fiziksel ve kimyasal bir olaydır. Yapışmanın doğasını daha iyi anlayabilmek için adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini daha iyi anlamak gerekir.

##### 2.2.1 Adhezyon

“Adhezyon” iki maddenin temas yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. “Van der Waals kuvvetleri” olarak adlandırılan çekim ve yüzeye tutunma fiziksel kuvvetleri yapışmada en önemli faktördür. Eğer yapıştırıcı, mekanik olarak işlenmiş yüzeylerdeki pürüzlere tam olarak temas edemezse, bu moleküller arası kuvvetler oldukça zayıflar. Bu nedenle yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Dolayısıyla, yapıştırmanın kuvveti hem yüzeyin ıslatılmasına (maksimum moleküller arası temas için), hem de yüzeyin yapışma özelliklerine bağlıdır. Belirli bir yapıştırıcı yüzey gerilimi için ıslatma, yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine ve

yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yüzeyde kirlerin bulunması da ıslatmayı olumsuz etkiler. Şekil 2.1. yapıştırma bölgesinde meydana gelen kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 2.1 Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler [4, 99].

Yapışma (adhesion) olayı için Houwink ve arkadaşları [88] ve Waker [89] tarafından bu güne kadar farklı teoriler ortaya atılmıştır ve bunlardan önemli olan bir kaçına kısaca bakmak faydalı olacaktır.

- **Mekanik teori:** Yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcı fazının mekanik olarak birbirine geçirilmesi ile yapışarak bileşenin oluşacağını ifade eder. Çeşitli aşındırma metotları ile yüzey pürüzsüzlüğünü (birbirine geçebilme derecesini) arttırmanın birleşme dayanımını arttırmasına rağmen genellikle bunun tek bir mekanizma olamayacağı kabul edilir.
- **Difüzyon Teorisi:** İki komşu faz arasında molekül alışverişini kabul eder. Bu olay benzer polimerler arasında gerçekleşmesine rağmen, polimer ve metal ara yüzeylerinde nadiren olabilecek bir durumdur.
- **Adsorpsiyon Teorisi:** Komşu yüzeylerin molekülleri arasındaki Vanderwalls kuvvetlerinin çekimiyle oluştuğunu ifade eder. Bu kuvvetlerin iki önemli tipi mevcuttur. İlki, bazı moleküllerde bulunan pozitif ve negatif şarj merkezlerinin daimi olarak ayrılması ile oluşan dipollerden (iki manyetik kutba sahip nesne) dolayı ortaya çıkar. İkincisi ise London dispersive (dağılma) kuvvetleri olarak isimlendirilir ve bir moleküldeki şarj mevkisindeki ani bir yer değişiminin komşu molekülleri de etkileyerek bir çekime sahip olması neticesinde ortaya çıkar. Her iki kuvvette yalnızca moleküller

arası mesafenin  $10^{-10}$  dan daha düşük olduğu zaman önemlidir ve iyi bir yüzey teması ihtiyacı gösterir.

- **Elektrostatik Teori:** Adsorpsiyon teorisine benzerdir. Çekim kuvveti farklı iki malzeme temas ettiği zaman oluşan elektriksel dolmadan dolayı oluşur.
- **Kimyasal Teori:** Bazı şartlar altında esas bağların yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasında daha yüksek bağ dayanımlarına neden olabileceğini ifade eder.

### 2.2.2 Kohezyon

Yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin, yapıştırıcının polimerizasyonu esnasında meydana gelen kimyasal (bağ kuvvetleri) ve fiziksel (Van der Waals kuvvetleri) kuvvetler tarafından bir arada tutulması olayıdır. “Kohezyon”, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir.

**Van der Waals Bağı:** Küçük ya da büyük bir molekül için düşünüldüğünde, molekülün farklı yüklerine tesadüf eden pozitif ve negatif kutuplar bulunabilir. Böylece her molekülden ibaret küçük mıknatıslar ortaya çıkar. Burada aynen mıknatıslarda olduğu gibi, çeşitli dipoller elektromanyetik kuvvetlerle birbirlerine kenetlenmektedir. Bu arada oluşan bağlar Van der Waals bağı olarak adlandırılmaktadır. Bu oluşan Van der Waals bağları diğer bağlar kadar kuvvetli değildir.

**Kovalent Bağ:** Atomlar arasında elektron köprüleri kurularak kenetlenmeleri durumunda oluşur. Buradaki kuvvetler, ortak kullanılan elektronların kendi eksenleri etrafında birbirlerine zıt yönde dönmesinden dolayı ortaya çıkan elektromanyetik kuvvetlerdir. Zıt yönde dönen elektronların oluşturduğu elektromanyetik alanlar, birbirlerini bir mıknatısın artı ve eksi kutupları gibi çekerler.

Bir zincirin kuvvetinin en zayıf halkası tarafından belirlenmesi kuralına uygun olarak, yapıştırma işleminde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri yaklaşık eşit olmalıdır. Kohezyon kuvvetleri daha ziyade yapıştırıcı malzemenin sahip olduğu özellikler ile ilişkili bir durumdur. Fakat adhezyon kuvveti aşağıdaki uygulamalar ile artırılabilir.

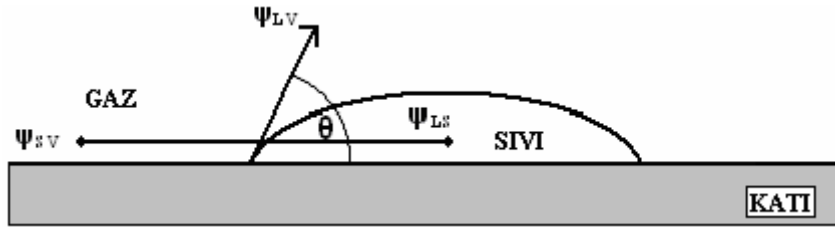
- Yağ alma veya mekanik aşındırma ile istenmeyen yüzey tabakalarının temizlenmesi,
- Primer ile kaplayarak yeni, aktif bir yüzey oluşturulması,

- Aşındırma, korona işlemi, düşük plazma işlemi vs. ile yüzey aktivitesinin değiştirilmesi.

Uygun bir yüzey hazırlığı adhezyon kuvvetini ve yapışma performansını belirgin ölçüde arttırmaktadır. Doğru şekilde yüzey hazırlığı yapılmış bir parça, temiz, mekanik olarak düzgün ve uygun pürüzlülükte bir yüzeye sahiptir. Bu şekilde hazırlanmış bir yüzey, sağlam ve uzun ömürlü yapışmanın garantisidir.

### 2.2.3 Islanabilirlik

Yapışmaya yardım eden mekanizmaların başında ıslanabilirlik gelir. Islanabilirlik, sıvının katı yüzeye yayılabilirliğini tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Atmosferde düzlem katı yüzey içinde kalan damlalardan oluşan bir sistem içindeki kuvvetlerin dengesini göz önüne alarak bir sıvı damlası yardımıyla verilen bir katının ıslanabilirliği ölçülebilir. Sistemin serbest enerjisinin net olarak azalması ile damla yüzeye tamamen yayılır ve yüzeyi ıslatır. Şekil 2.2 şematik olarak bu durumu göstermektedir.



Şekil 2.2 Islanabilirlik

Katı yüzey üzerindeki damla, katı ve sıvı arasında temas açısı yapar. Şekil 2.2’de,  $\psi_{LS}$ ,  $\psi_{LV}$  ve  $\psi_{SV}$  sırasıyla katı -sıvı, sıvı -gaz, katı -gaz temaslarının yüzey enerjisini temsil etmektedir. Tamamen ıslanabilirlik için aşağıdaki denklemler yazılabilir;

$$\psi_{LS} + \psi_{LV} < \psi_{SV} \quad (2.1)$$

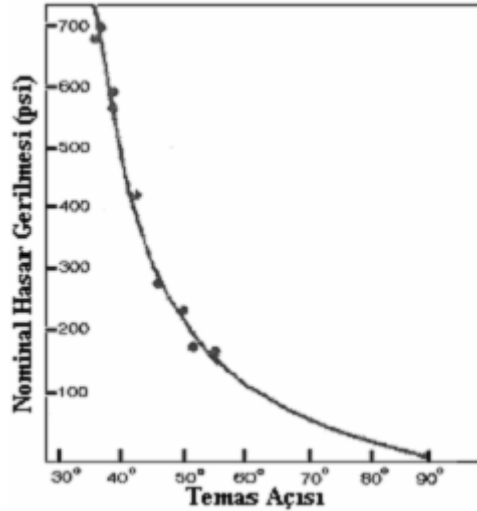
Denklem (2.1)’deki; S, L ve V sırasıyla, katı (solid), sıvı (liquid) ve gazı (vapor) temsil ederken,  $\psi$  yüzey enerjisini temsil eder. Yüzey üzerindeki kuvvetler dengeleninceye kadar sıvı, katı yüzeye yayılır. Bunun anlamı kısmi bir ıslanmadır. Şekil 2.2’de görülen  $\theta$  açısına, *temas açısı* denir. Kuvvetlerin dengesinden;

$$\psi_{LS} + (\psi_{LV} \cos \theta) = \psi_{SV} \quad (2.2)$$

veya

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{\psi_{SV} - \psi_{LS}}{\psi_{LV}} \right] \quad (2.3)$$

yazılabilir.  $\theta = 180$  için küresel damla ya da ıslanma olmadığı anlamına gelir. Ters olarak  $\theta = 0$  için mükemmel ıslanma oluşur.  $0 < \theta < 180$  için ise kısmi ıslanma oluşur. Temas açısı  $\theta$ , yüzeyin yapısına bağlıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü,  $\theta$  temas açısını azaltır. Emilmiş gazlar  $\theta$  temas açısını artırır. Şekil 2.3 temas açısı ile mukavemet arasındaki değişimi göstermektedir.  $\theta$  temas açısı büyüdükçe, yapışma mukavemeti azalır.

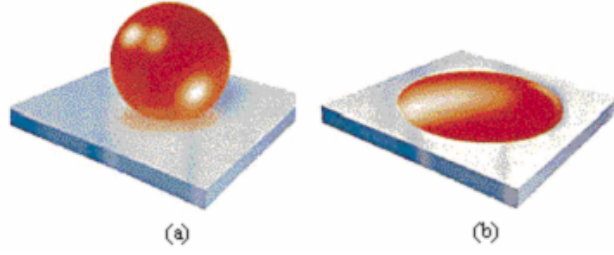


Şekil 2.3 Temas açısı ile mukavemet değişimi

Yapışma yüzeyi üzerindeki leke ve kimyasal reaksiyonlar sırasında oluşacak kirlilik, ıslanabilirliği etkiler. Islanabilirlik, sıvının katıyı ıslatmasının boyutunu tanımlamak için kullanılır. Yüksek temas açısı kötü bir ıslanabilirliği temsil ederken, düşük temas açısı yüksek ıslanabilirliği temsil eder (Şekil 2.4).

Yüzey hazırlıkları “su kopma testi” ile değerlendirilebilir. Temizlenmiş yüzeylere saf su damlaları bırakılır. Yetersiz temizlenmiş yüzeyde damlanın küresel şekli büyük ölçüde korunur ve yüzeyin tekrar temizlenmesi gerektiğini gösterir. Eğer su yüzeyde akıyorsa ıslatma başarılıdır; yüzey yeterli derecede temizlenmiştir. Bu yöntem alüminyum ve magnezyum üzerindeki anodik kaplamalar için uygun değildir. Su kopma testinin avantajı, “test sıvısı ” olan suyun kolay bulunabilmesidir. Fakat avantajı

bununla sınırlı kalır, çünkü suyun sertliği yüzey gerilimini etkiler. Bazı durumlarda, damıtılmış su bile su kopma testinde güvenilir sonuç vermez. Bu nedenle kritik uygulamalarda, belirli yüzey gerilimlerine sahip yüzey gerilim sıvıları kullanılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, bu testin yalnızca ıslatılabilirliği gösterdiği, yapıştırılma kabiliyetini ölçmediğidir.



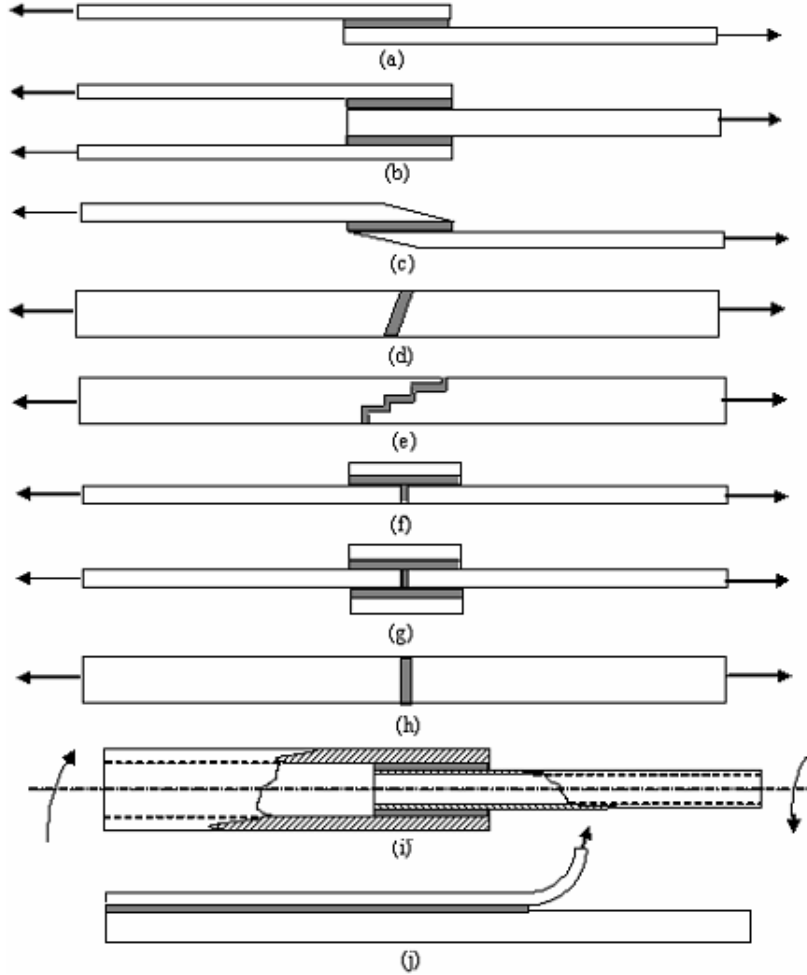
Şekil 2.4 Islanabilirlik testi. a) Yapıştırma yüzey hazırlığı yetersiz b) Yapıştırma yüzey hazırlığı yeterli [4, 99].

### 2.3 Yapıştırıcı ile Birleştirme Şekilleri

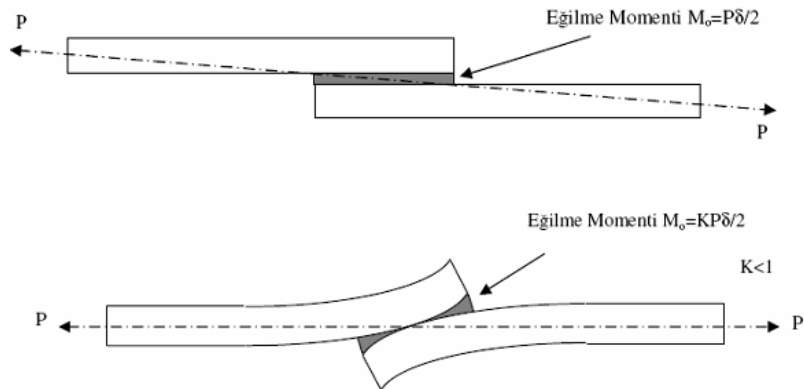
Uygun bir tasarım, yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme dağılımı ve bağlantının hasar mukavemeti hakkında yeterli bilgiye sahip olmayı gerektirir. Bağlantının davranışı, geometri ve malzeme davranışı gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu bağlılık bağlantının ortalama mekanik davranışını tahmin etmeyi zorlaştırır. Karşılaşılan güçlükler özellikle yapıştırıcıların kontrol mekanizmalarının karşılaştırılmalarındaki eksikliklerden dolayıdır [56]. Yapısal mühendislik tasarımın rasyonel temeli, bir yükleme durumunda yükleri belirleyebilmek ve oluşacak gerilmeleri pratik olarak hesaplayabilmek olmalıdır. Yükleme sistemi genellikle bir fonksiyon ile tanımlanır, fakat mühendis en uygun ve maliyet açısından en etkili çözüme ulaşacak en iyi malzeme ve tasarım tekniğini kullanma becerisine sahip olmalıdır. Bu da sürekli olarak teknolojiye ilerlemeyi gerektirir ve yapısal yük ve gerilmeleri ölçecek modern mühendisliğin önemini artırır [90]. Şekil 2.5(a), tek tesirli bindirme bağlantısını göstermektedir. Bu bağlantı tipi yapıştırıcıların test edilmesinde en fazla kullanılan bağlantı tipidir. Tek tesirli bindirme bağlantılarının kalite kontrolünde numuneler test edilir. Bağlantının yapılışı basittir ve elde edilen sonuçlar hem yapıştırıcı kalitesi hem de malzeme yüzey işlemleri açısından hassastır. Bununla beraber oluşan gerilme durumu karmaşıktır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi tek tesirli bindirme bağlantısında yük aynı doğru üzerinde etki etmemektedir. Bu yüzden eğilme momenti oluşur. Şekil 2.6(b)'de görüldüğü gibi sistemde dönme meydana gelir. Yapıştırıcı tabakasında sadece kaymadan dolayı uzama olmaz, aynı



zamanda bağlantının uçlarında yırtılma gerilmeleri de oluşur. Bağlantıda çekmeden dolayı uzama fazla olmaz, fakat eğilme oluşur. Özellikle gerilmelerin yüksek olduğu bölgelerde yapışan ve yapıştırıcının ikisi de plastik bölgeye girebilir.



Şekil 2.5 Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri [90].



Şekil 2.6 Tek tesirli bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve şekil değiştirdikten sonraki görünümü [90].

Tek tesirli bindirme bağlantıların basitleştirilmiş analizinde, malzemenin rijit ve yapıştırıcının sadece kayma yönünde şekil değiştirdiği kabul edilir (Şekil 2.7(a)). Eğer bağlantının genişliği  $b$ , uzunluğu  $l$  ve yüklenen kuvvet  $P$  ise, kayma gerilmesi  $\tau$  aşağıdaki gibi bulunabilir. Malzemede oluşan kayma gerilmeleri A-B bindirme uzunluğu boyunca lineer azalır. Şekil 2.7(b)'de malzeme rijit yerine elastiktir. Üst levhadaki gerilme, A noktasında maksimum B noktasında ise sıfır olur. A noktasındaki şekil değiştirme, B noktasındaki şekil değiştirmeden daha büyüktür ve  $l$  uzunluğu boyunca azalır. Ara yüzey sürekli kabul edilerek, Şekil 2.7(a)'da görülen yapıştırıcının düzgün bölünmüş paralelkenarı, Şekil 2.7(b)'de görülen bozulmuş şekle döner. Bu olaya diferansiyel kayma denir.

$$\tau = \frac{P}{bl} \quad (2.4)$$

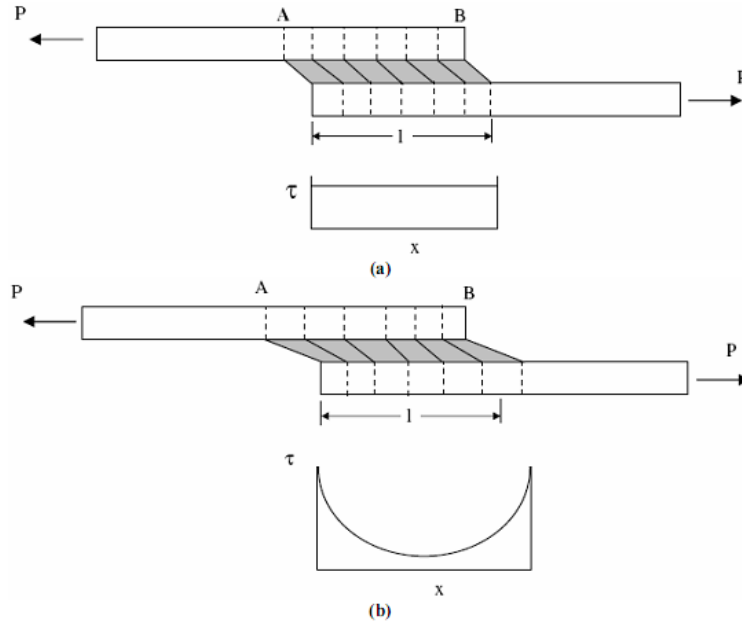
Şekil 2.5(b)'de görülen çift tesirli bindirme bağlantısı kullanılarak eğilme etkisi giderilebilir. Çift tesirli bindirme bağlantısı, iki tek tesirli bindirme bağlantısının alt alta dizilmesi ile elde edilir ve bağlantıda büyük dönmeler oluşmaz. Kalın parçanın yüklendiği tarafta çekme yırtılma gerilmesi oluşurken diğer uçta da bası gerilmesi oluşur (Şekil 2.20).

Şekil 2.5'deki diğer bağlantı yapılandırmaları, çoğunlukla gerilme yığılmalarını ve soyulma gerilmelerini azaltacak şekilde yükler için tasarlanmıştır. Tasarımcıların en sevmediği ve kaçındığı gerilme tipi soyulma gerilmesidir. Özellikle düşük yüklerde, tek ve çift bindirme bağlantılarında çoğunlukla kayma gerilmeleri oluşurken, Şekil 2.5(j)'deki yükleme durumu gibi, bağlantı uçlarında, yırtılmaya neden olan ve soyulma gerilmesi denen yanal normal gerilmeler oluşur. Zaten Şekil 2.5(j)'de görülen bağlantı şekli, birçok soyulma deneylerinin temelini oluşturmaktadır [90].

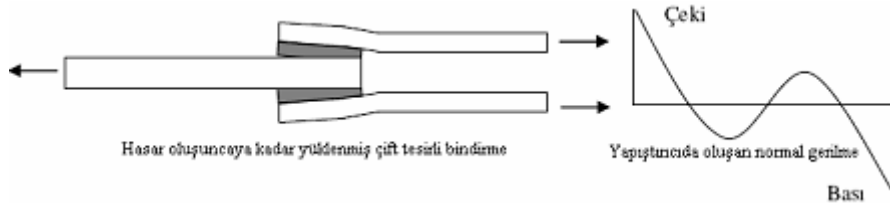
#### **2.4 Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilmeler**

Bir yapıştırma bağlantısına etki eden yükler farklı türde gerilmelere neden olur. Gerilmeler genel olarak  $N/mm^2$  (MPa) cinsinden ifade edilir. Yalnızca çekme veya yalnızca sıkıştırma yüklerinde, yapışma çizgisinde gerilim dağılımı düzgündür. Dolayısıyla yapışma çizgisinin her noktası aynı yükü taşır ve gerilimi hesaplamak için

etki eden kuvvet yapışma alanına bölünür. Gerçek hayatta, yalnızca çekme ve yalnızca sıkıştırma yükleri çok enderdir ve daha çok kesme, yarıma ve soyulma yükleriyle karşılaşılır. Ek yeri gerilme dağılımı, yani gerilmelerin yapışma çizgisindeki konumu, değişkendir ve hesaplaması daha zordur.



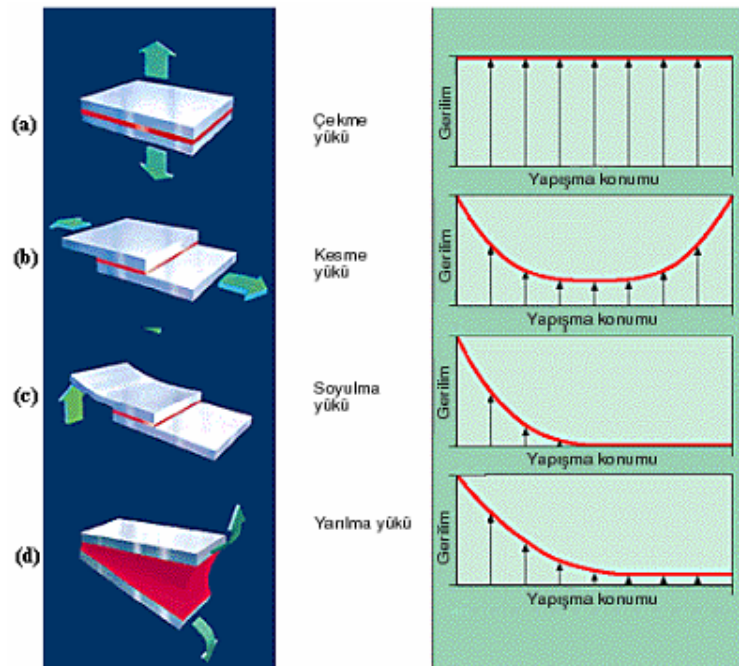
Şekil 2.7 Yüklenmiş haldeki tek tesirli bindirme bağlantısının deforme olmuş hali ve kayma gerilmesi dağılımı. (a) Rijit malzeme, (b) Elastik malzeme [90].



