

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN
MEKANİK ANALİZ VE TASARIMLARI**

Murat Yavuz SOLMAZ

Tez Yöneticisi:
Prof. Dr. Aydın TURGUT

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ANALİZ VE TASARIMLARI

Murat Yavuz SOLMAZ

Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Danışman: Prof. Dr. Aydın TURGUT (Fırat Üniv. Makine Müh. Böl. Mekanik A.B.D.)

Üye: Prof. Dr. Mehmet ÜLKER (Fırat Üniv. İnşaat Müh. Böl. Mekanik A.B.D.)

Üye: Doç. Dr. Şemsettin TEMİZ (Atatürk Üniv. Makine Müh. Böl. Mekanik A.B.D.)

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR (Fırat Üniv. Makine Müh. Böl. Mekanik A.B.D.)

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (Fırat Üniv. Makine Müh. Böl. Mekanik A.B.D.)

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım esnasında maddi manevi her türlü desteği ile yanımda olan çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Aydın TURGUT'a, eleştiri ve önerilerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Mehmet ÜLKER ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR'e, çalışmalarım esnasında birçok çalışmasından yararlandığım Akron Üniversitesi Polimer Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Erol SANCAKTAR'a, teşekkürlerimi sunarım.

Bulk numunelerinin hazırlanması ve deneylerinin gerçekleştirilmesinde her türlü desteğini esirgemeyen, sonlu elamanlar çalışmalarım süresince sıkça bilgilerine müracaat ettiğim değerli hocam Sayın Doç. Dr. Şemsettin TEMİZ'e, görüş ve önerileri ile çalışmaya katkı sağlayan değerli arkadaşım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN'a ve Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARATON'a, çalışmada kullanılan yapıştırıcılardan Neoxil CE92 N8'in temininde yardımcı olan İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Limited Şirketi'ne ve SikaForce 7710'un temin edilmesinde katkı sağlayan Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. Endüstri Bölümü Adana Bölge Satış Temsilcisi Sayın Kadir KORAL'a ve firma çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Bu çalışmamı destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Birimi'ne, numunelerimi hazırlarken yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Kadir TURAN'a ve Sayın Erkan ŞATIR'a, bölüm elemanlarına ve çalışmalarım esnasında görmüş olduğum desteklerinden dolayı aileme ve özellikle babama teşekkürlerimi sunarım.

Murat Yavuz SOLMAZ

Mayıs 2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	IX
SİMGELER	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
2. LİRETATÜR ÇALIŞMASI	4
3. YAPIŞMA OLAYI VE YAPIŞTIRICILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ	16
3.1. Giriş	16
3.2. Yapışma	16
3.2.1. Adhezyon	16
3.2.2. Kohezyon	18
3.2.3. İslanabilirlik	19
3.2.4. Yüzey Hazırlığı	21
3.2.4.1. Yapıştırılacak yüzeylerin yağdan ve pisliklerden arındırılması	22
3.2.4.2. Mekanik ön işlem	23
3.2.4.3. Aşındırma	23
3.2.4.4. Kimyasal ön işlem	24
3.2.4.4.1. Metalik Malzemelerin Kimyasal Ön İşlemi	24
3.2.4.4.1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımaları	25
3.2.4.4.1.2. Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Kimyasal Ön İşlem	25
3.2.4.4.1.3. Bakır / Nikel Alaşımaları	26
3.2.4.4.1.4. Düşük Mukavemetli Çelikler	26
3.2.4.4.1.5. Paslanmaz Çelikler	26
3.2.4.4.1.6. Titanyum ve Titanyum Alaşımaları	27
3.2.4.4.2. Plastik Malzemelerin Ön İşlemi	27

3.2.4.4.2.1. Termosetler	27
3.2.4.4.2.2. Termoplastikler	28
3.2.4.4.2.3. Plastik Köpükler.....	28
3.2.4.4.2.4. Metalik Olmayan Honeycomb'lar.....	29
3.2.4.5. Primerler.....	29
3.2.5. Montaj	29
3.3. Yapıştırıcılar ve Çeşitleri	32
3.3.1. Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar	32
3.3.1.1. Anerobikler	32
3.3.1.2. Siyanoakrilatlar	34
3.3.1.3. Akrilikler.....	36
3.3.1.4. Silikonlar.....	37
3.3.1.5. Poliüretanlar	38
3.3.1.6. Epoksiler	39
3.3.1.7. Fenolikler	39
3.3.2. Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar	39
3.3.2.1. Sıcak Eriyikler.....	39
3.3.2.2. Kauçuk Yapıştırıcılar	39
3.3.2.3. PVA'lar (Polyvinyl Acetates).....	39
3.3.3. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar.....	39
3.3.4. Formları Açısından Yapıştırıcılar	40
3.3.5. Reçineler	40
3.3.6. Köpükler.....	40
3.4. Yapıştırıcı ile Birleştirme Şekilleri	41
3.5. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilme Halleri	44
3.6. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözümeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması	45
3.6.1. Perçin Bağlantıları.....	46
3.6.2. Kaynak Bağlantıları	47
3.6.3. Lehim Bağlantıları	47
3.6.4. Vida ve Cıvata ile Yapılan Bağlantılar	47
3.6.5. Sıkı Geçme Bağlantıları	48
3.6.6. Yapıştırma Bağlantıları.....	48
3.7. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Tipleri.....	49