Şekil 2.8 Yüklenmiş haldeki çift tesirli bindirme bağlantısında ve yapıştırıcıda oluşan gerilmeler [90].

Kesme gerilmeleri, bazı noktalarda yoğunlaşmalar olacak şekilde yapışma yüzeyine dağılır. Yapışma alanının kenarları, orta noktaya göre daha yüksek gerilmeye dayanmak zorundadır. Bir ek yerine yarıma veya soyulma kuvveti uygulandığında, gerilimin çoğu bir kenarda yoğunlaşır. Ek yeri tasarımı, seçilen yapıştırıcıdan en yüksek verimi almakta en önemli parametredir. Tasarım, yapıştırıcının özelliklerine göre ayarlanmalı ve en tehlikeli yük şartları (soyulma, yarıma) engellenecek şekilde optimize edilmelidir. Şekil 2.9'da yapıştırıcı bağlantılarında meydana gelen dört önemli gerilmeyi oluşturan yükleme tipi ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 2.9(a)'da

görüldüğü gibi çekme yükü altında kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dik olarak etki etmektedir. Bu kuvvetlerden dolayı meydana gelen gerilme, yapışma alanına eşit şekilde dağılmaktadır. Ama bağlantıya sadece bu tür bir gerilmenin etkiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Eğer kuvvetler eksenden kaçık olarak etkimekte ise o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılma avantajı kaybolacak ve bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Önemli olan diğer bir nokta da yapıştırılan malzemenin kalın olması gerektiğidir. Maruz kaldığı yük etkisi ile yüksek oranda bir eğilme oluşmamalıdır. Eğer yüksek oranda bir eğilme oluşursa gerilme dağılımı bindirme boyunca eşit olmayacaktır [91].



Şekil 2.9 En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları [4, 99].

Kesme yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder (Şekil 2.9(b)). Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü artırarak ekonomiklik sağlar. Eğer mümkün ise bağlantılar yükün büyük bir kısmını kesme yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır. Bu tür gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 2.9(c)). Bu tür yüklemelerde bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı çabuk bozulacaktır. Mümkün oldukça bu tür yüklemelerden kaçınılmalıdır. Şekil 2.9(d)'de görülen yükleme, ekseriyetle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucudur. Önceki gerilmelerin aksine bu gerilme, yapışma alanına eşit olmayan şekilde etkimekte ve bağlantının bir tarafında

yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi karşılamak için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç vardır. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha fazla olduğu için bu tarz bağlantı tavsiye edilmez; çünkü maliyet artar [92].

## **2.5 Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözümeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması**

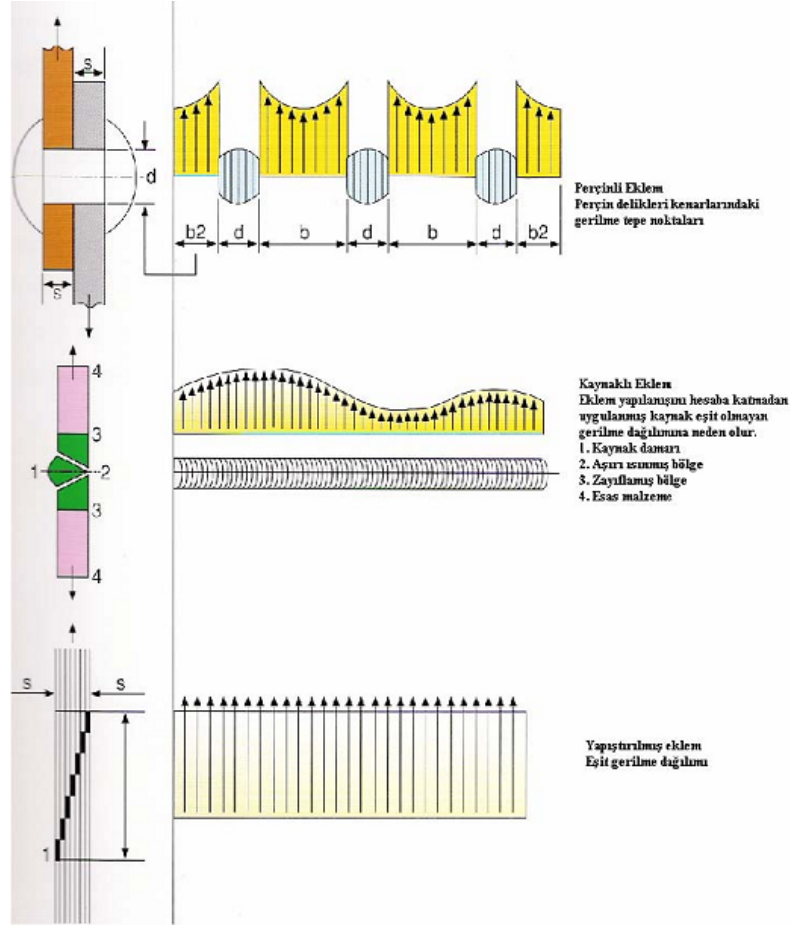
Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantıların tümünün yerini alacağı düşünülmesi yanlıştır. Bu alışılmış birleştirme tekniklerinin her biri farklı şartlar altında kendine özgü üstünlüklere sahiptir. Şekil 2.10'da perçin, kaynak ve yapıştırıcı bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları görülmektedir. Değişik birleştirme usullerinin belirli avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi izah ve mukayese edebilir [93-94].

### **2.5.1 Perçin bağlantıları**

Perçin bağlantılarında gerilme yayılımı düzgün değildir. Perçin delikleri kesiti küçültür ayrıca çentik etkisi nedeniyle deliklerin kenarlarında kritik gerilme uçları oluşur. Bindirme perçin bağlantılarında kuvvet tam ortaya etkilediği için ek olarak bir eğilme momenti de ortaya çıkabilir.

### **2.5.2 Kaynak bağlantıları**

Kaynak yoluyla parçalara uygun bir yerleştirme ve şekillendirme vererek, malzemelerden en iyi bir tarzda yararlanıp, iyi bir birleştirme yapmak mümkündür. Ancak kaynak işlemi sırasında malzemenin ergimesi ve daha sonraki soğuma şartları, malzemelerin içyapısındaki değişimler, iç gerilmelere ve düzgün olmayan gerilme dağılımlarına yol açar. Dolayısıyla da mukavemet değerlerinde bir azalma söz konusu olur. Farklı malzemelerin birbiriyle kaynak edilmesi de birçok sorunlar doğurur. Birleştirilecek malzemelerin her ikisinin de aynı tip olması durumunda kaynak mümkün olabilmektedir. Kaynak işlemi yüksek dayanımlı çeliklere ve metal alaşımlara özellikle tatbik edilebilir. Bunların da bazılarının kaynak edilebilme kabiliyetleri oldukça düşüktür ve bu nedenle uygulamada kaynak edilemezler.



Şekil 2.10 Kaynak, perçin ve yapıştırıcı birleştirmelerinde oluşan gerilme yığılımları [95, 99].

### 2.5.3 Lehim bağlantıları

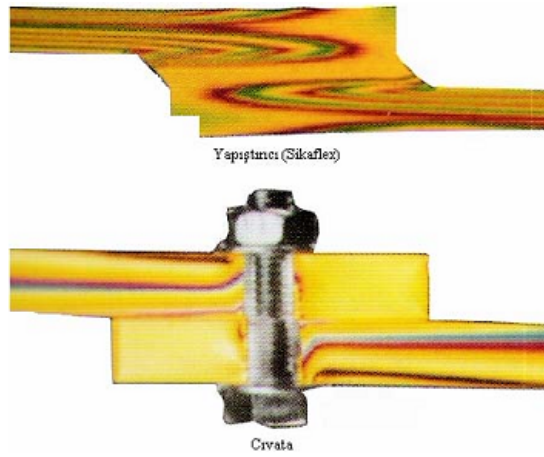
Lehimleme ile farklı malzemeleri birleştirmek mümkündür. Lehimleme sıcaklığı birleştirilen malzemenin ergime derecesinden daha düşüktür. Bununla birlikte sert lehimlemede içyapı değişimleri ortaya çıkabilir. Lehimlemede dekapan kullanıldığı için yüzeyler iyi temizlenmezse korozyon tehlikesi doğar. Benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde, örneğin çelik ve alüminyumun birleştirilmesinde olduğu gibi galvanik korozyon oluşabilir. Hafif metallerin lehimlenmesi de oldukça sorunludur. Lehimleme değişik tip pahalı malzemeleri gerektirir. Örneğin lehim en pahalı epoksi yapıştırıcıdan %30 daha pahalıdır.

### 2.5.4 Vida ve cıvata ile yapılan bağlantılar

Vidaların ve cıvataların tespiti için uygun deliklerin matkapla açılması veya darbe ile delinmesi gereklidir. Bu işlemler birleştirilecek parçaların zayıflamasına neden olur ve

ara boşlukların dolgu malzemeleri ile doldurulmasını gerektirir. Ayrıca bağlantılar yüklendiği zaman üniform olmayan gerilme bağlantıları ortaya çıkar (Şekil 2.11). Şöyle ki, delik çevresinde delinme diğer bölgelerdeki gerilmelerin kat kat üstünde bir değere erişir. Bu da yapıların ağırlığının artmasına neden olan daha kalın malzemelerin kullanımını gerektirir. Düzensiz gerilme dağılımları düşük yorulma dayanımlarına da sebebiyet verir.

Diğer olumsuzluklar ise kılcal ve mekanik temas korozyonu tehlikesi, yüzey düzgünlüğü, tekrarlı yükler altında yumuşamadır. Ayrıca, vidalar ve cıvatalar ile birleştirme genellikle yavaş ve emek tüketici bir işlemdir.



Şekil 2.11 Şeffaf ve ışığa duyarlı malzemelerden yapılmış yapıştırıcı ve mekanik birleştirmelerde gerilme dağılımı [95].

### 2.5.5 Sıkı geçme bağlantıları

Soğuk veya sıcak presleme usulü ile birleştirme sınırlı bir uygulamaya sahiptir. Bu işlem genellikle silindirik parçaların birleştirilmesinde kullanılır. Pahalı küçük toleranslı yüzey işlemleri gerektirir. Birleştirilen parçalar, neden olabilecek gerilmeler göz önüne alınarak boyutlandırılmak zorundadır.

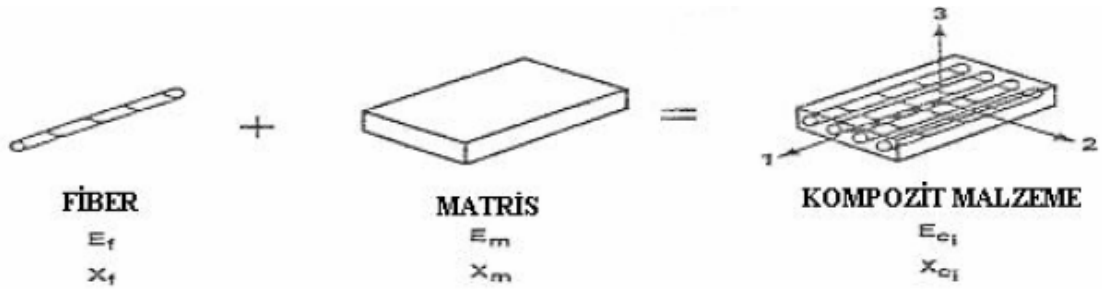
## BÖLÜM III

### KOMPOZİT MALZEMELER

#### 3.1 Tanım

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı özelliklerdeki iki yada daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirerek elde edilen malzemelere *Kompozit Malzemeler* denir (Şekil 3.1).

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunur. 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 3.1 Kompozit malzemenin temel şekli

#### 3.2 Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Malzeme kullanımı insanlıkla beraber başlamıştır. İlk devirlerde bugünkü gibi doğadaki direkt elde edilebilecek malzemeler kullanılabilirdi. İlk zamanlar, en basit malzeme çakmak taşı ve tahta kullanılmıştır. Hemen sonraları çamur-saman karıştırılıp tuğla olarak kullanılmaya başlanılmıştır. M.Ö. 2000 yıllarında bu durum çok iyiydi; çünkü



kesici alet olarak çakmak taşı ve sap yapı malzemesi olarak da en iyi tahta ve pişmiş toprak vardı. Metaller bilinmiyor, bilinse bile hammaddeden saflaştırıp kullanılamıyordu. Çamur içinde gömülmüş saman kurutularak çok iyi bir karma malzeme olabilmektedir veya ok yayı yapılırken üst üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar karma bir plaka oluşturlardı. Sonraları kâğıt olarak da papirüs kullanılmaya başlanmıştır.

Tarihi öneme, (ilk olarak) metallerde altın ile girmişlerdir. Çünkü ilk çağlarda altın Kolay işlenebilir olduğu için ilk kullanılan metal olmuştur. Belki de altının asaleti buradan gelmektedir. İşlemeciliğiyle beraber, bakır bronz sonrada demir kullanılmaya başlanmıştır. Demiri işlemeyi başaran insanoğlu artık malzeme bakımından gelişimi hızlandırmaya başlamıştır.

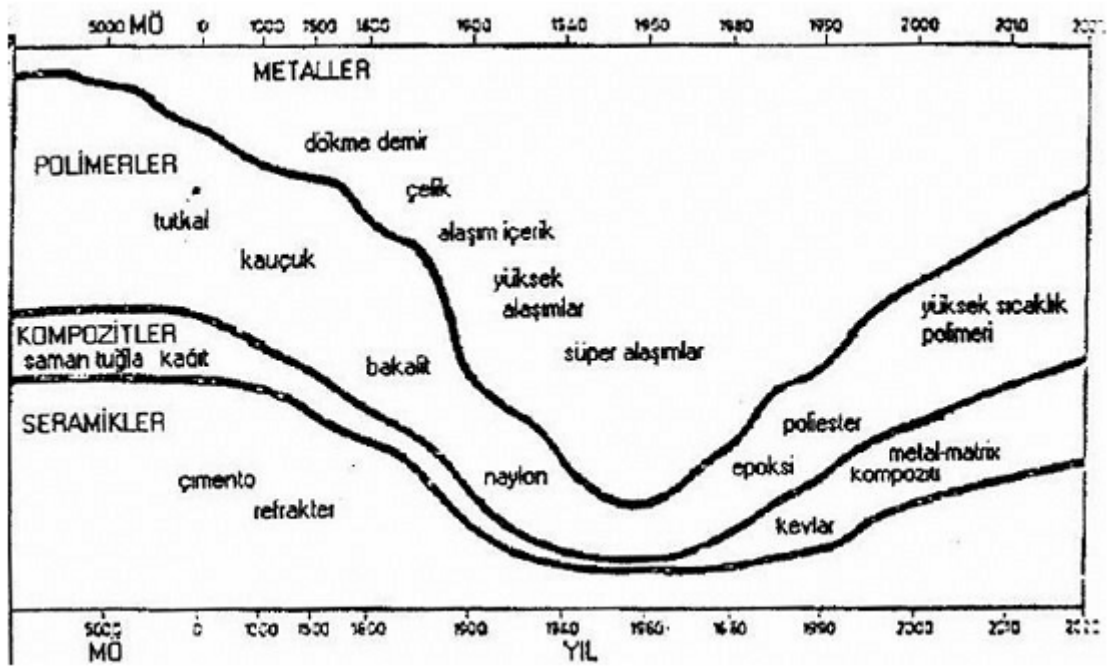
Bu devirlerde yapı malzemeleri ve bugüne kadar kullanılabilen malzemelerin önemi de çok büyüktür. Şöyle ki; Mısır Piramitleri ve tapınakları taştan yapılmışlar, bu sebepten o zamandan beri ayakta kalmışlardır. Oysa en az bunlar kadar görkemli olan Babil Kulesi gibi Mezopotamya Anıtları, çok daha dirençsiz bir malzeme olan tuğladan yapılmış olduklarından hemen hemen tamamen yok olmuşlardır.

İlk çağlara kadar bu klasik malzemeler kullanılmıştır. Farklı olarak, ilk denizcilerin bulduğu tahmin edilen camda bu malzemelere eklenmiştir. Tabii ki, ilk aşamada mühendislik malzemesi olarak bu kadar yaygın kullanılamamıştır. Ancak ev eşyaları vb.lerinin yapımında kullanılmıştır. Bu devirlerden başlayıp bugün bile kullanılan en önemli malzeme ise demir olmuştur. Demirin kullanımı ilk devirlerde çok üstünlük sağlamıştır. Örneğin, demirin işlenmesini bilen Hititler henüz demiri tam manasıyla öğrenemeyen birçok devlete karşı uzun süre efsanevi üstünlük kurmuştur.

İsraililer çamur ve samanla tuğla yaparak, ortaçağda askerler kılıçlarını sağlamlaştırarak, Mısırlılar kontrplağı yaparak vb. günümüze değin önemi gittikçe artan kompozit malzemeyi o zamanlardan kullanmaya başlamışlardır.

İlkçağdan itibaren, metal yapımı, işlenmesi, saflaştırılması, dökümü vb. geliştirilmeye başlandı. Artık günümüze kadar 1. malzeme sınıfı metaller oldu. Seramikler ve karma malzemeler ikinci aşamaya kaldı. Gerçi bu metallerde karma metaller olarak kompozit

sınıfına bir açıdan girmektedir. Seramik olarak bu devirlerde en önemli kesit, çimentonun yapı malzemesi olarak kullanılmasıdır. M.S. 1000 yıllarında gelişen çimentoyla dökme demir, aynı zamanda da imali rast gelmektedir. Şekil 4.1' den görüldüğü üzere tuğla-kağıt-samandan başka gerçek anlamda kompozit malzeme geliştirilmemiştir. Zaten ihtiyaçta pek yoktur.



Şekil 3.2 Malzemelerin tarihsel gelişimi

XX. yüzyıla gelindiğinde, o ana kadar metallere çelikler, alaşımlar, yapıştırıcılar, lastikler, bakalitler polimer olarak seramiklerden Portland çimentosu, ısıl refrakterleri vb. geliştirilmiştir. Buraya kadar anlaşılmaktadır ki ilk çağda XX. Yüzyıl başına kadar kompozit malzemelerde fazla bir artma olmamıştır. Geliştirilen kompozitler pahalı olduğu için o güne kadar daima daha ucuz, daha güvenli, daha mukavim vb. malzemeler yapılabilmektedir.

Havacılığın I. Dünya Savaşı sonrası ve devrim olarak II. Dünya Savaşı sonrasında hızla gelişmesiyle havacılıkta malzemeye olan ihtiyacın türü değişmeye başladı.

Kompozitler önce uçak, sonra uzay yapılarında kullanılmaya başlandı. Dizayn olarak oldukça yüksek bir yapısal verim mukavemet/ağırlık oranının çok yüksek olmasının istenmesi klasik malzemelerde yetersiz bir verim elde edildi. Dolayısıyla kompozit malzemeler bu amaç için en uygun malzemelerdi.

Karma yapı malzemesi olarak en önemli yapı malzemesi betondur. “Beton” sözcüğü Hitit-Avrupa kökenli Bitume’den gelmektedir ki, karışım anlamına gelmektedir. İlk bulunduğu günümüze kadar çok aşama geçirmiştir. Birçok çeşitleri ve kat kat mukavemet üstünlükleri ortaya çıkmıştır. 1930’lardan sonra ve özellikle II. Dünya Savaşı sıralarında betonarme ve ön gerilmeli beton türleri meydana çıkmıştır. Bunların sonunda günümüzde kat kat üstün özellikli betonlar kullanılmaktadır.

Metallerde son yıllarda işleme ve kontrolü daha yüksek kaliteli ve gelişimi yavaş malzeme olarak cam-metaller, Al-Li alaşımları, çift yüzlü çelikler, mikro alaşımlı çelikler ve yeni süper alaşımlı çelikler geliştirilmeye başlanmıştır. Polimerler, yüzyıl başında naylonun gelişmesiyle ön plana çıkmıştır ki, bunların en önemlileri plastiklerdir. Son yıllarda ise Acrylics, epoxy’ler ve polyesterler çok büyük kullanım alanı bulmuşlardır. Seramiklerde, çimentodan sonra sermetler-ısıt seramikler,  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ , PsZ, vb. tür seramik çeşitleri geliştirilmeye başlanmıştır.

1950’li yıllardan sonra, özellikle çok hızlı gelişim gösteren bir dalda biyomalzemelerdir. Polimerler, metal alaşımları, seramikler vb. birçok tıp dalında kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle yapay organların yeni protezlerde kullanımı çok artmıştır. Tabii bu dal çok üstün mühendislik-malzeme ve tıp eğitimi isteyen bir daldır.

Metallerin, seramiklerin ve polimerlerin gelişmesi dolayısıyla, bunların daha üstün ve daha çok çeşitli özelliği bir arada toplayan malzeme olarak kompozit malzemelerin gelişimi de çok hızlandırılmıştır. Adeta patlama safhasına varmıştır. Havacılığında gelişiminin hızlanması kompozit malzemeye havacılıkta en çok kullanılan malzeme durumuna getirmiştir. Havacılıkta özellikle hava-uzay yapı elemanlarında kullanılan kompozitler klasik tür karma malzemeden ayrıldığı için bunlara “Advanced composite materials” yani ileri kompozit malzemeler denmiştir. Son 10 yılda patlarcasına bir gelişme göstermiştir. Bu zamanlar GFRD-Glass Fiber Reinforced Plastics (Cam elyafı plastik malzemeler), CFRR-Carbon Fiber Reinforced Plastics (Karbon fiber takviyeli plastik malzemeler), Kevlar (RP-4) geliştirilmiştir.

Son bir kaç yılda kullanılan en önemli kompozit malzeme türü ise metal-matrisli kompozit malzemedir. Özellikle çok yüksek mukavemet/ağırlık oranı isteyen uçaklarda

aşırı derecede kullanılır olmuştur. Bunun yanında seramik kompozitlerde umut verici gelişmeler gözükmemektedir.

### 3.3 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

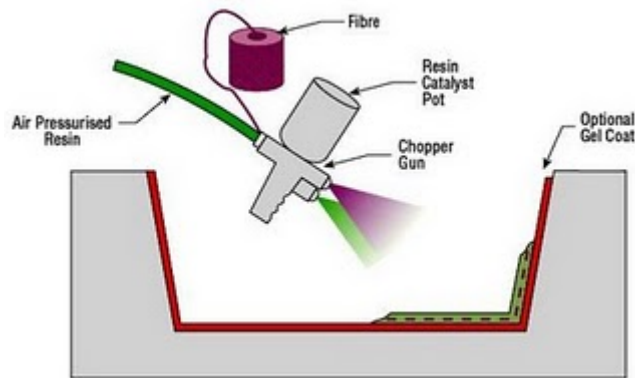
#### 3.3.1 Elle yatırma (hand lay-up) yöntemi

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır.

Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksinin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.

#### 3.3.2 Püskürtme ( spray-up) yöntemi

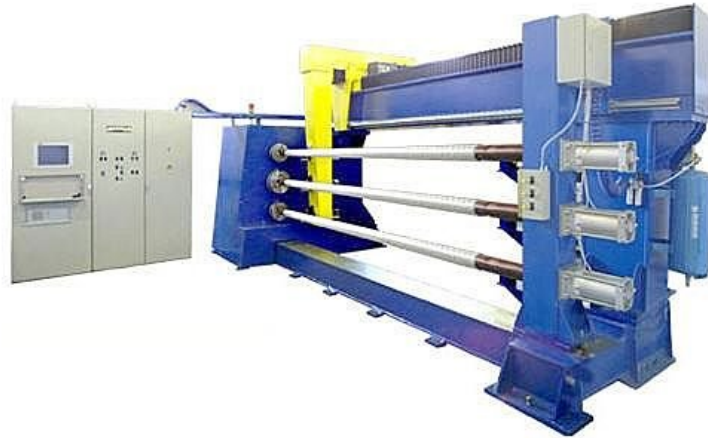
Püskürtme yöntemi elle yatırma yöntemini aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Püskürtme yöntemi

### 3.3.3 Elyaf sarma (filament winding) yöntemi

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır (Fotoğraf 3.1). Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır.



Fotoğraf 3.1 Elyaf sarma makinası

### 3.3.4 Reçine transfer kalıplama RTM / reçine enjeksiyonu yöntemi

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunluk jel kotlu veya jel kotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır.

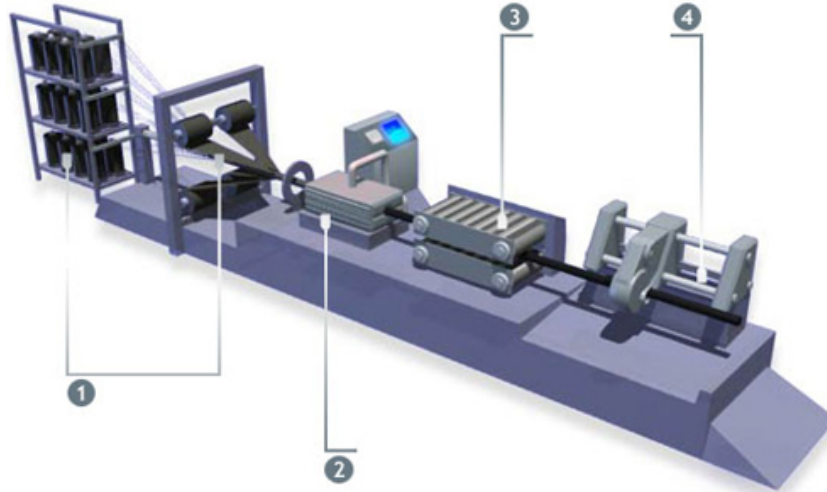
Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C' ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin

elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır.

### 3.3.5 Profil çekme / pultrüzyon (pultrusion) yöntemi

Pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir (Şekil 3.4). Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır.

Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir.



Şekil 3.4 Profil çekme yöntemi (1-Takviye elemanı 2-Çekme kalıbı 3- Çekme ünitesi 4-Dikiş ünitesi)

### 3.3.6 Hazır kalıplama / compression molding (SMC, BMC) yöntemi

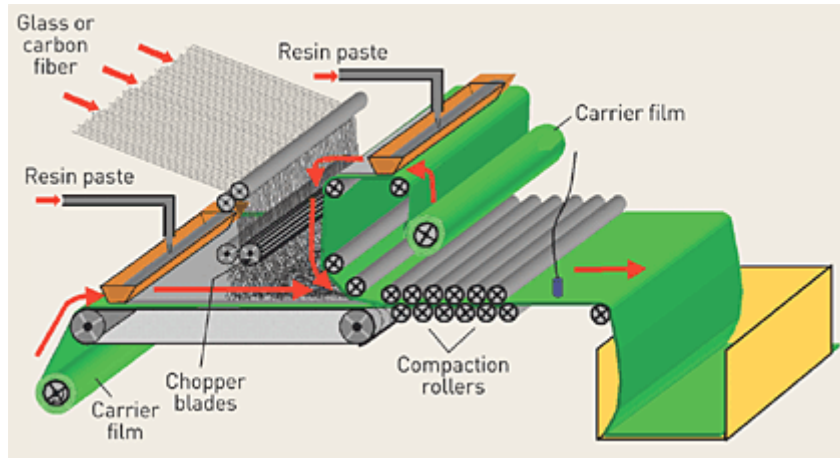
Hazır kalıplama bünyesinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin (SMC, BMC) sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir.

Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karmaşık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır.

Hazır kalıplama yönteminde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır;

### 3.3.6.1 Hazır kalıplama pestili / SMC (Sheet Moulding Composites)

SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1 m genişliğinde ve 3 mm kalınlığında üretilir.



Şekil 3.5 Hazır kalıplama yöntemi

### 3.3.6.2 Hazır kalıplama hamuru / BMC (Bulk Moulding Composites)

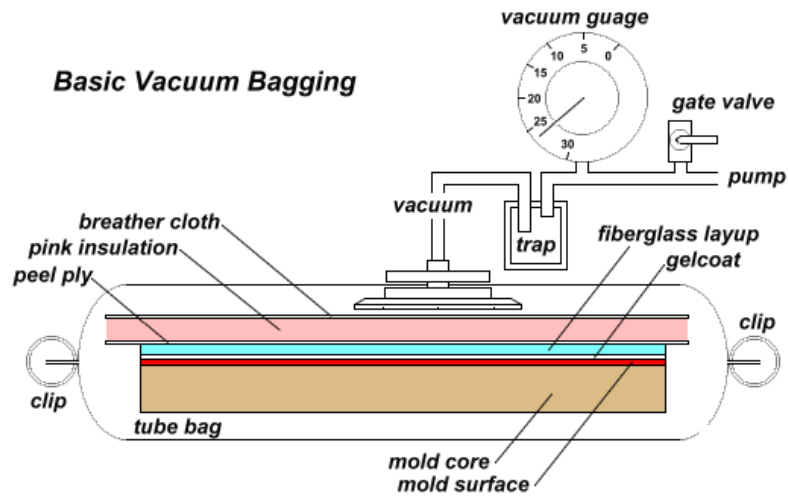
BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir. Hazır kalıplama bileşimlerinin avantajları;

- Çok geniş tasarım esnekliği
- Düzgün yüzey
- Kolayca laklanabilme, boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi
- Geri dönüştürülebilme ve hazırlığında geri dönüşümü malzeme kullanabilme
- Metal gömme parçaların yerleştirilmesi ile montaj kolaylığı
- Yüksek alev dayanımı
- Sıcaklık dayanımı
- Soğukta kırılman olmalı enjeksiyon kalıplama (injection moulding)

### 3.3.7 Vakum bonding/ vacuum bagging yöntemi

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir.

Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de vakum bagging yöntemi kullanılmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Vakum bagging yöntemi



### 3.3.8 Otoklav / autoclave bonding yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması için malzemeyi yüksek ısı ve basınca uygulayarak sağlanabilir. Vakum bagging yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat 1 atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur (Fotoğraf 3.2).

Bu uygulama için, otoklav yönteminde de uygulanan ve karmaşık şekillerde en çok kontrol edilebilen metot, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir.

Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Vacuum bagging yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır.



Fotoğraf 3.2 Otoklav makinesi

### 3.4 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, metal malzemelere göre birtakım avantajlara sahiptirler. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hafiflik gerektiren konstrüksiyonlarda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin

korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Aşağıda bu malzemelerin avantajlı olan ve olmayan yanları kısaca ele alınmıştır.

- *Yüksek Mukavemet:* Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemeden tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.
- *Kolay Şekillendirebilme:* Büyük ve kompleks parçalar tek işleme bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.
- *Elektriksel Özellikler:* Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
- *Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet:* Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.
- *Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı:* Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.
- *Kalıcı Renklendirme:* Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek masraf ve işçilik gerektirmez.
- *Titreşim Sönümlendirme:* Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürütmesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellik gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Kompozit malzemelerin iyileştirilebilecek özellikleri maddeler halinde sıralayacak olursak;

- Mukavemet
- Rijitlik
- Korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Görünüm güzelliği
- Ağırlık
- Yorulma ömrü

Yukarıda sayılan bu özelliklerin hepsi aynı anda sağlanamaz. Kullanım yerine göre gereken özellikleri sağlayan uygun kompozit malzemenin seçimi ve üretimi yapılır.

## BÖLÜM IV

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 4.1 Malzeme Temini

Çalışmada yapışan malzeme olarak kullanılan cam elyaf takviyeli kompozit levhaların üretimi İzoreel firmasında yapılmıştır. Bağlantıda kullanılan yapıştırıcı Purteks A.Ş.'den temin edilmiştir. Toplam malzeme içindeki fiber hacim oranı yaklaşık olarak %60'tır ve kompozit malzeme  $[0]_{10}$  düzeninde on katmandan oluşmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan fiberler E camı olup, matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Bağlantıda kullanılan yapıştırıcı, EL-2210 reçine ile EH-2910 sertleştiricinin ağırlıkça %40 oranında homojen bir biçimde karıştırılması ile hazırlanmıştır. Kompozit levhaların ve bağlantıda kullanılan yapıştırıcının mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kompozit plakaların ve yapıştırıcının özellikleri [96, 98]

Malzeme	Mühendislik Sabitleri	Mukavemet Değerleri
<b>Kompozit</b>	$E_1=119$ GPa	
<i>Tabaka dizilişi: <math>[0]_{10}</math></i>	$E_2=9.28$ GPa	
<i>Tabaka kalınlığı: 0.224 mm</i>	$E_3=9.28$ GPa	
<i>Nominal kalınlık: 2.24mm</i>	$G_{12}=G_{13}=4.64$ GPa	
	$G_{23}=2.93$ GPa	Z=49 MPa
	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.34$	S= 89 MPa
	$\nu_{23}=0.59$	
<b>Yapıştırıcı</b>	$E=2.8$ GPa	$Y_t=65$ MPa
	$\nu=0.4$	$Y_c=84.5$ MPa

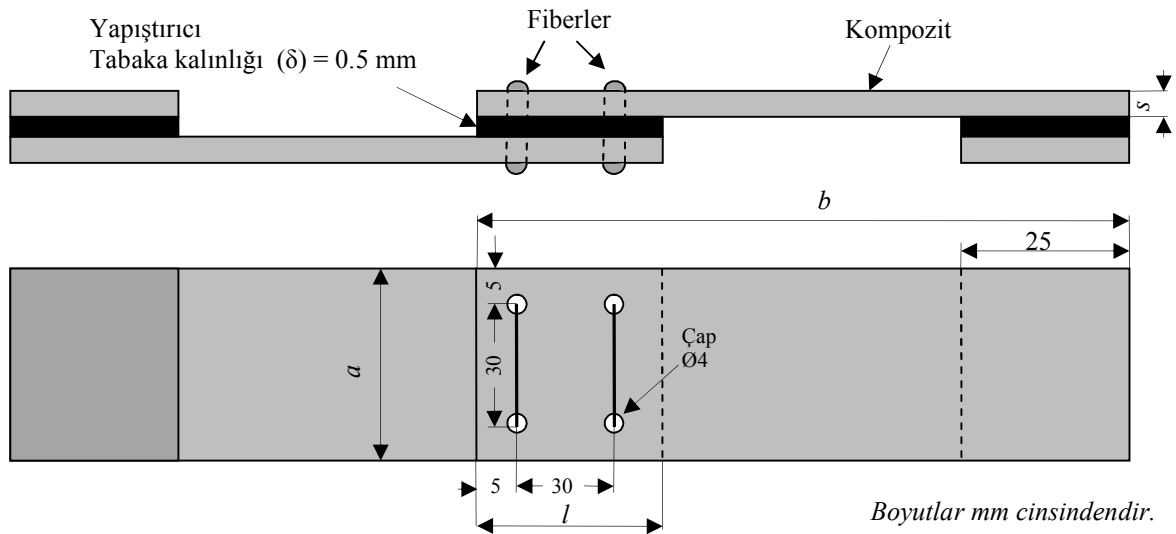
#### 4.2 Yüzey Hazırlama

Yüzey hazırlama işlemi, bağlantının mukavemeti direkt olarak etkilediği için önemli bir aşamadır. Bağlantının tam olarak potansiyelini elde etmek için yüzey hazırlama işlemi doğru olarak yapılmalıdır. Doğru olmayan yüzey hazırlama işlemi, bağlantıda beklenmeyen hasarların oluşmasına neden olabilir. Yüzey hazırlığının temel amacı, bindirme bölgesindeki kirlerin yok edilmesi ve yapıştırma yüzey alanının artırılmasıdır. Yüzey hazırlama işlemi ASTM D 2093-97 [100] standardına uygun olarak yapılmıştır. Yapıştırılacak yüzeyler, aşağıdaki adımlar takip edilerek hazırlanmıştır.

- Numuneler önce çok hassas biçimde markalanıp delikleri delindi. (B ve C tipi bağlantılar için)
- Yapıştırılacak yüzeyler temiz bir bezle silindi.
- Yapışacak yüzeyler çok ince bir zımpara ile zımparalandı.
- Zımparalanan yüzeyler asetonlu bez ile silinerek temizlendi.
- Son olarak yüzeyler kuru bir bezle silinerek yapıştırılmaya hazır hale getirildi.

### 4.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

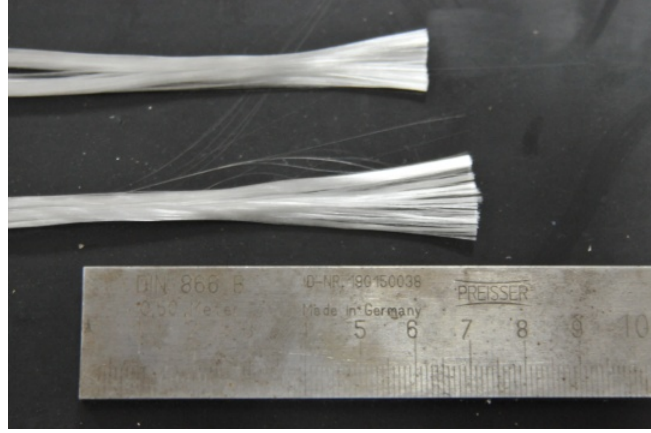
Deney numuneleri üç farklı şekilde hazırlanmıştır (A tipi, B tipi ve C tipi). A tipi bağlantı tek tesirli yapıştırma bağlantısıdır. B ve C tipi bağlantı sistemleri ise yapışan malzemelere delikler açılarak içine cam elyaf yerleştirilmesi ile üretilmiştir. Şekil 4.1’de cam elyaf takviyeli yapıştırma bağlantısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Cam elyaf takviyeli yapıştırma bağlantı sistemi

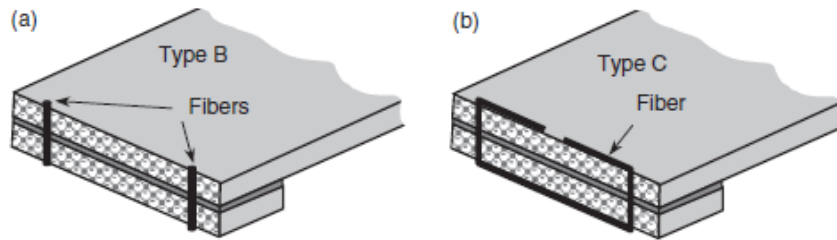
Deneylerde kullanılan kompozit plakalar  $axbxs=40x140x2.24 \text{ mm}$  boyutlarındadır. Yapıştırma bölgesinin uzunluğu ( $l$ )  $40 \text{ mm}$ 'dir. Delikler delindikten sonra yüzey hazırlığı işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fiberler (Fotoğraf 4.1) deliklerden geçirilip  $0.5 \text{ mm}$  kalınlığındaki yapıştırıcı ile yapıştırılarak B tipi bağlantı elde edilmiştir (Şekil 4.2(a)). C tipi bağlantı ise, B tipinde kullanılan cam fiberlerin, deliklerden geçirildikten sonra eğilip kompozit plakaların üzerine sabitlenmesi ile üretilmiştir (Şekil 4.2(b)). Gerekli basınç, yapıştırıcı kalınlığını değiştirmeden, fazla

yapıştırıcının uçlardan çıkmasını sağlayan klipsler kullanılarak uygulanmıştır. Daha sonra dışarı çıkan bu yapıştırıcı temizlenmiştir.



Fotoğraf 4.1 Cam fiberler

Plakaların uçlarına, yapıştırıcı tabakada yüksek soyulma gerilmelerine ve üniform olmayan kayma gerilmeleri oluşturan eğilme momentlerinin oluşmasına neden olan yükleme doğrultusunun eksantrikliğini azaltmak için 25 mm uzunluğunda kompozit plakalar kesilerek yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı üreticisinin tavsiyesi doğrultusunda, bağlantının maksimum mukavemete ulaşması için numuneler oda sıcaklığında 7 gün bekletilmiştir. Hazırlanan deney numuneleri Fotoğraf 4.2’de gösterilmiştir. Yapıştırıcının kürleşmesinden sonra klipsler çıkarılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

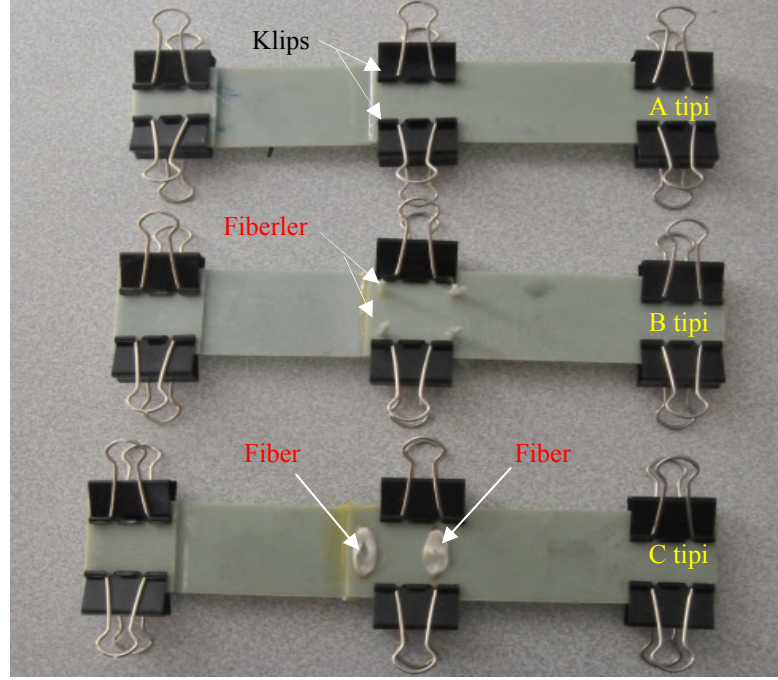


Şekil 4.2 (a) B tipi bindirme bağlantısı (b) C tipi bindirme bağlantısı

#### 4.4 Deneyin Yapılışı

Deneyler, Niğde Üniversitesi İmalat ve Konstrüksiyon laboratuvarında bulunan 100kN’luk Shimadzu model fırınlı çekme cihazında gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 4.3). Deneyler ASTM standartına göre üç farklı bağlantı türü için oda sıcaklığında ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ),  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  ve  $80^{\circ}\text{C}$ ’de kopma meydana gelene kadar çekilmiştir. Oda sıcaklığı testleri fırın olmadan gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık testlerinde, numuneler yük uygulanmadan

önce fırın içerisinde 10 dakika bekletilmiştir. Her bağlantı türü ve sıcaklık için üçer numune test edilmiştir. Çekme işlemi 1.5 mm/dakika hızla gerçekleştirilmiştir. Deneyde alttaki çene sabit, üstteki çene hareket etmektedir. Hata oluşumunu engellemek için bağlantının serbest uçları çekme cihazının çenelerine tutturulurken eşit basınç uygulanmaya çalışılmış ve eksenlemeye dikkat edilmiştir. Ortamın neminin malzemelerin özelliklerine etki etmediği kabul edilmiştir.



Fotoğraf 4.2 Düz yapıştırırmalı (A tipi) ve cam elyaf takviyeli yapıştırma sistemleri (B ve C tipi)



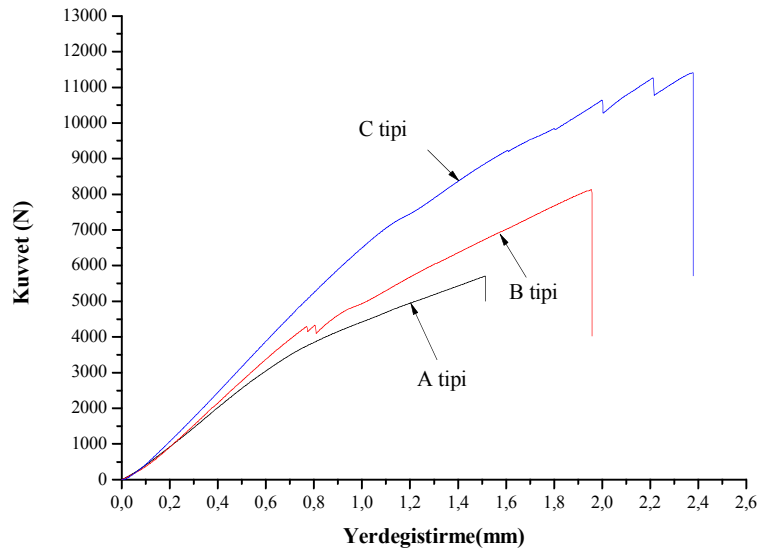
Fotoğraf 4.3 Deney düzeneği

Bağlantılar test edilirken, hasar yükleri ve yer değıştirme değeri bilgisayarla otomatik olarak kaydedilmiştir. Daha sonra üç numunenin hasar yüklerinin ortalaması alınmıştır ve aşağıdaki formülle bağlantının ortalama kayma dayanımı hesaplanmıştır.

$$\tau_a = \frac{F_{average}}{a.l} \quad (4.1)$$

#### 4.5 Sonuçlar ve Tartışma

A, B ve C tipi bağlantıların yük-yer değıştirme eğrisi ve bağlantı mukavemeti üzerindeki etkisini görmek amacıyla, deney numunelerinin yük-yer değıştirme eğrileri Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Eğriler, üç farklı bağlantı türü için oda sıcaklığındaki çekme deneyi sonuçlarından elde edilen verilerden oluşturulmuştur.



Şekil 4.3 A, B ve C tipi bağlantı sistemleri için yük-yerdeğıştirme eğrileri

Şekilde görüldüğü gibi, tüm bağlantı türleri için eğrilerin başlangıç eğimleri yaklaşık olarak eşittir. Daha sonra, eğrilerin bağlantı türlerine göre farklı davrandığı görülmektedir. A tipi bağlantı için, yük, yer değıştirme ile yaklaşık olarak lineer olarak arttığı ve bağlantının belirli bir yük değeriinde aniden koptuğu görülmektedir. B tipi bağlantıda, 4-5 kN aralığında bağlantının rijitliğinin düşmesine neden olan mikro-hasarların oluştuğu görülmektedir. Fakat bu noktada takviye elemanı cam fiberler yük taşımaya devam etmektedir. Belirli bir yer değıştirmeden sonra, bağlantı aniden



kopmaktadır. C tipi bağlantı için, yük eğrisinin düşmeye başladığı noktada adhezyon hasarları oluşmaya başlamıştır. Ancak, fiberler yük taşımaya devam etmekte ve bağlantı tekrar kendini toparlayarak daha fazla yük taşımaya devam etmektedir. Belirli bir yerdeğiştirme miktarında sonra, bağlantı aniden kopmaktadır.

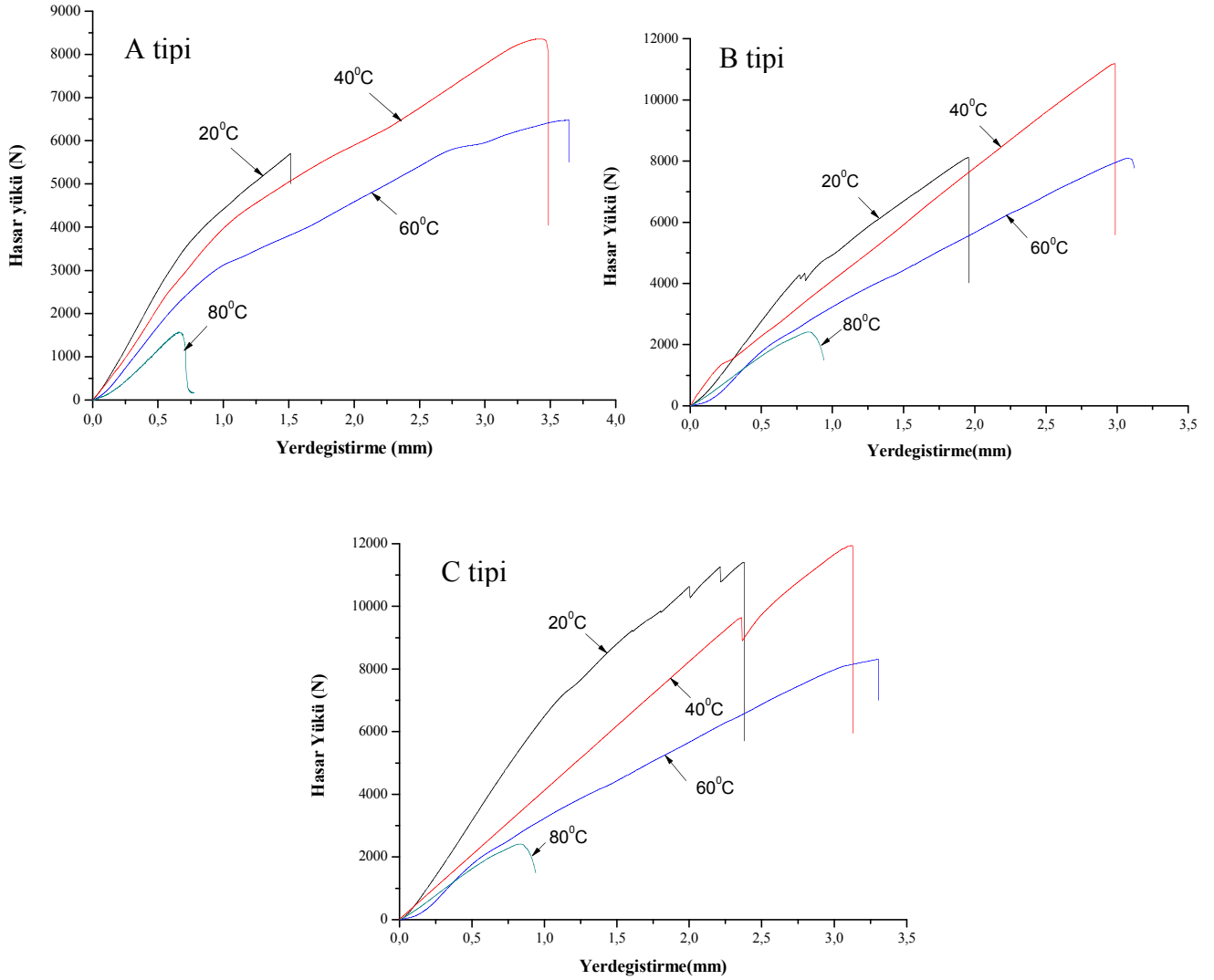
Çizelge 4.2 Bağlantı türleri için hasar yükü ve yerdeğiştirmeler

	A tipi		B tipi		C tipi			
	Hasar Yükü (kN)	Yer değiştirme (mm)	Numune	Hasar Yükü (kN)	Yer değiştirme (mm)	Numune	Hasar Yükü (kN)	Yer değiştirme (mm)
<i>1-1</i>	5.71	1.51	<i>2-1</i>	10.17	2.75	<i>3-1</i>	11.40	2.38
<i>1-2</i>	4.55	1.29	<i>2-2</i>	8.04	1.96	<i>3-2</i>	11.89	3.29
<i>1-3</i>	4.83	1.37	<i>2-3</i>	9.07	1.98	<i>3-3</i>	10.95	2.36
<i>Ortalama</i>	5.03	1.39	<i>Ortalama</i>	9.09	2.23	<i>Ortalama</i>	11.41	2.67

Çizelge 4.2’de oda sıcaklığında üç farklı bağlantı türü için maksimum hasar yüklerini ve yer değiştirmelerini göstermektedir. A tipi bağlantı için ortalama hasar yükü 5.03kN ve ortalama maksimum yer değiştirme 1.39 mm’dir. Hasar yükleri ve yer değiştirme değerleri değişiklik göstermektedir. Ortalama hasar yükü değerinden maksimum sapma %14 olarak hesaplanmıştır. B tipi bağlantıda hasar yükleri 9.07 kN ile 10.17 kN arasında değişmektedir ve hasar yüklerinin ortalaması 9.09 kN’dur. Yer değiştirmeler 1.98 mm ile 2.75 mm arasında değişmekte olup ortalaması 2.23 mm’dir. C tipi bağlantı sistemlerinde ise ortalama hasar yükü ve yer değiştirme sırasıyla 11.41 kN ve 2.67 mm’dir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi A tipi bağlantının dayanımı en düşüktür. Bunun nedeni bağlantıya etkiyen aynı doğrultu üzerinde olmayan kuvvetler ve sonucunda oluşan düzlem dışı yapışan malzeme deformasyonu ve soyulma gerilmeleridir. Yapıştırma bağlantısı tasarımcılarının en büyük düşmanı olan soyulma gerilmeleri, bağlantıda çatlak başlangıcına neden olmaktadır.

Maksimum hasar yükü, sırasıyla B ve C tipi sistemlerde artmaktadır. Bu bağlantılarda deliklere yerleştirilen cam fiberler soyulma gerilmelerinin oluşmasını engeller ve çatlakın yayılmasını azaltarak bindirme bölgesinin yük taşımaya devam etmesini sağlar. B ve C tipi bağlantılar, A tipi sistemlerle kıyaslanırsa bağlantı mukavemetinde sırasıyla %80.7 ve %127’lik bir iyileştirme sağlamaktadır. Bir diğer önemli nokta ise, maksimum ortalama yerdeğiştirme değerleri fiberle güçlendirilmiş B ve C tipi bağlantılarda A

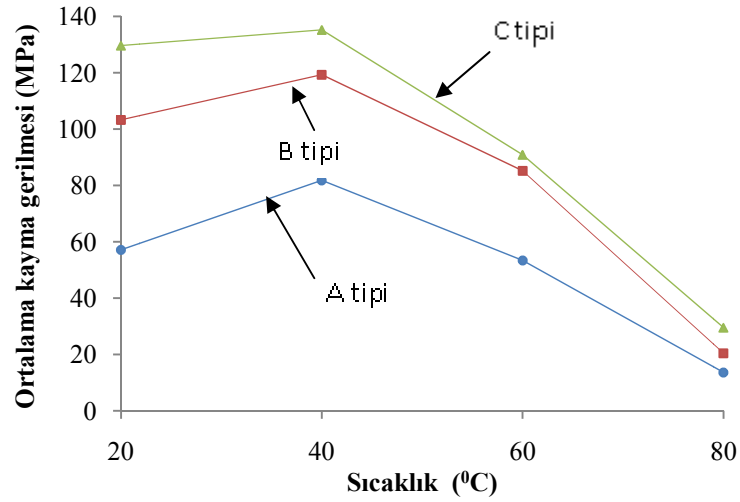
tipine kıyasla sırasıyla %60 ve %92 oranında artmaktadır. Fiber takviyeli bağlantıların hasar toleransı daha fazladır ve bu bağlantılar daha büyük hasar uzamalarına dayanabilmektedir. Şekil 4.4’de farklı sıcaklıklar ve bağlantı türleri için yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.4 A, B ve C tipi bağlantı sistemleri için yük-yerdeğiştirme eğrilerinin sıcaklıkla değişimi

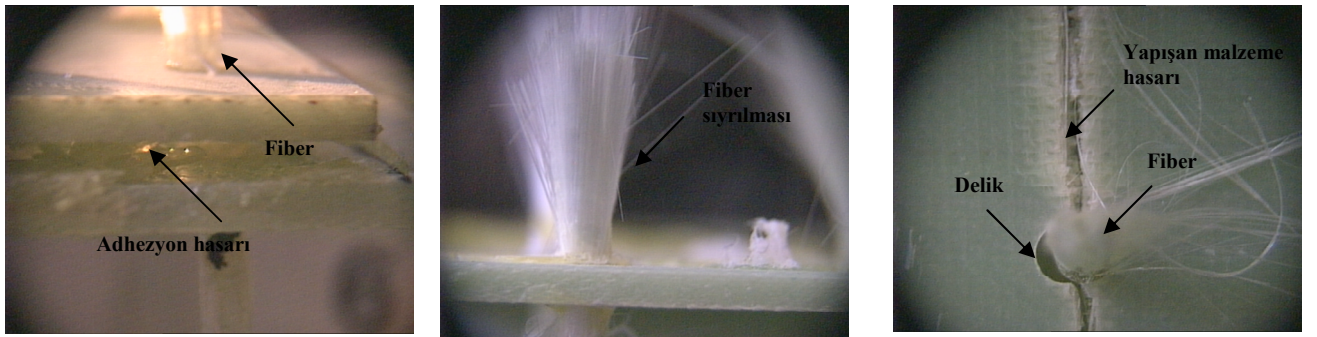
Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, sıcaklık 20<sup>0</sup>C den 40<sup>0</sup>C’ye yükseldiğinde hasar yükü ve yer değiştirme değerleri artış göstermektedir. Sıcaklık 40<sup>0</sup>C’den 60<sup>0</sup>C’ye yükseldiğinde hasar yükleri azalırken yer değiştirmelerde artış gözlemlenmiştir. A tipi bağlantı için 80<sup>0</sup>C’de yapıştırıcının yumuşaması nedeniyle hasar yükleri önemli ölçüde düşmektedir. B ve C tipi bağlantılarda da benzer durum gözlemlenmiştir fakat cam fiber ile

güçlendirmenin etkileri hala gözlemlenebilmektedir. B tipi bağlantılarda oda sıcaklığında gözlemlenen ani yük düşümleri daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelmemektedir. C tipi bağlantılarda ise 40<sup>0</sup>C'ye kadar ani yük düşmeleri gözlemlenebilmektedir. 80<sup>0</sup>C'de B ve C tipi bağlantıların yük-yer değiştirme eğrilerinin davranışı aynıdır fakat C tipi bağlantının ortalama hasar yükü daha büyüktür. Şekil 6.5'de farklı bağlantı türleri için (6.1) formülüyle hesaplanan ortalama kayma gerilmeleri sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

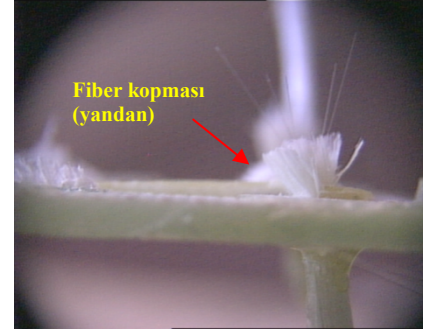
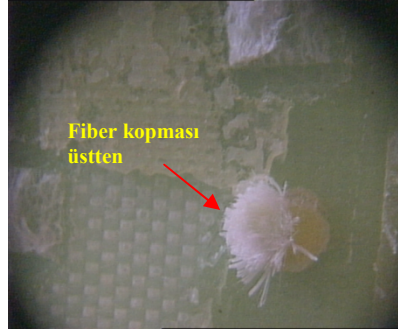
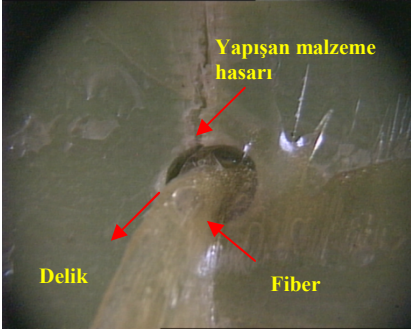


Şekil 4.5 A, B ve C tipi bağlantı sistemleri için ortalama kayma gerilmesinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, ortalama kayma gerilmesi değerleri sıcaklık 20<sup>0</sup>C'den 40<sup>0</sup>C'ye yükseldiğinde artış göstermektedir. 40<sup>0</sup>C'nin üstündeki sıcaklıklarda gerilme değerleri düşüş göstermektedir. Tüm deney sıcaklıklar için, A tipi bağlantı en düşük mukavemete ve C tipi bağlantı en yüksek mukavemete sahiptir.



Fotoğraf 4.4 B tipi bağlantılarda oluşan hasarlar



Fotoğraf 4.5 C tipi bağlantılarda oluşan hasarlar

Deneylerden sonra, numunelerin uğradığı hasarlar görsel olarak mikroskopla incelenmiştir. Fotoğraf 4.4 ve Fotoğraf 4.5’de B ve C tipi bağlantılarda oluşan hasarların mikroskopla çekilmiş resimleri gösterilmiştir. Numunelerin çoğu hafif katstrofik hasar şeklinde bir ses çıkararak hasara uğramıştır. B ve C tipi bağlantılarda ilk hasar yapıştırıcı bölgesinde meydana gelmektedir. B tipi bağlantıda hasar yükü noktasında fiberler yapışanlardan sıyrılır. Bu hasar diğer test sıcaklıklarında da gözlemlenmiştir. C tipi bağlantıda yük arttığında, fiberler soyulma gerilmelerinin oluşmasını engeller bu nedenle B tipi bağlantıda oluşan hasar bu bağlantı türünde görülmez. Ancak, yükün artmasıyla birlikte C tipi bağlantıda fiber kopma hasarı görülmektedir. B ve C tipi bağlantılarda 40<sup>0</sup>C’de en yüksek gerilmelerin oluştuğu sıcaklıkta-delik çevresindeki gerilme yığılmaları nedeniyle bu bölgede yapışan malzeme hasarı gözlemlenmiştir.

## BÖLÜM V

### ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR HASAR ANALİZİ

#### 5.1 Giriş

Bu bölümde, A ve B tipi bağlantıların ANSYS 11.0 yazılımı kullanılarak yapılan üç boyutlu hasar analizi yapılmış ve analizin aşamaları adım adım anlatılmıştır. Deneylerde kullanılan kompozit levhaların, yapıştırıcının ve B tipi bağlantıda delik içerisinde takviye elemanı olarak kullanılan E glass 2400 tex fiberlerin mekanik özellikleri literatürden alınmıştır. Bu malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Kompozit plakalar  $[0]_{10}$  fiber dizilişinde olup, her tabaka 0.224 mm kalınlığındadır. Kompozit plakalar ve yapıştırıcı malzemenin elastik olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 5.1 Kompozit plakaların, yapıştırıcı ve fiberlerin özellikleri [96-98]

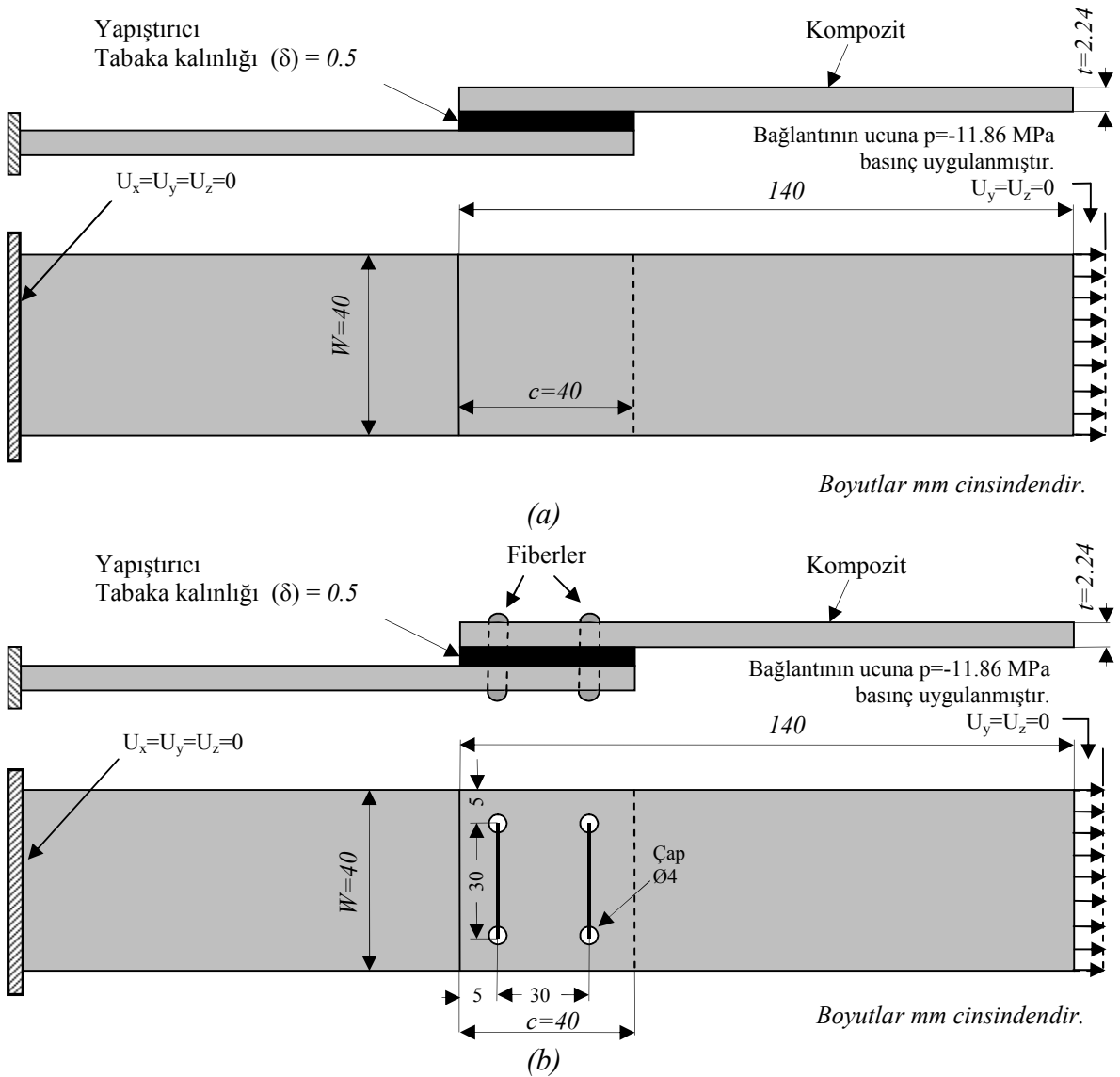
Malzeme	Mühendislik Sabitleri	Mukavemet Değerleri
<b>Kompozit</b> <i>Tabaka dizilişi: <math>[0]_{10}</math></i> <i>Tabaka kalınlığı: 0.224 mm</i> <i>Nominal kalınlık: 2.24mm</i>	$E_1=119$ GPa $E_2=9.28$ GPa $E_3=9.28$ GPa $G_{12}=G_{13}=4.64$ GPa $G_{23}=2.93$ GPa $\nu_{12}=\nu_{13}=0.34$ $\nu_{23}=0.59$	$Z=49$ MPa $S=89$ MPa
<b>Yapıştırıcı</b>	$E=2.8$ GPa $\nu=0.4$	$Y_t=65$ MPa $Y_c=84.5$ MPa
<b>E glass 2400 tex</b>	$E=72000$ MPa $G=30000$ MPa $\nu=0.2$	

#### 5.2 Problemin Tanıtılması

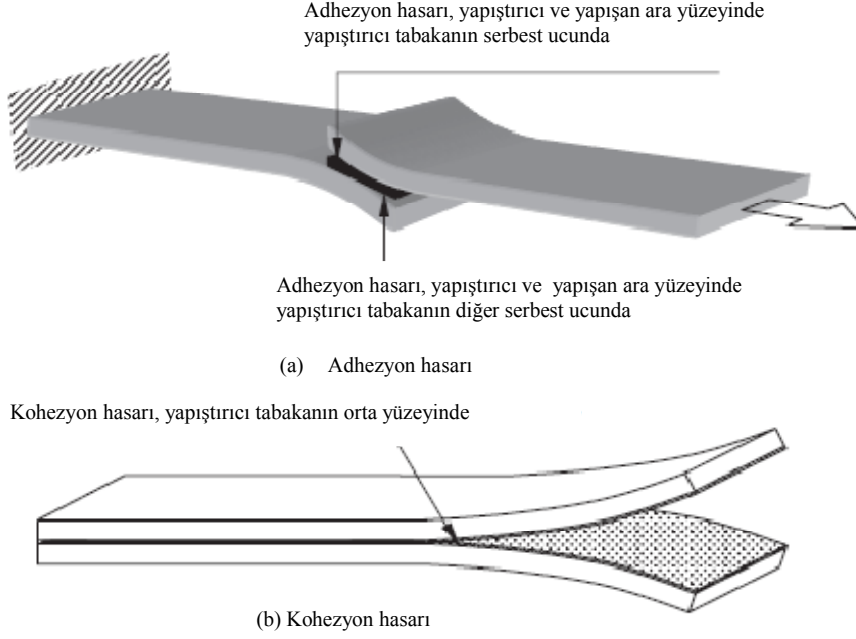
A ve B tipi yapıştırma sistemlerinin geometrisi, yükleme ve sınır şartları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, bindirme bölgesinin uzunluğu (c) 40 mm, genişliği (W) ise 40 mm’dir. Kompozit plakaların kalınlıkları (t) 2.24 mm ve yapıştırıcı kalınlığı ( $\delta$ ) ise 0.5 mm’dir. B tipi bağlantıda fiberlerin yerleştirileceği 4 mm çapındaki delikler yapışanların kenarlarından 5 mm uzaklıktadır. Bağlantıların bir ucunun x,y z yönünde hareketi sınırlandırılmış, yükün uygulandığı ucun hareketi ise y ve z yönünde engellenmiştir. Bu uca,  $F=1000$  N’luk yüke eşdeğer  $p = F/(W.t) = 1000/(40*2.24) = -$

11.86 MPa basınç uygulanmıştır. Yer değiştirmenin uygulandığı kompozit levha üst yapışan, diğer levha ise alt yapışan olarak adlandırılmıştır.

Analizlerde, bağlantının bindirme bölgesinin üç kritik yüzeyinde meydana gelen ve bu bölgede hasara sebep olan düzlem dışı gerilmeler ( $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$ ) incelenmiştir. Kritik yüzeyler, (i) üst (yükün uygulandığı plaka) yapışan plaka ile yapıştırıcı ara yüzeyi, (ii) yapıştırıcının orta yüzeyi, (iii) alt yapışan plaka ile yapıştırıcı ara yüzeyidir. Gerilme analizinden elde edilen düzlem dışı gerilmeler ( $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$ ) bağlantıda hasarın nerede başladığını belirlemek için kullanılmıştır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılardan görülen hasar türleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Problemin tanıtılması (a) A tipi bağlantı sistemleri (b) B tipi bağlantı sistemleri



Şekil 5.2 Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarda karşılaşılan hasar türleri [101]

### 5.3 Adhezyon Hasar Kriteri

Yapıştırıcı ile yapışan malzemenin ara yüzeyinde oluşan adhezyon hasarının belirlenmesinde, bindirme bölgesindeki üç boyutlu gerilme durumu nedeniyle aşağıda verilen Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır [101].

$$\frac{\sigma_x^2}{X_c X_t} + \frac{\sigma_y^2}{Y_c Y_t} + \frac{\sigma_z^2}{Z_c Z_t} + \frac{\tau_{xy}^2}{S_{xy}^2} + \frac{\tau_{yz}^2}{S_{yz}^2} + \frac{\tau_{xz}^2}{S_{xz}^2} + \sigma_x \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_y \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) + \sigma_z \left( \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right) + f_{xy} \sigma_x \sigma_y + f_{yz} \sigma_y \sigma_z + f_{xz} \sigma_z \sigma_x = e^2 \begin{cases} e < 1, \text{hasar yok} \\ e > 1, \text{hasar var} \end{cases} \quad (5.1)$$

Burada, asal malzeme eksenleri boyunca,  $X_t$ ,  $Y_t$  ve  $Z_t$  müsaade edilen çekme mukavemet değerlerini,  $X_c$ ,  $Y_c$  ve  $Z_c$  ise müsaade edilen basma mukavemet değerlerini göstermektedir.  $S_{xy}$ ,  $S_{yz}$  ve  $S_{xz}$  ise kayma mukavemet değerlerini göstermektedir.

Bu çalışmada, adhezyon hasarı, ara yüzey kayma gerilmelerinin asıl etken olduğu delaminasyon hasarı olarak göz önüne alındığından, ara yüzey kayma gerilmeleri ( $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$ ) ve kalınlık boyunca normal gerilme ( $\sigma_z$ ) hasar başlangıcının belirlenmesi için

yeterlidir.  $Z=Z_t=Z_c$  (ara yüzey normal mukavemeti) ve  $S=S_{yz}=S_{xz}$  (ara yüzey kayma mukavemeti) kabulü yapılarak Denklem (5.1) aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\left(\frac{\sigma_z}{Z}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{S}\right)^2 = e^2 \begin{cases} e < 1, \text{hasaryok} \\ e > 1, \text{hasar var} \end{cases} \quad (5.2)$$

#### 5.4 Kohezyon Hasar Kriteri

İzotropik yapıştırıcının orta yüzeyinde meydana gelen kohezyon hasarının belirlenmesinde aşağıdaki denklemle verilen parabolik akma kriteri kullanılmıştır [101].

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 2(|Y_c| - Y_t)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 2|Y_c|Y_t e \quad (5.3)$$

Burada,  $\sigma_1, \sigma_2,$  ve  $\sigma_3$  asal gerilmeler,  $Y_c$  ve  $Y_t$  ise sırasıyla yapıştırıcının basma ve çekme mukavemet değerleridir.

#### 5.5 A Tipi Bağlantıların Modellenmesi

##### 5.5.1 Analiz tipinin tanımlanması

*Main Menu > Preferences > Structural*

##### 5.5.2 Kullanılacak eleman tiplerinin seçilmesi

Çalışmada, kompozit plakaların modellenmesinde Layered-Solid46 eleman, yapıştırıcı ve modellenmesinde Brick 8-node45 (Solid 45) eleman kullanılacaktır. *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Solid Layered46 > Apply > Brick 8node45 > OK > Close*

##### 5.5.3. Real constantların girilmesi

*Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Add > Type 1 Solid 46 > OK > OK* yoluyla gelen ekrana tabaka sayısı girilir. Kompozit levhalar on tabakadan meydana geldiği için bu değer 10 olarak girilir. Gelen ekrana tabaka açısı ve



kalınlığını girilir. Tabaka kalınlığı 0.224 mm ve açıları tabaka dizilişi  $[0]_{10}$  olduğundan  $0^{\circ}$  olarak girilir. OK butonuna basılır. Solid 45 için bu işlemin yapılmasına gerek yoktur.

#### **5.5.4 Malzeme özelliklerinin girilmesi**

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Material Prop>Material Model*

*Material models available* bölümünde, ikişer kez tıklayarak, *Structural > Linear > Elastic > Orthotropic* seçilir. Gelen ekrana kompozit plakanın Çizelge 5.1'deki özellikleri girilir ve OK butonuna basılır.

Benzer şekilde yapıştırıcının özelliklerini girmek için ekranı kapatmadan *New model* seçimi ile *Define material ID* ekranında OK butonuna basılır ve *Structural>Linear>Elastic>Isotropic* çift tıklanarak yapıştırıcı özelliklerini Çizelge 5.1'e göre girilir.

#### **5.5.5 Modelleme**

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes> Block> By dimensions* yoluyla koordinatlar girilerek hacimler oluşturulur.

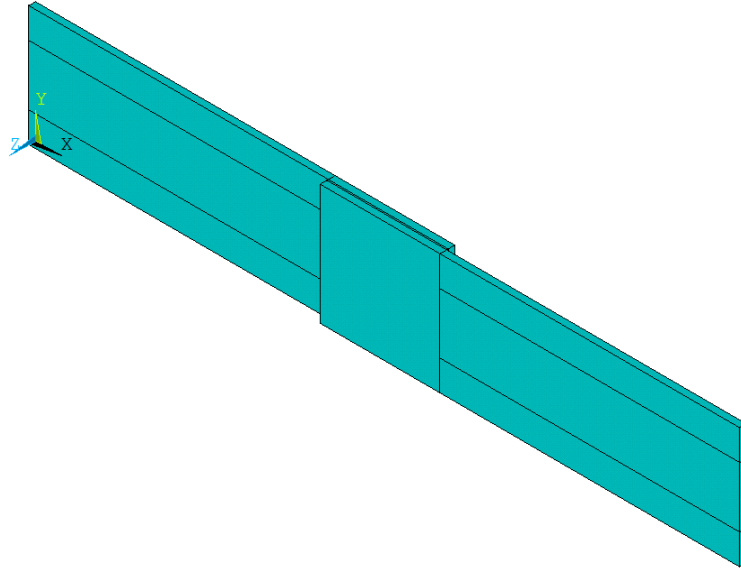
Son olarak *Ansys Main Menu > Preprocessor > Operate > Booleans > Glue > Volumes > Pick all* ile tüm hacimler birleştirilir (Şekil 5.3). Bu işlem kusursuz bir kaynak işlemi olarak düşünülebilir.

#### **5.5.6 Lokal koordinat sisteminin oluşturulması**

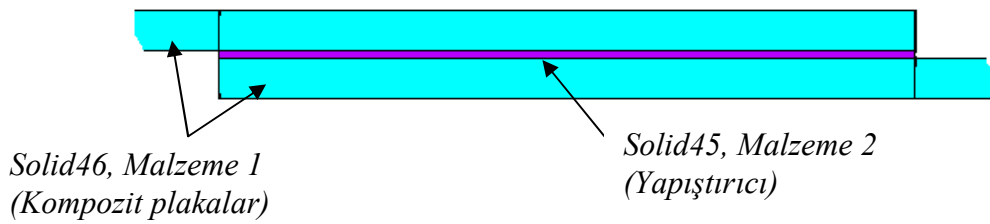
Bu işlem, sonuçların mantıklı olmasını sağlaması açısından oldukça önemlidir. *Ansys>Tool menu>Workplane>Local coordinate systems>Create Local CS>At WP origin* ile koordinat sistemi oluşturulur.

#### **5.5.7 Mesh işlemi**

Mesh işlemini yapmadan önce, ilgili hacimlere doğru elemanların ve malzemelerin atanması gerekmektedir. *Ansys Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Volumes* ile hacimler seçilir, uygun eleman ve malzemeleri girilir. Eğer işlemler doğru yapıldıysa Şekil 5.4'deki görüntü elde edilir.

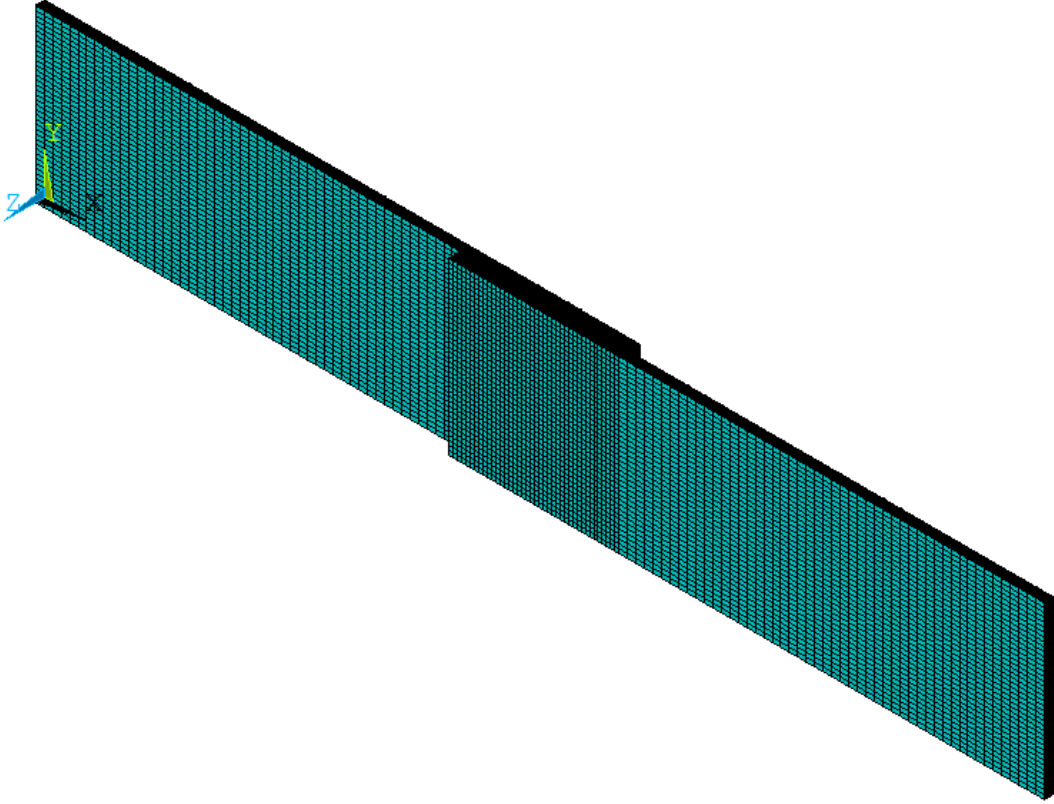


Şekil 5.3 A tipi yapıştırma sistemi modeli



Şekil 5.4 Eleman tiplerinin ve malzeme özelliklerinin atanması

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Lines>Set* ile kenarlar seçildikten sonra OK butonuna basılır ve çıkan ekrana uygun eleman boyutları tüm kenarlara tek tek girilir. Son olarak, *Ansys Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Sweep>Pick all* ile mesh işlemi tamamlanır. Mesh işleminden sonra ekran görüntüsü aşağıdaki gibi olmalıdır (Şekil 5.5).



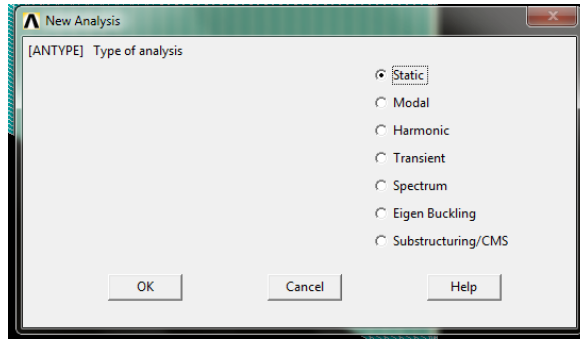
Şekil 5.5 Mesh işlemi

### 5.5.8 Sınır şartlarının girilmesi ve yükleme

Çözümeye geçmeden önceki son aşama olan sınır şartları girilecek ve bağlantının serbest ucuna x yönünde  $p=-11.86$  MPa basınç uygulanacaktır. *Ansys Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas* yoluyla alt yapışan kompozit plakanın serbest ucundaki üç alan sırasıyla seçilip OK butonuna basılır. Gelen ekranda All DOF seçili iken OK butonuna basılır. Böylece bağlantının bir ucunun x,y ve z yönündeki hareketi sınırlanmış olur. Benzer şekilde, *Ansys Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines* yoluyla diğer ucun y yönündeki kenarları seçilir ve  $U_y$  ve  $U_z$  yönünde hareketi sınırlandırılır. Bu işlemden sonra, *Ansys Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Areas* serbest uca ait üç alan seçilir ve -11.86 değeri girilerek basınç uygulanır.

## 5.5.9 Çözüm

*Ansys Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Static > OK* butonuna basılır. Çözümün başlaması için *Ansys Main Menu > Solution > Solve > Current LS > OK* butonuna basılır (Şekil 5.6).

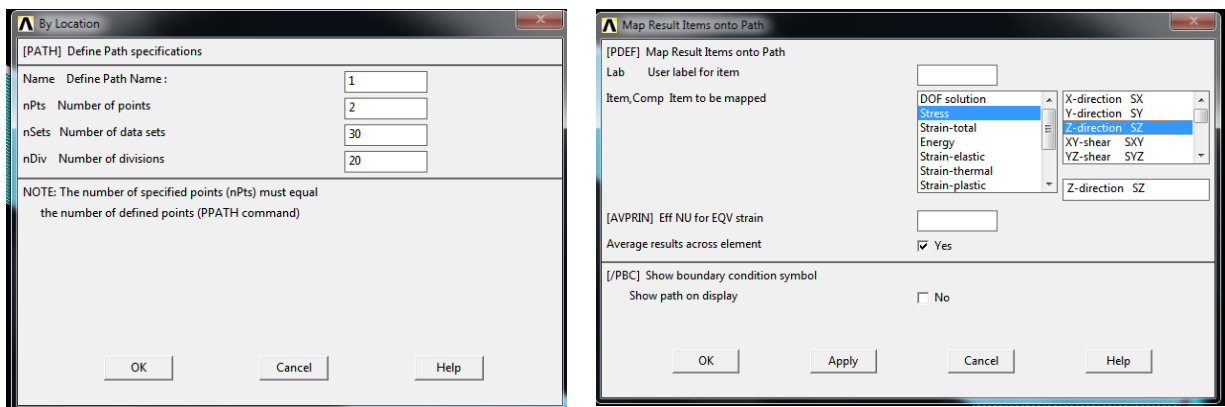


Şekil 5.6 Çözüm işlemi

## 5.6 Sonuçların Okunması

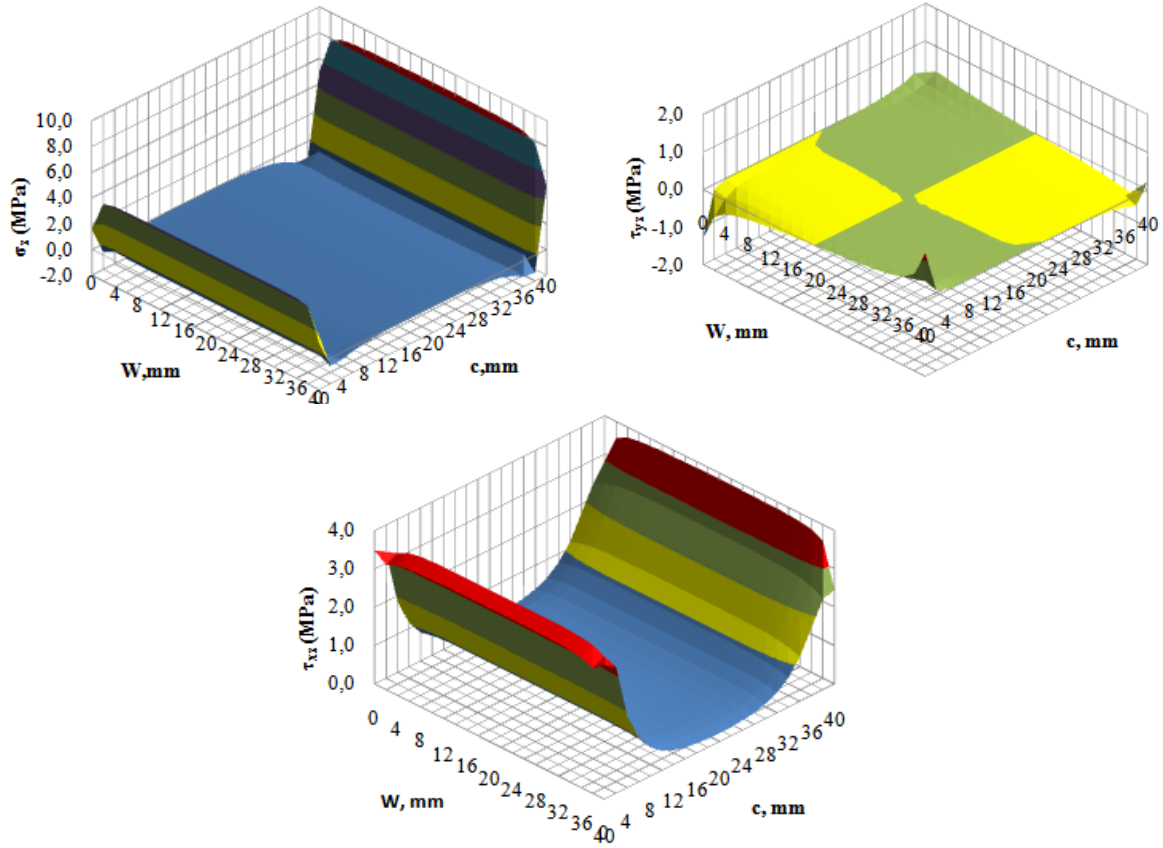
### 5.6.1 Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Çözüm işlemi bittikten sonra, *Ansys Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By location* yoluyla uygun koordinatlar girildikten sonra *Ansys Main Menu > General Postproc > Path Operations > Map onto Path* ile istenilen gerilme değerleri sırasıyla elde edilir. Daha sonra bu değerler *Ansys Main Menu > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > List Path items* yoluyla listelenir ve kaydedilir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Sonuçların Okunması

Şekil 5.8’de üst ara yüzeyde meydana gelen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  düzlem dışı gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir.

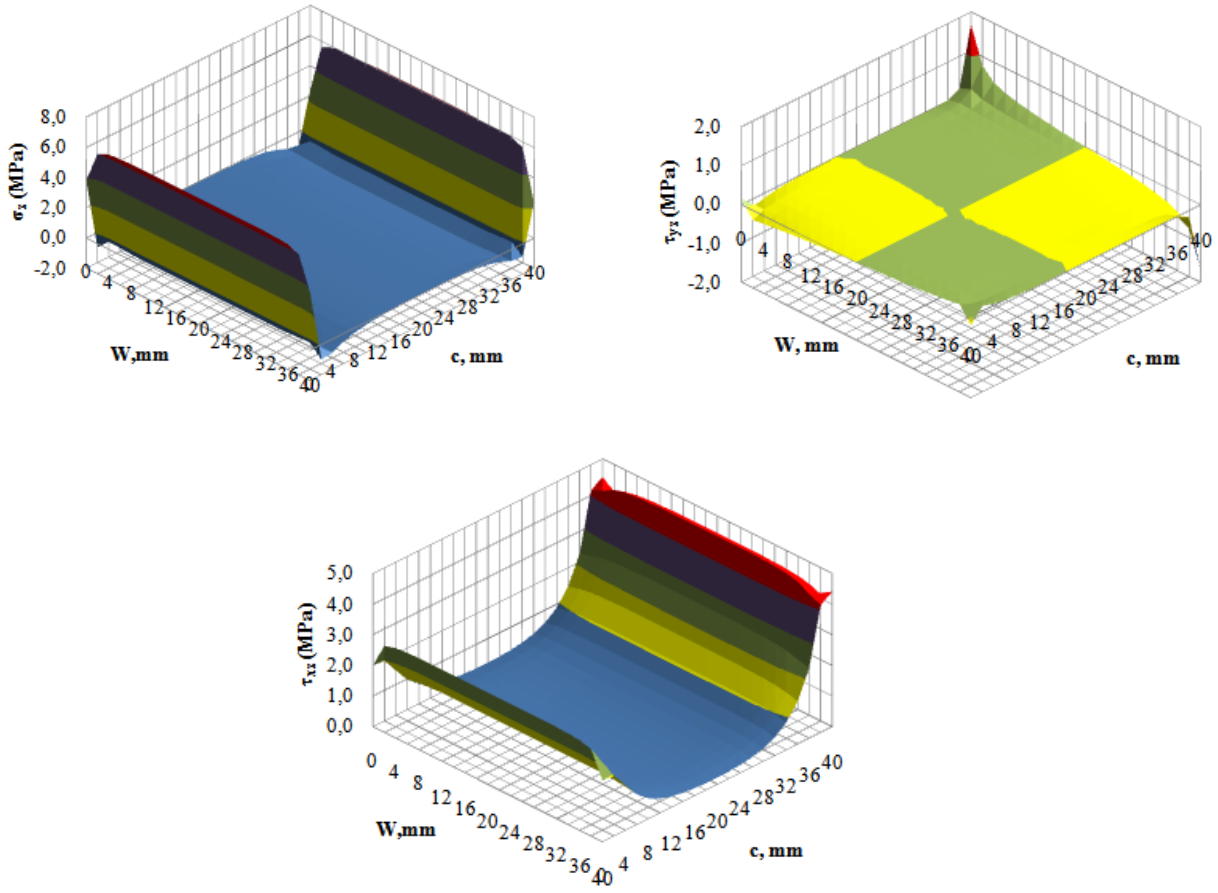


Şekil 5.8 Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi,  $\sigma_z$  gerilmesi bindirme bölgesinin büyük bölümünde sabit değer almaktadır. Gerilme değerleri uçlara doğru gidildikçe azalmaktadır. Ayrıca,  $\sigma_z$  normal gerilmesinin bindirme uzunluğu boyunca yüklemeye en yakın tarafta ( $c=40$  mm)’de serbest uca göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, gerilme yığılması etkisinin ara-yüzeylerde yüklemenin olduğu taraftan serbest uca doğru azalması nedeniyle meydana gelir. Normal gerilme değerleri, her iki kayma gerilmesi değerinden daha büyüktür.  $\tau_{xz}$  ve  $\tau_{yz}$  kayma gerilmeleri bağlantının ortalarında minimum değerler almakta iken uçlarda maksimum değerlerine ulaşmaktadır.

### 5.6.2 Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Şekil 5.9’da alt ara yüzeyde meydana gelen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  düzlem dışı gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir.

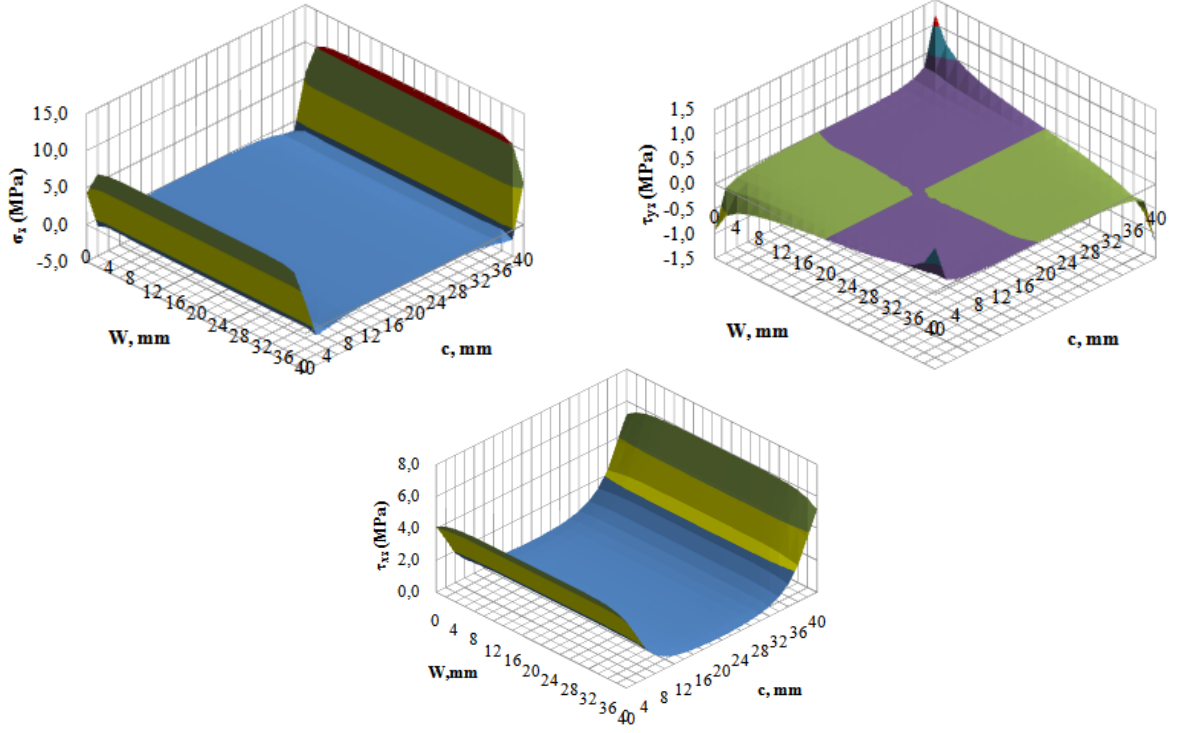


Şekil 5.9 Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi, davranış üst ara yüzeydekine benzemektedir.  $\sigma_z$  gerilmesi bindirme bölgesinin büyük bölümünde sabit değer almaktadır. Gerilme değerleri uçlara doğru gidildikçe azalmaktadır. Ayrıca,  $\sigma_z$  normal gerilmesinin bindirme uzunluğu boyunca yüklemeye en uzak tarafta ( $c=0$  mm)’de yükleme tarafına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

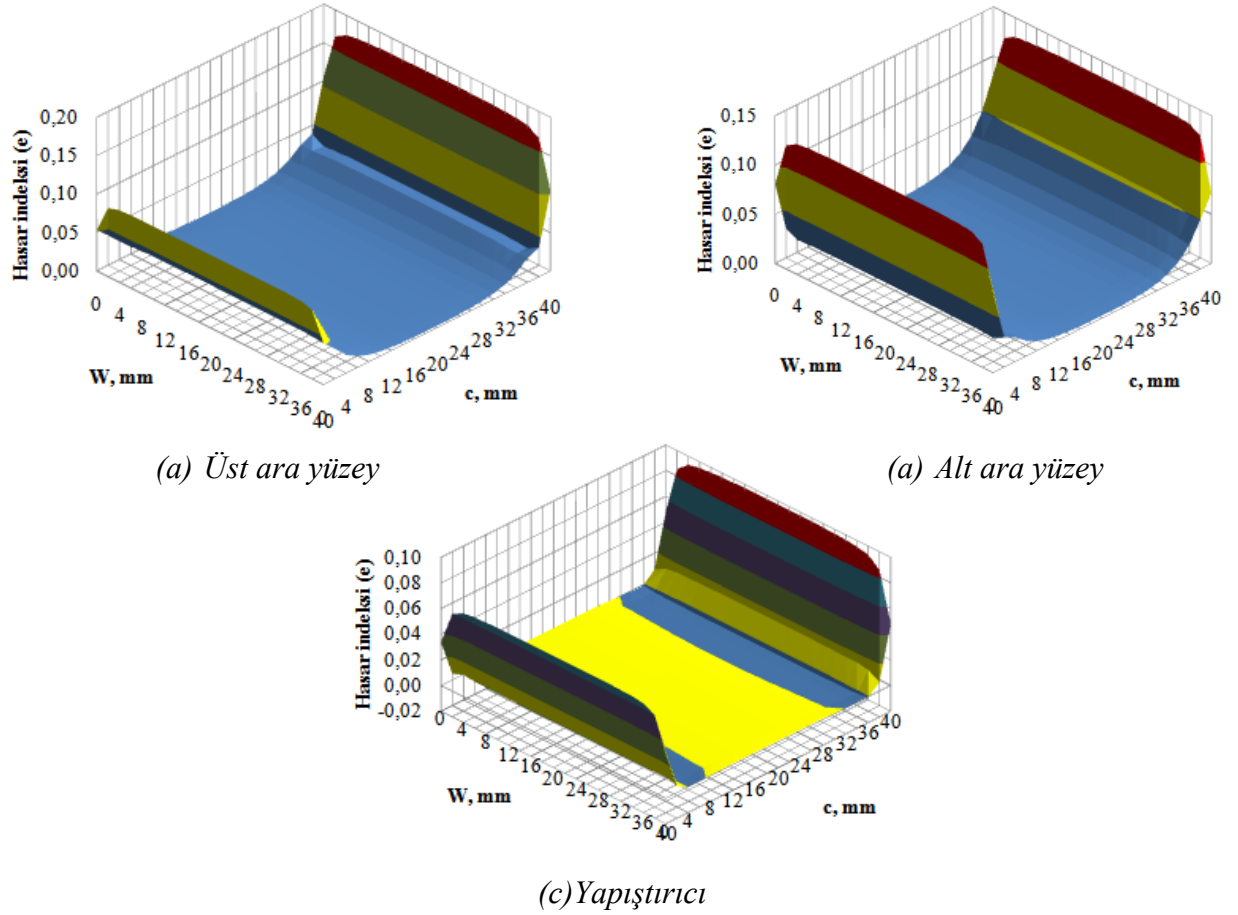
### 5.6.3 Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler

Şekil 5.10’da yapıştırıcıda meydana gelen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  düzlem dışı gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir.  $\sigma_z$  ve  $\tau_{xz}$  gerilmeleri, ara yüzeylere göre daha yüksektir. Buna ek olarak, gerilme davranışları ara yüzeylere göre benzerlik göstermektedir.  $\sigma_z$  gerilmesi bağlantının uçları hariç bindirme bölgesinin büyük kısmında sabittir.



Şekil 5.10 Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler

#### 5.6.4 Hasar indeksleri



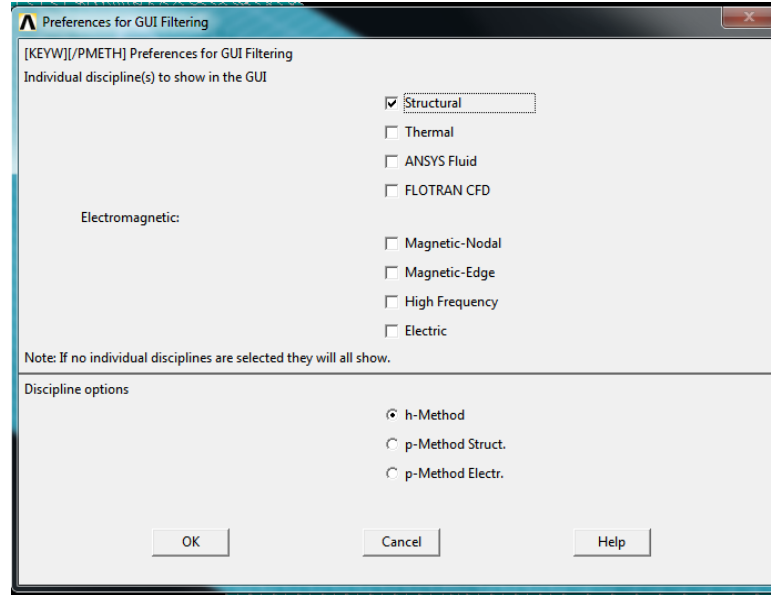
Şekil 5.11 Hasar indeksleri

Şekil 5.11’de üç kritik yüzey için Denklem (5.2) ve Denklem (5.3) kullanılarak hesaplanan hasar indeksleri gösterilmiştir. Şekil 5.11(a)’da görüldüğü gibi, üst ara yüzeyde en büyük hasar indeksi değeri ( $e=0,179637$ ) yüklemeye yakın hesaplanmıştır. Şekil 5.11(b)’de alt ara yüzey için bu durumun tam tersi görülmektedir. En büyük indeks değeri ( $e=0,134528$ ) yüklemeye en uzak tarafta hesaplanmıştır. Bu değer üst ara yüzeye göre daha düşüktür. Yapıştırıcı yüzeyinde üst ara yüzeye benzer davranış görülmüştür. Gerilme değerleri bu yüzeyde ara yüzeylere göre daha yüksek olmasına rağmen maksimum hasar indeksi değeri ( $e=0,09721$ ) daha düşüktür. Hasar indeksleri karşılaştırıldığında, maksimum hasar indeksi üst ara yüzeyde elde edildiğinde, hasar bu ara yüzeyde adhezyon hasarı olarak başlayacaktır.

## 5.7 B Tipi Bağlantıların Modellenmesi

### 5.7.1 Analiz tipinin tanımlanması

*Main Menu>Preferences>Structural* (Şekil 5.12)



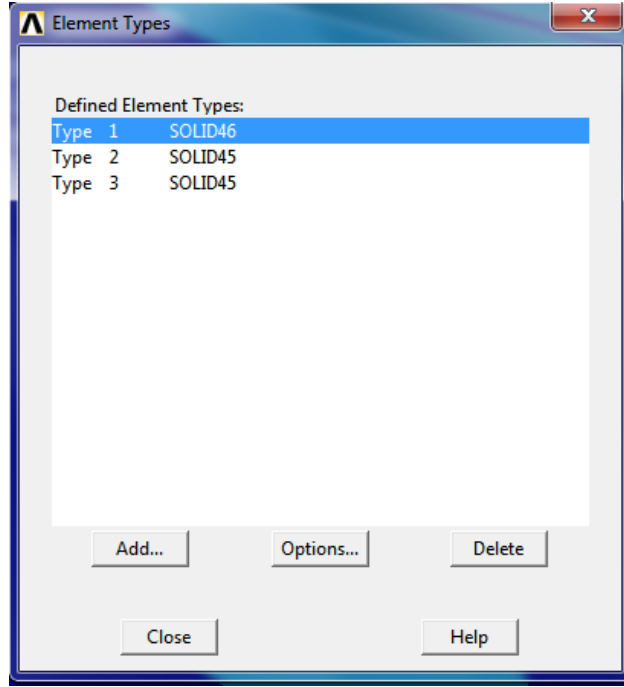
Şekil 5.12 Analiz tipinin tanımlanması

### 5.7.2 Kullanılacak eleman tiplerinin seçilmesi

Çalışmada, kompozit plakaların modellenmesinde Layered-Solid46 eleman, yapıştırıcı ve fiberlerin modellenmesinde Brick 8-node45 (Solid 45) eleman kullanılacaktır.



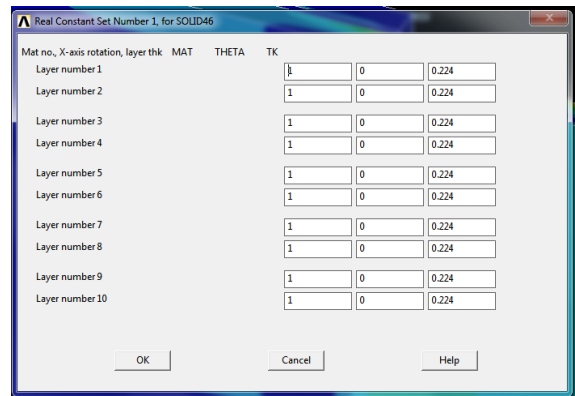
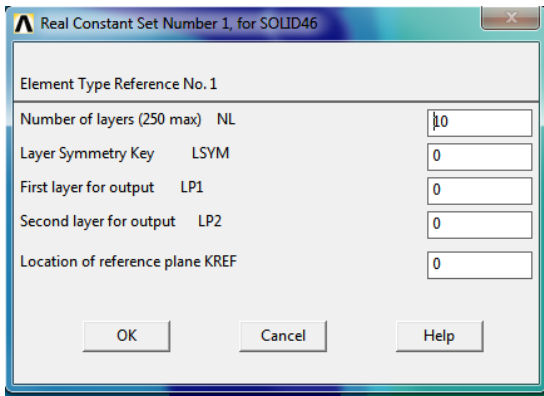
Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Solid Layered46 > Apply > Brick 8node45 > Apply > Brick 8node45 > OK > Close (Şekil 5.13)



Şekil 5.13 Eleman tiplerinin seçilmesi

### 5.7.3. Real constantların girilmesi

Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Add > Type 1 Solid 46 > OK > OK yoluyla gelen ekrana tabaka sayısı girilir. Kompozit levhalar on tabakadan meydana geldiği için bu değer 10 olarak girilir. Gelen ekrana tabaka açısı ve kalınlığını girilir. Tabaka kalınlığı 0.224 mm ve açıları tabaka dizilişi [0] <sub>10</sub> olduğundan 0° olarak girilir. OK butonuna basılır. Solid 45 için bu işlemin yapılmasına gerek yoktur (Şekil 5.14).

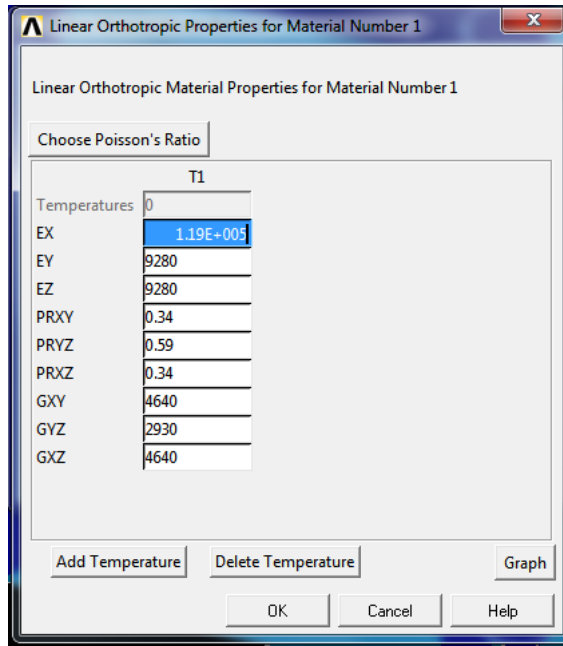


Şekil 5.14 Real constantların girilmesi

#### 5.7.4 Malzeme özelliklerinin girilmesi

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Material Prop>Material Model*

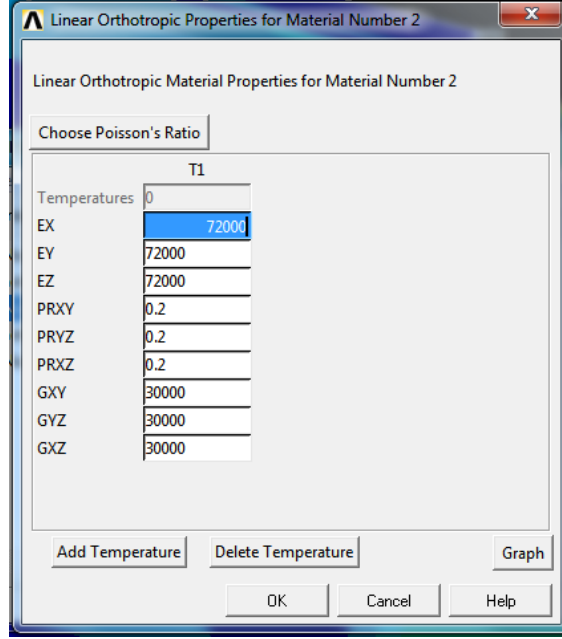
*Material models available* bölümünde, ikişer kez tıklayarak, *Structural > Linear > Elastic > Orthotropic* seçilir. Gelen ekrana kompozit plakanın Çizelge 5.1'deki özellikleri girilir ve OK butonuna basılır (Şekil 5.15).



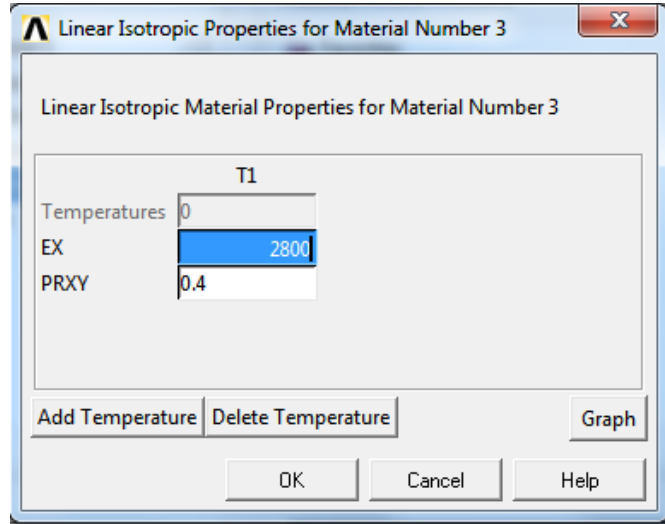
Şekil 5.15 Kompozit malzemenin özelliklerinin girilmesi

Deliklere yerleştirilecek fiberlerin özelliklerini girmek için ekranı kapatılmadan *New model* seçimi ile *Define material ID* ekranında OK butonuna basılır ve *Structural>Linear>Elastic>Orthotropic* çift tıklanarak fiberlerin özellikleri Çizelge 5.1'e göre girilir (Şekil 5.16).

Benzer şekilde yapıştırıcının özelliklerini girmek için ekranı kapatmadan *New model* seçimi ile *Define material ID* ekranında OK butonuna basılır ve *Structural>Linear>Elastic>Isotropic* çift tıklanarak yapıştırıcı özelliklerini Çizelge 5.1'e göre girilir (Şekil 5.17).



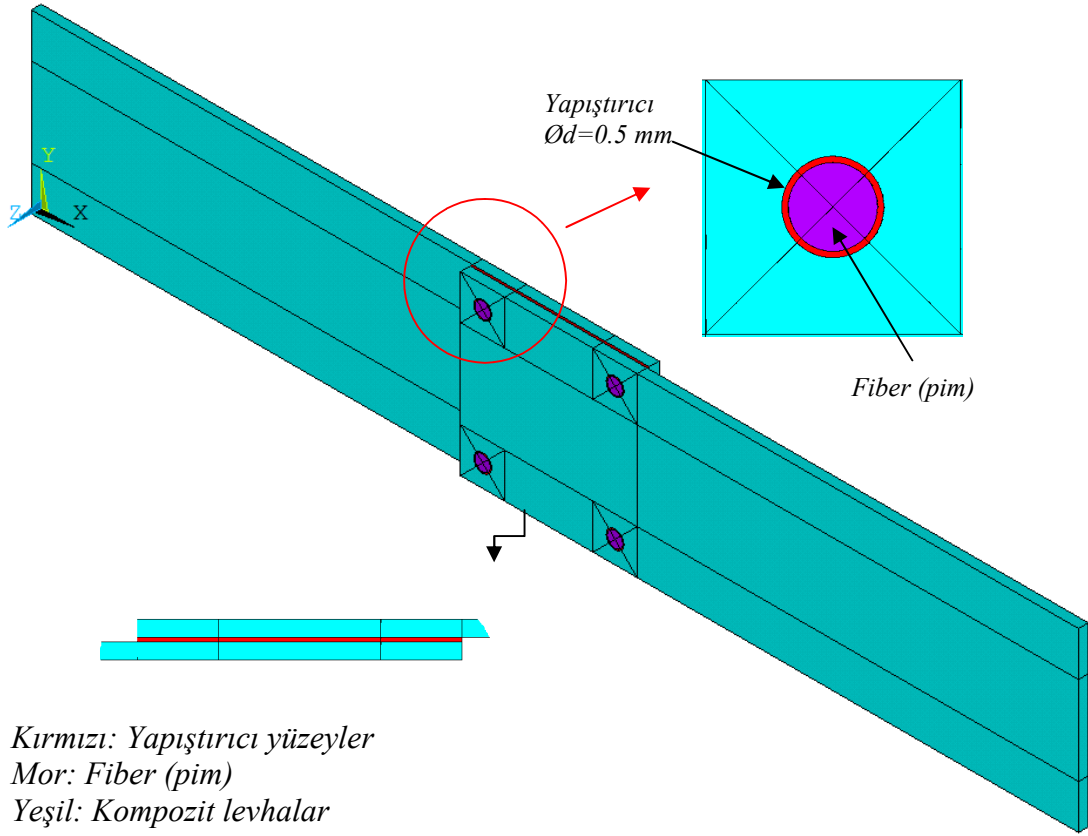
Şekil 5.16 Fiberlerin özelliklerinin girilmesi



Şekil 5.17 Yapıştırıcının özelliklerinin girilmesi

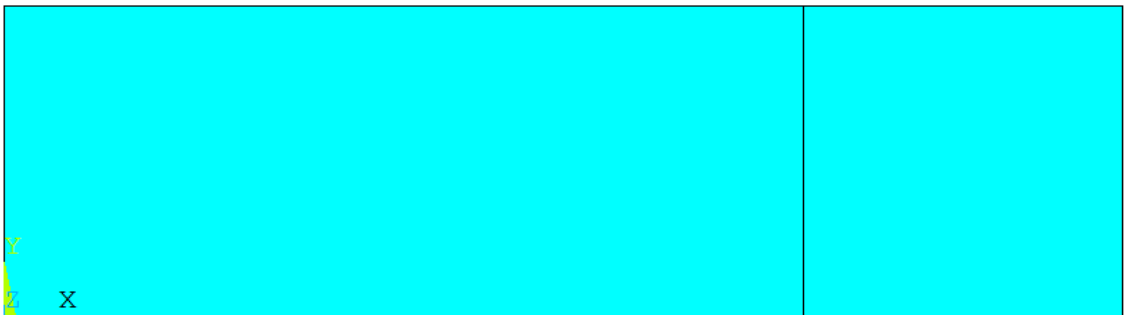
### 5.7.5 Modelleme

Bu aşamada, B tipi bağlantının modelleme adımları anlatılacaktır. Şekil 5.18'de modelleme işleminin son hali gösterilmiştir. Takviye elemanı fiberler 3.5 mm çapında toplam kalınlık boyunca ( $2.24+2.24+0.5 = 4.98\text{mm}$ ) pimler olarak modellenmiştir. Fiberlerin çevresinde 0.5 mm çapında, 4.98 mm yüksekliğinde yapıştırıcı bileşeni bulunmaktadır.



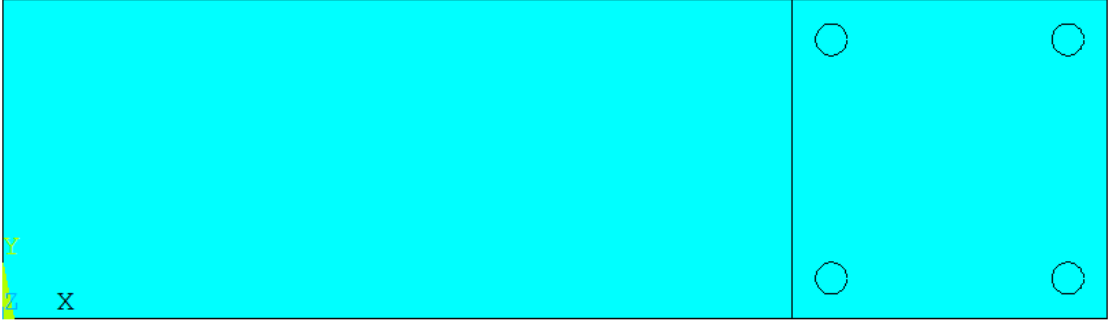
Şekil 5.18 Bağlantının modellenmiş hali

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Rectangular>By dimensions* ile uygun koordinatlar girilerek Şekil 5.19’da görülen alanlar oluşturulur. 1. alanın koordinatlarını girdikten sonra Apply butonuna basılır, ikinci alanın koordinatlarını girilir ve OK butonuna basılır. Böylece alt yapışan plakanın alanları oluşturulmuş olur. Fiberlerin geçirileceği delikleri oluşturmak için 4 mm çapında kenarlardan 5 mm mesafede olacak şekilde uygun koordinatlar girilerek dairesel alanlar oluşturulur.



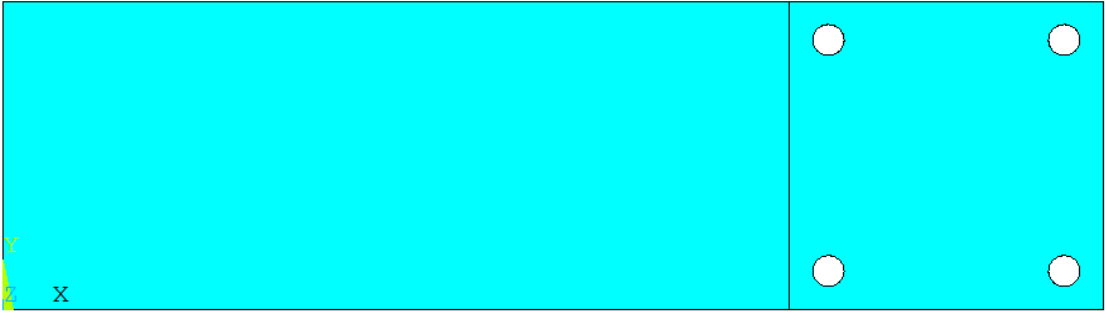
Şekil 5.19 Alt yapışan kompozit levhayı oluşturma işlemi

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Circle>Solid circle* seçildikten sonra gelen ekrana dairelerin koordinatları ve yarıçapları girilir (Şekil 5.20).



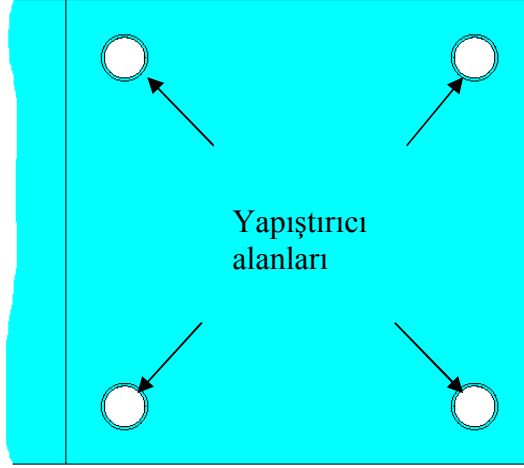
Şekil 5.20 Alt yapışan kompozit levhada daireleri oluşturma işlemi

Bu daireleri bindirme bölgesi alanından çıkarmak için, *Ansys Main Menu > Preprocessor>Operate>Booleans>Subtract>Areas* dedikten sonra ilk olarak tüm bindirme alanı seçilir ve OK dedikten sonra diğer daireler tek tek seçilip tekrar OK butonuna basılır. Böylece alt yapışan bindirme bölgesinde 4 mm çapında dört adet delik oluşturulmuş olur (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Alt yapışan bindirme bölgesinde delikleri oluşturma işlemi

Bu aşamada fiberlerin çevresindeki yapıştırıcı bölgelerini oluşturmak için *Ansys Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Annulus* komutu kullanılır (Şekil 5.22).



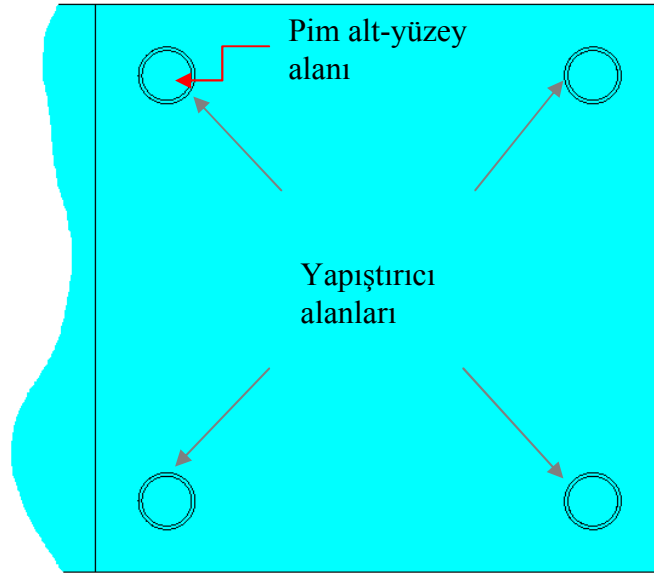
Şekil 5.22 Alt yapışan bindirme bölgesindeki deliklerin etrafında yapıştırıcı bileşenlerinin oluşturulması

Daha sonra, modelleme için gerekli keypointler *Ansys Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In active CS* komutu ile oluşturulur (Şekil 5.23).



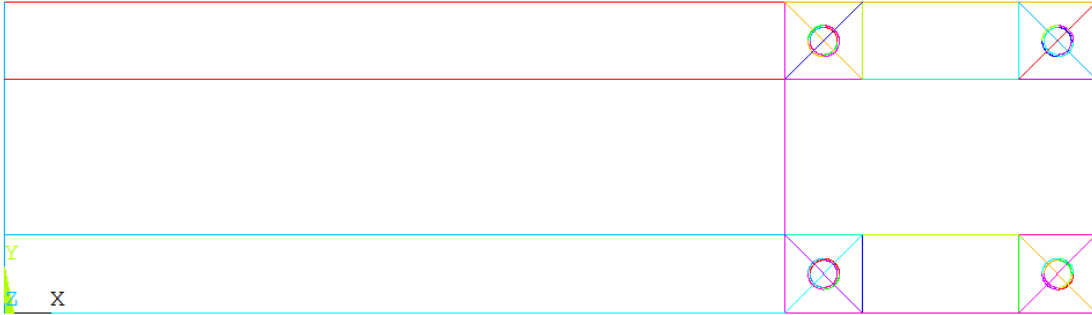
Şekil 5.23 Keypointlerin oluşturulması

Fiber pimlerini oluşturmak için, *Ansys Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Circle > Solid circle* komutu ile uygun koordinatlar girilerek pimlerin alt yüzey alanları oluşturulur (Şekil 5.24).



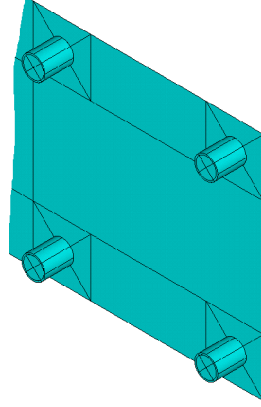
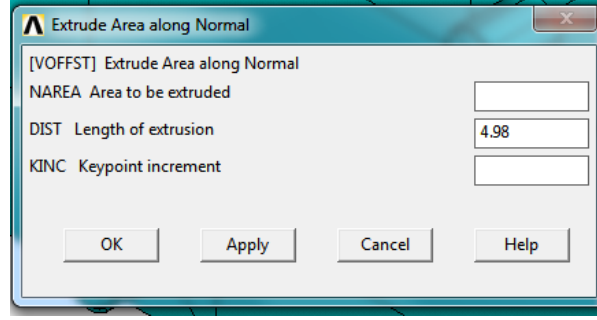
Şekil 5.24 Pimlerin alt yüzey alanlarının oluşturulması

Oluşturulan keypointler Şekil 5.25'deki görüldüğü gibi *Ansys Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight lines* komutu ile birbirine bağlanır.



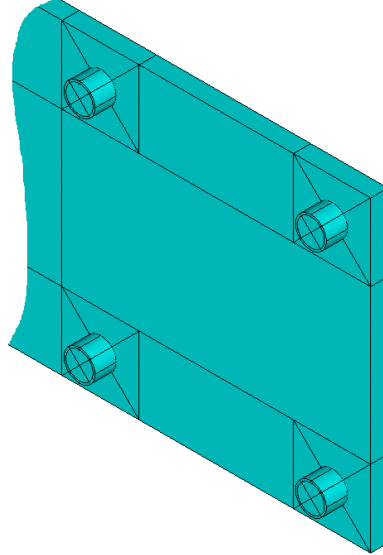
Şekil 5.25 Çizgilerin oluşturulması

Bu çizgilerden geçen alanları bölmek için *Ansys Main Menu > Preprocessor > Modeling > Booleans > Divide > Area by line > Pick all* seçilir. Pim ve çevresindeki yapıştırıcı alanları *Ansys Main Menu > Preprocessor > Modeling > Extrude > Areas > Along normal* tek tek seçerek 4.98 mm extrude edilir (Şekil 5.26).



Şekil 5.26 Pim ve çevresindeki yapıştırıcının oluşturulması

Aynı şekilde diğer alanlar 2.24 mm extrude edilerek, alt yapışan kompozitin, pimlerin ve çevresindeki yapıştırıcı bileşeninin modellenmesi tamamlanmış olur (Şekil 5.27).

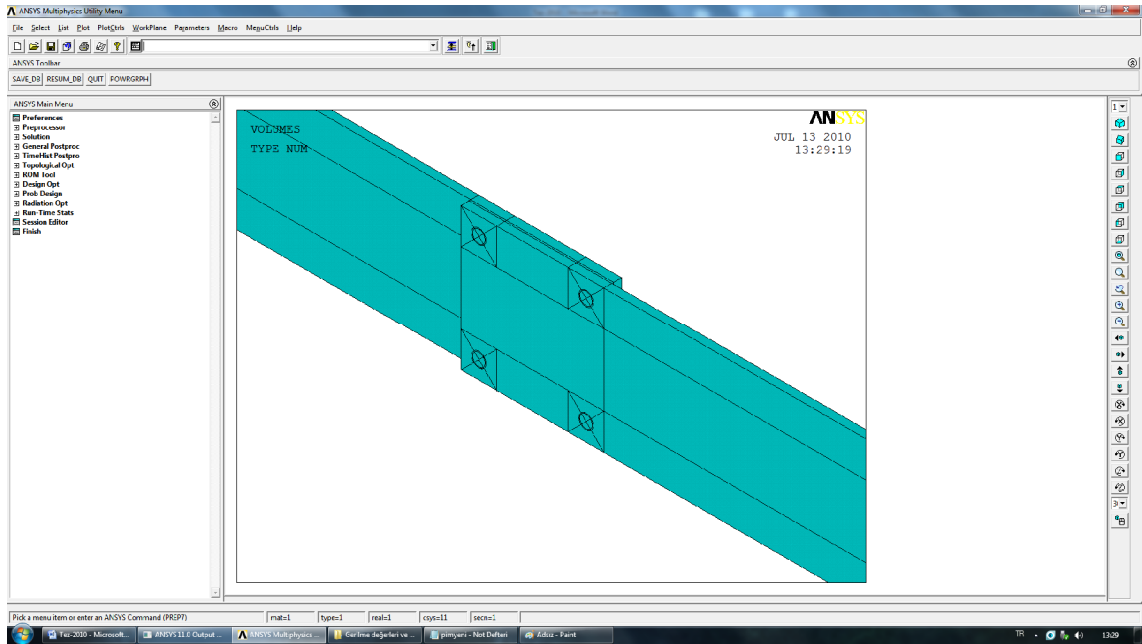


Şekil 5.27 Alt yapışan, fiber ve çevresindeki yapıştırıcı



Bundan sonra, yapıştırıcı yüzeyleri tek tek seçerek 0.5 mm extrude edilir. Daha sonra aynı yüzeyler tekrar 2.24 mm extrude edilerek yüklemenin yapılacağı üst yapışan kompozitin bindirme bölgesindeki hacimleri oluşturulur.

Son olarak, *Ansys Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By dimensions* komutu ile üst yapışan kompozitin diğer hacimleri oluşturulur. Son olarak *Ansys Main Menu > Preprocessor > Operate > Booleans > Glue > Volumes > Pick all* ile tüm hacimler birleştirilir (Şekil 5.28).



Şekil 5.28 Model

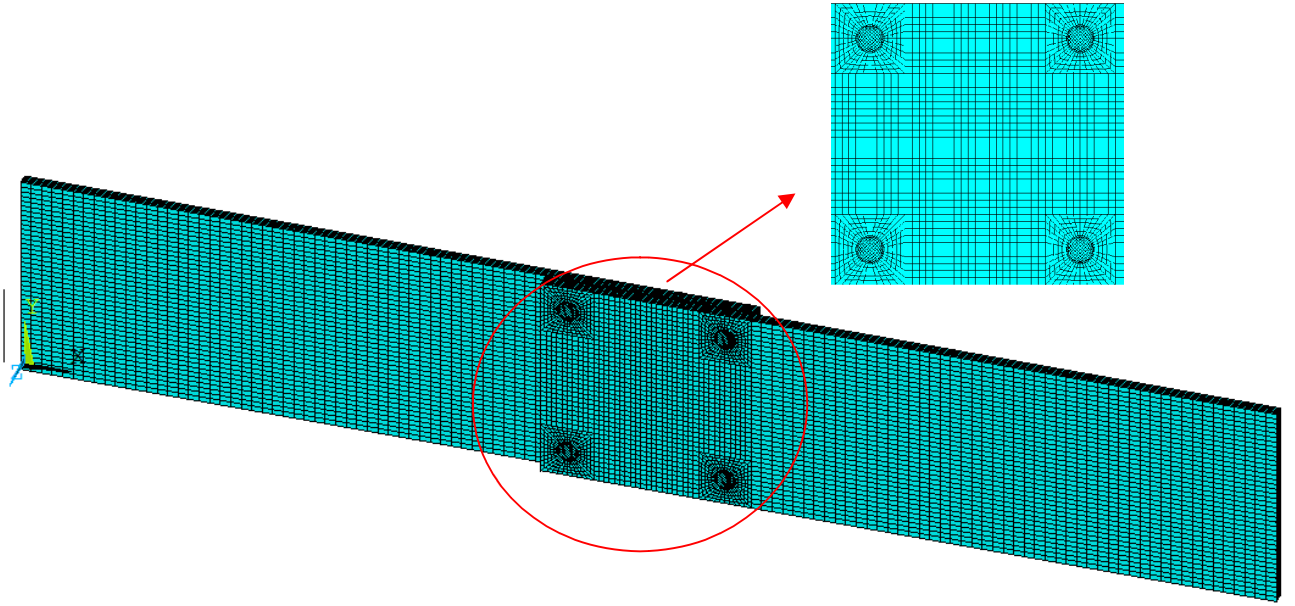
### 5.7.6 Lokal koordinat sisteminin oluşturulması

Bu işlem, sonuçların mantıklı olmasını sağlaması açısından oldukça önemlidir. *Ansys>Tool menu>Workplane>Local coordinate systems>Create Local CS>At WP origin* ile koordinat sistemi oluşturulur.

### 5.7.8 Mesh işlemi

Mesh işlemini yapmadan önce, ilgili hacimlere doğru elemanların ve malzemelerin atanması gerekmektedir.

*Ansys Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Volumes* ile hacimler seçilir, uygun eleman ve malzemeleri girilir. Eğer işlemler doğru yapıldıysa Şekil 5.18'deki görüntü elde edilir. *Ansys Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Lines>Set* ile kenarlar seçildikten sonra OK butonuna basılır ve çıkan ekrana uygun eleman boyutları tüm kenarlara tek tek girilir. Son olarak, *Ansys Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Sweep>Pick all* ile mesh işlemi tamamlanır. Mesh işleminden sonra ekran görüntüsü aşağıdaki gibi olmalıdır (Şekil 5.29).



Şekil 5.29 Mesh işleminin bitmiş hali

### 5.7.8 Sınır şartlarının girilmesi ve yükleme

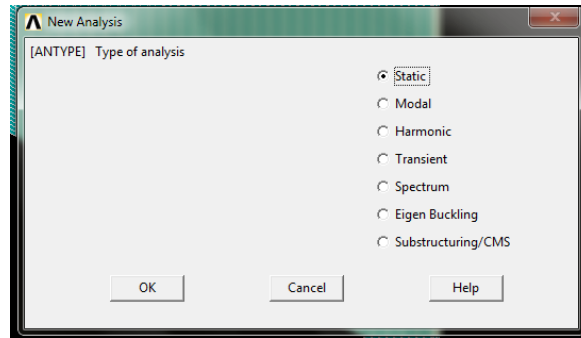
Bu aşamada çözüme geçmeden önceki son aşama olan sınır şartları girilecek ve bağlantının serbest ucuna x yönünde  $p=-11.86$  MPa basınç uygulanacaktır.

*Ansys Main Menu> Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas* yoluyla alt yapışan kompozit plakanın serbest ucundaki uç alanı sırasıyla seçilip OK butonuna basılır. Gelen ekranda All DOF seçili iken OK butonuna basılır. Böylece bağlantının bir ucunun x,y ve z yönündeki hareketi sınırlanmış olur. Benzer şekilde, *Ansys Main Menu> Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines* yoluyla diğer ucun y

yönündeki kenarları seçilir ve  $U_y$  ve  $U_z$  yönünde hareketi sınırlanır. Bu işlemden sonra, *Ansys Main Menu* > *Preprocessor* > *Loads* > *Define Loads* > *Apply* > *Structural* > *Pressure* > *On Areas* serbest uca ait üç alan seçilir ve -11.86 değeri girilerek basınç uygulanır.

### 5.7.9 Çözüm

*Ansys Main Menu* > *Solution* > *Analysis Type* > *New Analysis* > *Static* > *OK*



Şekil 5.30 Çözüm işlemi

Çözümün başlaması için

*Ansys Main Menu* > *Solution* > *Solve* > *Current LS* > *OK* butonuna basılır (Şekil 5.30).

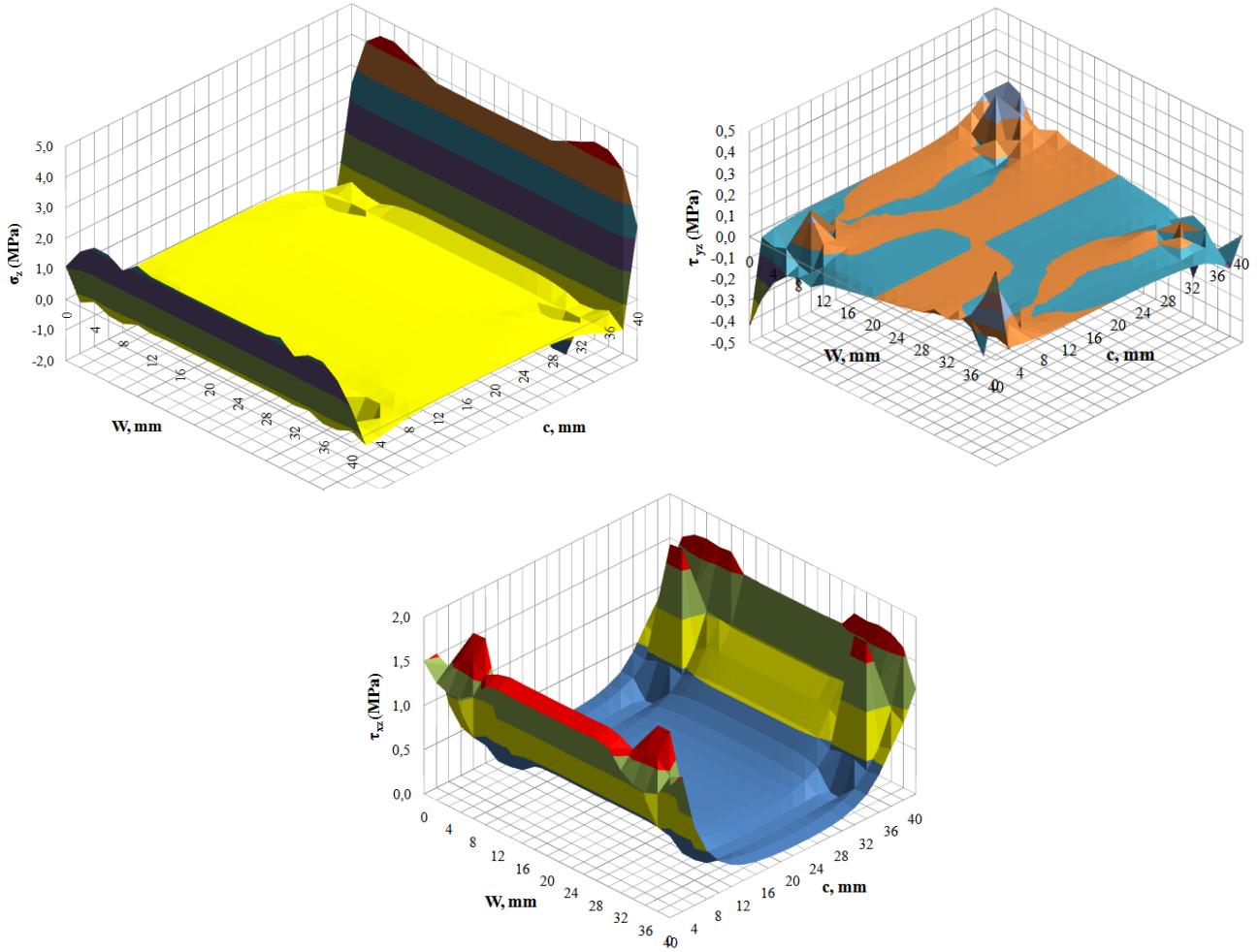
## 5.8 Sonuçların Okunması

### 5.8.1 Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Çözüm işlemi bittikten sonra, *Ansys Main Menu* > *General Postproc* > *Path Operations* > *Define Path* > *By location* yoluyla uygun koordinatlar girildikten sonra *Ansys Main Menu* > *General Postproc* > *Path Operations* > *Map onto Path* ile istenilen gerilme değerleri sırasıyla elde edilir. Daha sonra bu değerler *Ansys Main Menu* > *General Postproc* > *Path Operations* > *Plot Path Item* > *List Path items* yoluyla listelenir ve kaydedilir.

Yukarıda tanımlanan işlemlerin tümü, bindirme uzunluğu (c) ve bindirme genişliği (W) için 2 mm aralıklarla tekrarlanır. Daha sonra kaydedilen dosyalar önce Notepad ile açılır ve daha sonra MS Excel'e yapıştırılır. Bu işlem sırası, alt arayüzey ve yapıştırıcı için

tekrarlanır. Şekil 5.31’de üst ara yüzeyde meydana gelen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  düzlem dışı gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.31 Üst ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

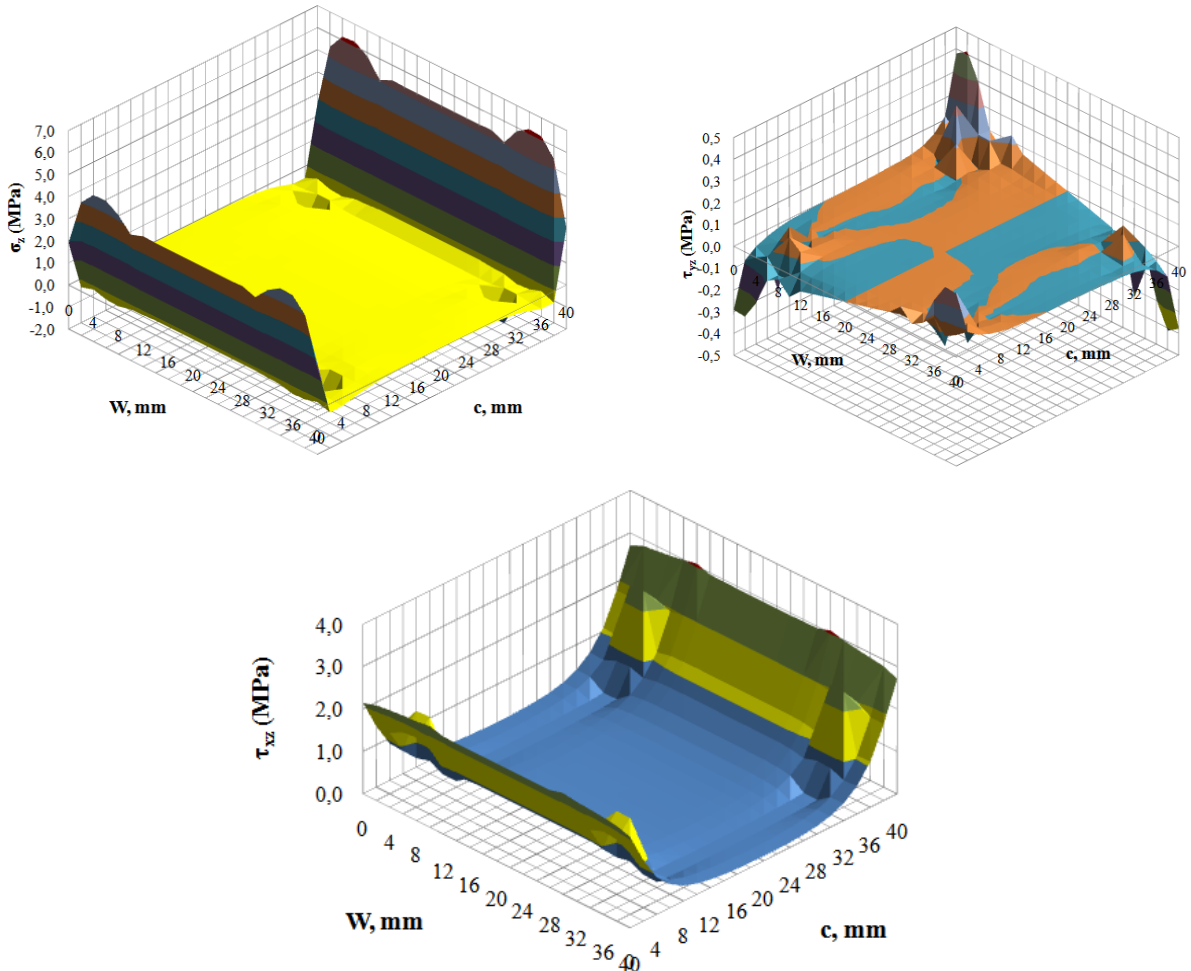
Şekil 5.31’de görüldüğü gibi,  $\sigma_z$  ve  $\tau_{xz}$  gerilmeleri bindirme genişliğinin uçlarında minimum değerleri almaktadır. Ayrıca, bu gerilme değerlerinin uçlardan ortalara doğru gidildikçe arttığı ve bu bölgeler dışında maksimum değerini delik merkezleri hizasında aldığı görülmektedir. Bunun nedeni, delik çevresindeki gerilme yığılmalarıdır.  $\sigma_z$  gerilmelerinin bindirme bölgesinin büyük kısmında sabit değerler aldığı görülmektedir.

Ayrıca,  $\sigma_z$  normal gerilmesinin bindirme uzunluğu boyunca yüklemeye en yakın tarafta ( $c=40$  mm)’de serbest uca göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, gerilme yığılması etkisinin ara-yüzeylerde yüklemenin olduğu taraftan serbest uca doğru azalması nedeniyle meydana gelir.  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesinin üç boyutlu etkilere daha hassas olduğu ve bu değerlerin bağlantının uçlarında maksimum ve minimum değerini

aldığı görülmektedir. Buna ek olarak,  $\sigma_z$  ve  $\tau_{xz}$  gerilme değerleri,  $\tau_{yz}$  kayma gerilmesine kıyasla daha yüksektir.

### 5.8.2 Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler

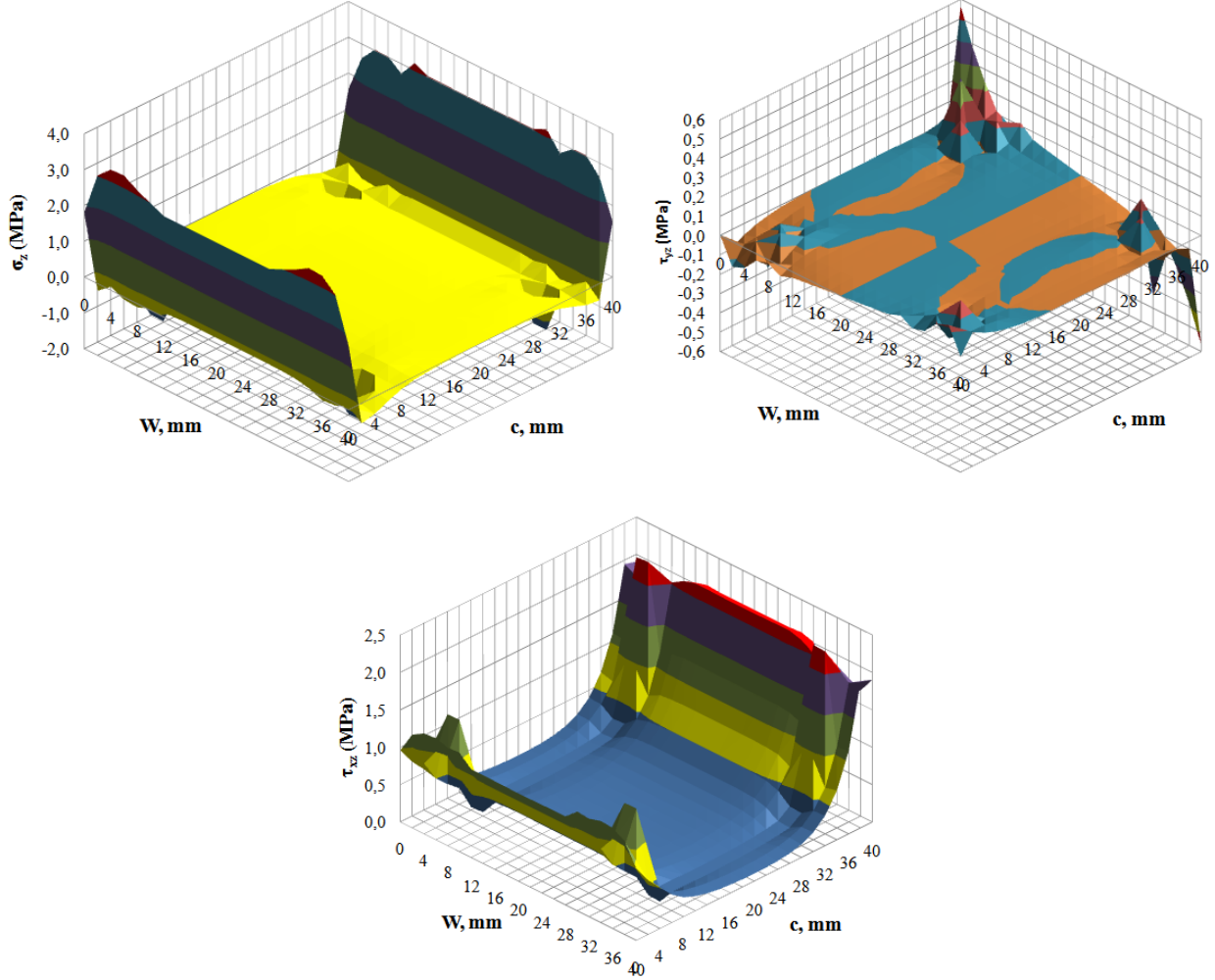
Şekil 5.32’de yapıştırıcıda meydana gelen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  düzlem dışı gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir. Şekil 5.32’de  $\sigma_z$  ve  $\tau_{xz}$  gerilmeleri, Şekil 5.31’de gösterilen üst ara yüzeyde meydana gelen gerilme dağılımına benzer bir dağılım göstermektedir. Yapıştırıcıda meydana gelen  $\sigma_z$  normal gerilmeleri ve  $\tau_{xz}$  kayma gerilmeleri değerleri üst ara yüzeye nazaran daha yüksektir. Deliklerin gerilmelere etkisi yapıştırıcı yüzeyinde de görülmektedir.



Şekil 5.32 Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmeler

### 5.8.3 Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Şekil 5.33’de alt ara yüzeyde meydana gelen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$  ve  $\tau_{xz}$  düzlem dışı gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir.



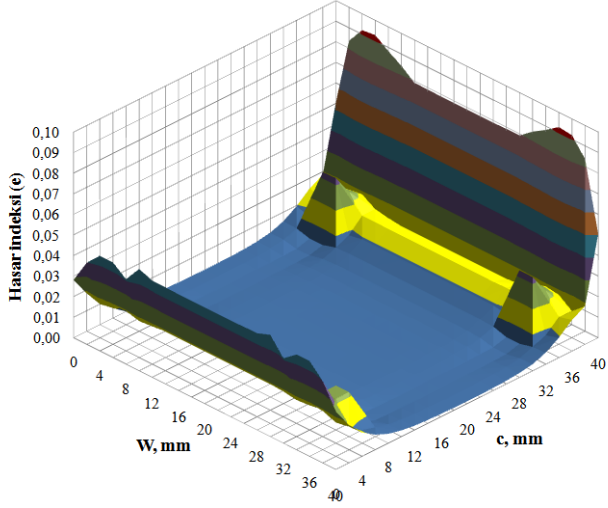
Şekil 5.33 Alt ara yüzeyde meydana gelen gerilmeler

Şekil 5.33’de görüldüğü gibi,  $\sigma_z$  gerilmesi, alt ara yüzeyde serbest uçta daha yüksek, yüklemeye yakın uçta ise daha düşüktür. Delik merkezleri hizasında maksimum değerini almıştır. Üst ara yüzeye kıyasla  $\sigma_z$  gerilme değerleri daha düşüktür. Bununla beraber, gerilme davranışları üst ara yüzey ve yapıştırıcı ile benzer eğilim göstermektedir.

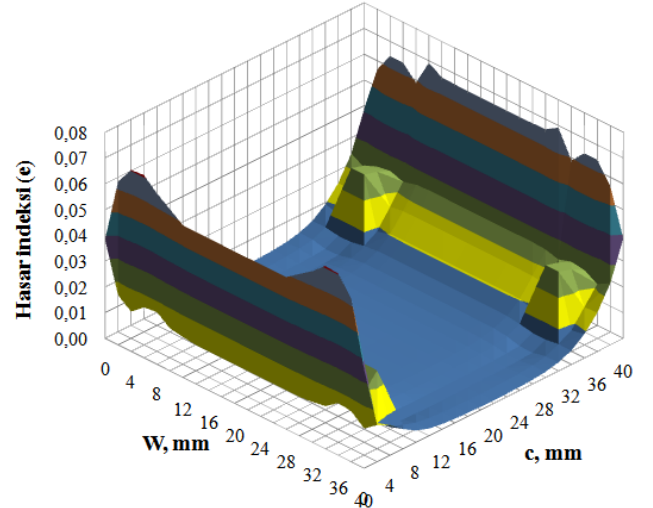
Şekil 5.30-33 incelenirse  $\sigma_z$  soyulma gerilmesi ve  $\tau_{xz}$  kayma gerilme değerlerinin yapıştırıcıda daha büyük olduğu görülmektedir.

#### 5.8.4 Hasar indeksleri

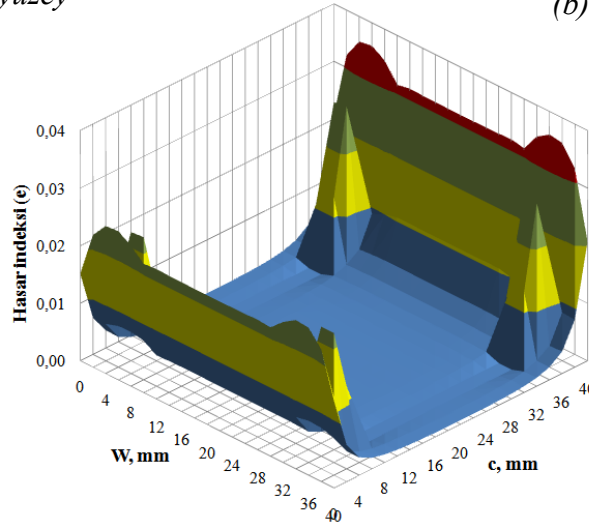
Şekil 5.34'de üç kritik yüzey için Denklem (5.2) ve Denklem (5.3) kullanılarak hesaplanan hasar indeksleri gösterilmiştir.



(a) Üst ara yüzey



(b) Alt ara yüzey



(c) Yapıştırıcı yüzeyi

Şekil 5.34 Hasar indeksleri

Şekil 5.34(a)'da görüldüğü gibi, üst ara yüzeyde en büyük hasar indeksi değeri ( $e=0,092819$ ) yüklemeye yakın taraftaki deliklerin merkezlerinde hesaplanmıştır. Şekil 5.34(b)'de alt ara yüzey için bu durumun tam tersi görülmektedir. En büyük indeks değeri ( $e=0,070923$ ) yüklemeye en uzak tarafta deliklerin merkezlerinde hesaplanmıştır. Bu değer üst ara yüzeye göre daha düşüktür. Yapıştırıcı yüzeyinde üst ara yüzeye benzer davranış görülmüştür. Gerilme değerleri bu yüzeyde ara yüzeylere göre daha

yüksek olmasına rağmen maksimum hasar indeksi değeri ( $e=0,0359$ ) daha düşüktür. Üç kritik yüzey için hasar indeksleri karşılaştırıldığında, maksimum hasar indeksi üst ara yüzeyde hesaplandığından, hasar bu yüzeyin delik merkezlerinde adhezyon hasarı olarak başlayacaktır.

### 5.9 Nümerik Doğrulama

A ve B yapıştırma bağlantı sistemleri için nümerik hasar yükü, aşağıda verilen Denklem (5.4) ile hesaplanabilir.

$$P_{hasar} \approx \frac{P}{e_{maksimum}} \quad (5.4)$$

Burada,  $P$  ve  $e_{maksimum}$  sırasıyla, nümerik analizde uygulanan yük değeri (1 kN) ve hesaplanan en büyük hasar indeksi değeridir. Çizelge 5.2’de A ve B bağlantı türleri için deneysel ve nümerik hasar yüklerinin karşılaştırılması ve hesaplanan % hatalar verilmiştir. Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi deneysel ve nümerik sonuçlar iyi bir uyum göstermektedir.

Çizelge 5.2 Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması

<i>Bağlantı Türü</i>	<b>P<sub>deneysel</sub> (kN)</b>	<b>P<sub>nümerik</sub> (kN)</b>	<b>Hata(%)</b>
<i>A tipi</i>	5.27	5.56	5.5
<i>B tipi</i>	9.62	10.77	11.9

$$(\%)Hata \approx \frac{|P_{deneysel} - P_{nümerik}|}{P_{deneysel}}$$



## BÖLÜM VI

### TARTIŞMA VE SONUÇ

Alternatif bir bağlantı türü olan yapıştırıcı giderek hayatımızın her alanına girmiş ve her ortamda kullanılmaktadır. Bununla beraber tasarımcının elinde sağlıklı veriler bulunmamaktadır. Yapıştırıcının en fazla kullanıldığı ortamlarda tasarımcılara sağlıklı veriler sunmak için bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Deneyler düz yapıştırma, lifli ve düğümlü lifli bağlantı türleri için 20, 40, 60 ve 80<sup>0</sup>C’de gerçekleştirilmiştir. Çünkü bu kadar yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin kullanım yerlerine göre en uygun bağlantının seçilebilmesi için deney sonuçlarını iyi incelemek ve hasar bölgesinin ne tür bir tamiratla iyileştirilmesine karar verebilmek için hem düz hem de lifli yapıştırma bağlantısı incelenmiştir.
- Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre aynı boyutlardaki malzemelerin hasarlı bölgelere cam elyafı lifler atılarak reçine ile takviyesi sonucu bölgedeki mukavemet değerleri incelenen tüm sıcaklıklar için düz yapıştırma bağlantısına göre daha yüksek çıkmıştır. B ve C tipi bağlantılar, A tipi sistemlerle kıyaslanırsa bağlantı mukavemetinde sırasıyla %80.7 ve %127’lik bir iyileştirme sağlamaktadır. Bir diğer önemli nokta ise, maksimum ortalama yerdeğiştirme değerleri fiberle güçlendirilmiş B ve C tipi bağlantılarda A tipine kıyasla sırasıyla %60 ve %92 oranında artmaktadır. 20<sup>0</sup>C den 40<sup>0</sup>C’ye yükseldiğinde hasar yükü ve yer değiştirme değerleri artış göstermektedir. Sıcaklık 40<sup>0</sup>C’den 60<sup>0</sup>C’ye yükseldiğinde hasar yükleri azalırken yer değiştirmelerde artış gözlemlenmiştir. A tipi bağlantı için 80<sup>0</sup>C’de yapıştırıcının yumuşaması nedeniyle hasar yükleri önemli ölçüde düşmektedir. B ve C tipi bağlantılarda da benzer durum gözlemlenmiştir fakat cam fiber ile güçlendirmenin etkileri hala gözlemlenebilmektedir.
- ANSYS 11.0 ile yapılan üç boyutlu hasar analizi sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir.

- Yapıştırma yoluyla birleştirilecek parçaların bağlantı şekilleri özel olarak tasarlanmalıdır. Gerilme yükleri düşünmeksizin bir tasarım sadece zaman kaybı olacaktır. Kesme yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder. Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar yükün büyük bir kısmı kesme yükü olarak iletilebilecek biçimde olmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] ASTM D907-74, Definition of Terms Relating to Adhesives, 1974.
- [2] Shields, J., Adhesive Bonding, The Design Council, The British Standards Institution and The Council of Engineering Institutions, Oxford University Press, 1975.
- [3] Kinloch, A.J., Adhesion and adhesives science and technology, Chapman&Hall, ISBN 0-412-27440-X, p.441, London, 1987.
- [4] Loctite Worldwide Design Handbook, 1988.
- [5] Volkersen, O., Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, vol 15, 41-47, 1938.
- [6] Goland, M. and Reissner, E., The Stresses in Cemented Joints, Journal of Applied Mechanics, 11, 59-45, 1944.
- [7] Benson, N.K., Influence of Stres Distribution on Joint Strength, Adhesion Fundamentals and Practice, UK Ministry Technology, McLaren, London, pp 191, 1969.
- [8] Demarkless, L.R., Investigation of the Use of a Rubber Analog in the Study of Stres Distribution in Riveted and Cemented Joints, Tech. Note 3413, Nat. Advisory Cttee Aeronoustics, Washington, D.C, 1955.
- [9] Sazhin, A.M., Determining the Stresses in Bonded Joints Between Metal Plates, Russian Engineering Journal, 44(11), 45-49, 1964.
- [10]. Segerlind, L.J., On the Shear Stresses in Bonded Joints, Transactions of ASME J. of Appl. Mech., 35(1), 177-178, 1968.
- [11] Hart-Smith, L.J., Adhesive-bonded single-lap joints, CR-112235, Nasa Langley Resesarch Center, 1973.
- [12] Ojalvo, I.U., Idinoff, H.L., Bond thickness upon stresses in single-lap adhesive joints, AIAA Journal, 16(3), 204-211, 1978.
- [13] Carpenter, W., Stresses in bonded connections using finete elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 30, 1659-1680, 1980.
- [14] Oplinger, D.W., Effects of adherent deflection on single lap joints, International of Solids and Structures, 31, 2565-2587, 1994.
- [15] Kline, R.A., Stress Analysis of Adhesively Bonded Joints, Proceedint of the International Symposium on Adhesive Joints, H,Kansas City, 587-610, 1982.

- [16] Muki, R. and Sternberg, E., On The Stress Analysis of Overlapping Bonded Elastic Sheets, *Int. J. Solids Structures*, 4, 75-94, 1968.
- [17] Erdogan, F., Distribution of Adhesive Shear Stress in a Stiffened Plate, Technical Progress Report NASA Grant no NGR 39-007-011, 1969.
- [18] Erdogan, F. and Ratwani, M., Stress Distribution in Bonded Joints, *J. Composite Materials*, 15, 378-393, 1971.
- [19] Wah, T., Stress Distribution in a Bonded Anisotropic Lap Joint, *Transactions of ASME, Series H, J. of Engineering Materials and Technology*, 95, 174-181, 1973.
- [20] Chang, D.J. and Muki, R., Stress Distribution in a Lap Joint under Tension-Shear, *Int. J. Solids Structures*, 10, 503-517, 1974.
- [21] Adams, R.D., Strength Predictions for Lap-Joints, Especially with Composite Adherents, *Journal of Adhesion*, 30, 219-242, 1989.
- [22] Mazumdar, S.K. and Mallick, P.K., Static and Fatigue Behaviour of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites, *Polymer Composites*, 19, 139-146, 1998.
- [23] Hart-Smith, L.J., Design methodology for bonded-bolted composite joints Technical Report AFWAL-TR-81-3154, Douglas Aircraft Company, 1982.
- [24] Hart-Smith, L.J., Bonded-bolted composite joints, *J. Aircraft*, 22(11), 993-1000, 1985.
- [25] Chan, W.S. and Vedhagiri, S., Analysis of composites bolted-bonded joints used in repairing, *J. Compos. Mater*, 35(12), 1045-1061, 2001.
- [26] Fu Maofeng and Mallick, P.K., Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 21, 145-159, 2001.
- [27] Pfeiffer, P. and Shakal, M., Effect of Bonded Metal Substrate Area and its Thickness on the Strength and Durability of Adhesively Bonded Joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 12, 339-348, 1998.
- [28] Gali, S., Doley, G. and Ishai, O., An effective stress-strain concept in the mechanical characterization of structural adhesive bonding, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 1(3), 135-140, 1981.
- [29] Chalkley, P.D. and Chiu, W.K., An improved method for testing the shear stress-strain behaviour of adhesives, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 13(4), 237-242, 1993.
- [30] Wang, C.H. and Chalkley, P., Plastic yielding of a film adhesive under multi-axial stresses, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 20, 155-164, 2000.

- [31] Vooley, G.R. and Carver, D.R., Stress concentration factors for bonded lap joint, *J. Aircraft*, 8, 817-820, 1971.
- [32] Carpenter, W.C. and Borsoum, R., Two finite element for modeling the adhesive bonded configuration, *J. Adhes.*, 30, 25-46, 1989.
- [33] Tsai, M.Y. and Morton, J., The effect of a spew fillet on adhesive stress distribution in laminated single-lap joints, *Computers and Structures*, 32, 13-131, 1995.
- [34] Richardson, G., Crocombe, A.D. and Smith, P.A., A comparison of two and three-dimensional finite element analysis of adhesive joints, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 13, 193-200, 1993.
- [35] Li, G. and Lee-Sullivan, P., Finite element and experimental studies on single-lap balanced joint in tension, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 21, 211-220, 2001.
- [36] Andruet, R.H., Dillard, D.A. and Holzer, A.M., Two and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 21, 17-34, 2001.
- [37] Pandey, P.C., Shankaragouda, H. And Singh, Kr.A., Nonlinear Analysis of Adhesively Bonded Lap Joints Considering Viscoplasticity in Adhesives, *Computers and Structures*, 70, 387-413, 1999.
- [38] Adams, R.D., and Peppiat, N.A., Stress Analysis of Adhesive Bonded Lap Joints, *J.of Strain Analysis*, 9(3), 185-196, 1974.
- [39] Apalak, M.K. and Güneş, R., On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single-lap joint, *Computers and Structures*, 80, 85-98, 2002.
- [40] Lee, S.J. and Lee, W.C., Optimal-design of the adhesively bonded tubular single lap joint, *Journal of Adhes.*, 50(2-3), 165-80, 1995.
- [41] Reedy, S.J. and Guess, T.R., Butt joint strength and effect of residual-stress and stress-relaxation, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 10(1), 33-45, 1996.
- [42] Ioka, S., Kubo, S., Ohji, K. and Kishimoto, J., Thermal residual stresses in bonded dissimilar materials and their singularities, *JSME Int. J. Ser A-Mech. Mater Engng.*, 39(2), 197-203, 1996.
- [43] Humfeld G.R. and Dillard, D.A., Residual stress development in adhesive joints subjected to thermal cycling, *J. Adhes.*, 65(1-4), 277-306, 1998.

- [44] Abedian, A. and Szyszkowski, W., Effects of surface geometry of composites on thermal stress distribution a numerical study, *Composites Science and Technology*, 59(1), 41-54, 1999.
- [45] Harris, J.A. and Adams, R.D., Strenght prediction of bonded sinle lap joints by nonlinear finite element method, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 4(2), 65-78, 1984.
- [46] Sancaktar, E. and Simmons, S.R., Optimization of adhesively bonded single lap joints by adherent notching, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(11), 1363-1404, 2000.
- [47] Avila, A.F. and Bueno, P.O., Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, 24, 407-414, 2004.
- [48] Kelly, G., Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints, *Composite Structures*, 69, 35-43, 2005.
- [49] Turgut, A., and Sancaktar, E., The Effects of Cure and Loading Conditions on Fiber matrix Adhesion, *The Adhesion Society*, 41,24-26, 1991.
- [50] Bigwood, D.A. and Crocombe, 1990, A.D., Nonlinear adhesive bonded joint design analyses, *Int. J. Adhes.*, 10, 31-41, 1990.
- [51] Goncalves, J.P.M., De Moura, M.F.S.F. and De Castro, P.M.S.T., A three-dimensional finite element model for stres analysis of adhesive joints, *Int. J. Adhes.*, 22, 357-365, 2002.
- [52] Lang, T.P. and Mallick, P.K., Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints, *Int. J. Adhes.*, 18, 167-177, 1998.
- [53] Dorn, L. and Liu, W., Stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints, *Int. J. Adhes.*, 13, 21-31, 1993.
- [54] Taib, A.A., Boukhili, R., Achion, S. and Boukehili, A., Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 237- 248, 2006.
- [55] Kaya, A., Tekelioğlu, M.S. and Findik, F., Effects of various parmeters on dynamic characteristics in adhesively bonded joints, *Materials Letters*, 58, 3451-3456, 2004.
- [56] Özel, A., Aydın, M.D. and Temiz, Ş., The effects of owerlap lenght and adherent thickness on the strenght of adhesively bonded joints subjected to bending moment, *J. Adhesion Sci. Technology*, 18(3), 313-325, 2004.

- [57] Aydın, M.D., Özel, A. and Temiz, Ş., The effect of adherent thickness on the failure of adhesively bonded single-lap joints, *J. Adhesion Sci. Technology*, 19(8), 705-718, 2005.
- [58] Temiz, Ş., Aydın, M.D., Alar, G. and Özel, A., Nemli ortamlara maruz yapısal yapıştırıcıların dayanımı, TMMOB Makine Müh. Odası IX. Otomotiv ve yan sanayi sempozyumu, 27-28 Mayıs, 2005.
- [59] Kaya, A., Investigation of stress distributions in adhesive-bonded lap joint, MS. Degree Thesis, Dokuz Eylül University, Institute of Science and Technology, İzmir, 1991.
- [60] Apalak, Z.G., Yapıştırıcı ile birleştirilmiş T-tipi bağlantıların sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz ve tasarımı, Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1995.
- [61] Kodakoğlu, L., Yapıştırıcıların genel özellikleri ve çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesinin analitik ve nümerik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.
- [62] Engin, A., Yapıştırıcılarla birleştirilmiş çift bindirmeli ankastre bağlantıların sonlu elemanlar metodu ile geometrik bakımdan lineer ve lineer olmayan analizi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1997.
- [63] Şekercioğlu, T., Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2001.
- [64] Aydın, M.D., Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2003.
- [65] Dransfield K.A., Baille C. And Mai, Y.W., Improving the Delamination Resistance of CFRP by Stitching - A Review, *Composites Science & Technology*, 50, 305-317, 1994.
- [66] Mouritz, A.P., Leong, K.H. and Herszberg, I., A Review of the Effect of Stitching on the in-Plane Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Polymer Composites, *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 28, 979-991, 1997.

- [67] Farley, G.L., Smith, B.T. and Maiden, J., Compression Response of Thick Layer Composite Laminates With Through-the-Thickness Reinforcement. *Reinforced Plastics & Composites*, 11, 787-810, 1992.
- [68] Jain, L. K., Dransfield, K. A. and Mai, Y.-W., On the Effects of Stitching in CFRP - II: Mode II Delamination Toughness, *Composites Science & Technology*, 58(6), 829-837, 1998.
- [69] Jain, L. K. and Mai, Y.W., Determination of Mode II Delamination Toughness of Stitched Laminate Composites, *Composites Science & Technology*, 55(3), 241-253, 1995.
- [70] Jain, L. K., Dransfield, K. A. and Mai, Y.-W., On the Effects of Stitching in CFRP - II: Mode II Delamination Toughness, *Composites Science & Technology*, 58(6), 829-837, 1998.
- [71] Jain, L. K. and Mai, Y.-W., On the Effect of Stitching on Mode I Delamination Toughness of Laminated Composites, *Composites Science & Technology*, 51, 331-345, 1994.
- [72] Gunnion, A. J., Scott, M. L., Thomson, R. S. and Hachenberg, D., Thickness Effects on the Compressive Stiffness and Strength of Stitched Composite Laminates, *Composite Structures*, Vol. 66(1-4), 479-486, 2004.
- [73] Sun, X., Tong, L., Wood, M. D. K. and Mai, Y.-W., Effect of Stitch Distribution on Mode I Delamination Toughness of Laminated DCB Specimens', *Composites Science & Technology*, Vol. 64(7-8), 967-981, 2004.
- [74] Cox, B. N., Massabó, R. and Kedward, K. T., Suppression of Delaminations in Curved Structures by Stitching, *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 27(12), 1133-1138, 1996.
- [75] Huang, S. L., Richey, R. J. and Deska, E. W., Cross Reinforcement In a GR/EP Laminate, in *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Winter Annual Meeting at San Francisco, USA, 1978*
- [76] Stringer, L. G. and Hiley, M. J., Through Thickness Reinforcement of Composites: Z-Pinning, Stitching and 3-D Weaving, in *Proceedings of the 14th International Conference on Composite Materials at San Diego, USA; Paper no. 1312, 2003.*
- [77] Partridge, I. K., Cartié, D. D. R., Troulis, E., Grassi, M. and Zhang, X., Evaluating the Mechanical Effectiveness of Z-Pinning, in *Proceedings of the 35th ISTC SAMPE Technical Conference at Dayton OH, USA, 2003.*



- [78] Troulis, E., Cartié, D. D. R., Bartattoni, L. and Partridge, I. K. Z-Pinned Woven Laminates: Interlaminar Fracture Results and Pinning Quality Considerations, in Proceedings of the 6th International Conference on Deformation & Fracture of Composites at Manchester, UK, 2001.
- [79] Cartié, D. D. R. and Partridge, I. K., Delamination Behaviour of Z Pinned Laminates, in Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials at Paris, France, 1999.
- [80] Cartié D. D. R. , Cox. B. N. and Fleck, N. A., Mechanisms of Crack Bridging by Composite and Metallic Rods', *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 34, 1325-1336, 2004.
- [81] Graftieaux, B. P. H., Rezai, A., and Partridge, I. K., Effects of Z-Pin Reinforcement on the Delamination Toughness and Fatigue Performance of Uni-Directional AS4/8552 Composite, in Proceedings of ECCM-9 at Brighton, UK, 2000.
- [82] Partridge, I. K., Cartié, D. D. R., Troulis, E., Grassi, M., and Zhang, X., Evaluating the Mechanical Effectiveness of Z-Pinning', in Proceedings of the 35th ISTC SAMPE Technical Conference at Dayton OH, USA, 2003.
- [83] Chang, P. and Mouritz A.P., Elevated Temperature Properties of Pinned Composite Lap Joints, *Journal of Composite Materials*, 2008.
- [84] Mouritz, A. P., Review of Z-Pinned Composite Laminates', *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 38(12), 2383-2397, 2007.
- [85] Matsuzaki, R., Motoko, S. and Akira, T., Improving Performance of GFRP/Aluminum Single Lap Joints Using Bolted/Co-cured Hybrid Method, *Composites Part A*, 39, 154-163, 2008.
- [86] Aktas, A. and Polat Z., Improving Strength Performance of Adhesively Bonded Single-lap Composite Joints, *Journal of Composite Materials*, 2010.
- [87] Kaya, F., Yapıştırıcılar, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004.
- [88] Houwink, R. and Salomon, G., Adhesion and Adhesives, 2nd edition, Elsevier Publishing Co, 1965.
- [89] Wake, W.C., Adhesion and the Formulation of Adhesives, Structural Adhesives in Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE, 151/86, 161-168, 1986.
- [90] Adams, R.D. and Wake, W.C., Structural Adhesive Joint in Engineering, Elsevier Science Publisher, London, 1984.

- [91] Temiz, S., Study of the Effect of Environmental Factors on Mechanical Properties of Adhesively Bonded Joints, Ph. D. Thesis, Ataturk University, Erzurum, 2003.
- [92] Kayacan, R., Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1988.
- [93] Apalak, M.K., Yapıştırıcı ile Metalleri Birleştirme Tekniği, Makine Bülteni, 7(11), 29-31, 1998.
- [94] Bozacı, A., Koşif, İ, Çolak, Ö.Ü., Makine Elemanlarının Projelendirilmesi, Seç Yayın Dağıtım İstanbul.
- [95] Sika Teknoloji Klavuzu, 2008.
- [96] Kim, K.S., Yi, Y.M., Cho G.R. and Kim C.G., Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints, Composite Structures, 82, 513-520, 2008.
- [97] Olofsson K., Fallstrom K.E. and Palagyi P., Laser Generated and Recorded Transient Bending Waves in Composite Tubes, Experimental Mechanics, 36(3), 224-231, 1996.
- [98] Rao M.V., Rao K.M., V. Raju R.C., Murthy B.K. and Raju V.S., Analysis of Adhesively Bonded Single Lap Joint in Laminated Frp Composites Subjected to Transverse Load, International Journal of Mechanics and Solids, 3(1), 75-86, 2008.
- [99] Solmaz M.Y., Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Tasarım ve Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
- [100] ASTM D 2093-97. Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials, Philadelphia.
- [101] Panigrahi, S.K. and Pradhan, B., Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 26, 183-201, 2007.