4. KOMPOZİT MALZEMELER	51
4.1. Giriş.....	51
4.2. Kompozit Malzemelere Genel Bakış	51
4.3. Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler	53
4.3.1. Termoset Matrisler.....	54
4.3.2. Termoplastik Matrisler.....	56
4.4. Takviye Malzemeleri (Elyaflar).....	57
4.4.1. Cam Elyafı	58
4.4.2. Karbon Elyafı.....	58
4.4.3. Aramid Elyafı.....	59
4.5. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	60
4.5.1. Elle Yatırma (Hand Lay-Up)	60
4.5.2. Püskürtme (Spray-Up)	61
4.5.3. Elyaf sarma (Filament Winding).....	61
4.5.4. Reçine transfer kalıplama RTM / Reçine enjeksiyonu.....	61
4.5.5. Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion).....	61
4.5.6. Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC,BMC)	61
4.5.7. Hazır kalıplama pestili / SMC (Sheet Moulding Composites).....	62
4.5.8. Hazır kalıplama hamuru/BMC (Bulk Moulding Composites).....	62
5. MATERYAL ve YÖNTEM	63
5.1. Giriş.....	63
5.2. Yapıştırılan Kompozit Malzeme (Adherent) ve Mekanik Özellikleri.....	63
5.3. Kullanılan Yapıştırıcılar.....	69
5.3.1. Neoxil CE 92 N8.....	69
5.3.2. SikaForce 7710	70
5.4. Yapıştırıcıların Gerilme-Şekil Değişirme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	70
5.4.1. Bulk Numunelerin Hazırlanması.....	71
5.4.2. Bulk numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Davranışının Belirlenmesi.....	72
5.4.2.1. Neoxil CE 92 N8 Bulk Numunelerinin Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramı.....	74
5.4.2.2. SikaForce 7710 Numunelerinin Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramı	76
5.5. Teorik Analiz	77
5.5.1. Elastik analiz.....	77
5.6. Ansys Sonlu Elemanlar Yazılımı	79

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	81
6.1. Giriş.....	81
6.2. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar.....	81
6.3. Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Eleman Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	86
6.4. Sonlu Eleman Analizlerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	90
6.4.1. Bindirme uzunluğunun bağlantı dayanımı üzerine etkisi.....	90
6.4.2. Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	112
6.4.2.1. Neoxil CE92 N8 ile Birleştirilmiş 25.4mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	112
6.4.2.2. Neoxil CE92 N8 ile Birleştirilmiş 38.1mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	115
6.4.2.3. SikaForce 7710 ile Birleştirilmiş 25.4mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	119
6.4.2.4. SikaForce 7710 ile Birleştirilmiş 38.1mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	123
6.4.3. Toplam Yapışma Alanı Eşit Numunelerde Serbest Uç Açısının Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	127
6.4.3.1. Neoxil CE92 N8 ile Birleştirilmiş Toplam Yapıştırma Alanı Eşit Tek Tesirli Bind. Bağlantılarında Serbest Uç Açısının Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	128
6.4.3.2. SikaForce 7710 ile Birleştirilmiş Toplam Yapıştırma Alanı Eşit Tek Tesirli Bind. Bağlantılarında Serbest Uç Açısının Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi.....	132
7. SONUÇLAR	143
8. KAYNAKLAR	146

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil

Şekil 1.1.	Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları.....	3
Şekil 2.1.	Tek bindirme bağlantısında yükleme hattı eksantrikliğinin eğilme Momentlerine Nasıl neden olduğunun ve yüklemeye bağlı olarak yapıştırılan malzemelerin deformasyonunun bu eğilme momentlerini nasıl azalttığıнын şematik gösterimi	5
Şekil 2.2.	Bindirme bağlantılarının sonlu eleman modelleri için sınır şartları	10
Şekil 3.1.	Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler	17
Şekil 3.2.	Islanabilirlik.....	19
Şekil 3.3.	Temas Açısı ile Mukavemet Değişimi	20
Şekil 3.4.	Islanabilirlik testi	21
Şekil 3.5.	Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirler adhezyonu düşürür	21
Şekil 3.6.	Soyulma Tabakası	28
Şekil 3.7.	Vakum Torbası	30
Şekil 3.8.	Anaerobiklerin sertleşme mekanizmaları	33
Şekil 3.9.	Kürleşme hızı – malzeme	34
Şekil 3.10.	Kürleşme hızı – boşluk.....	34
Şekil 3.11.	Kürleşme hızı – sıcaklık	34
Şekil 3.12.	Kürleşme hızı – aktivatör	34
Şekil 3.13.	Bağlı nemin bir fonksiyonu olarak siyanoakrilat yapıştırıcıların kürleşmesi	35
Şekil 3.14.	Siyanoakrilatların sertleşme mekanizması	35
Şekil 3.15.	Kürleşme hızı - bağlı nem	37
Şekil 3.16.	Silikonla yapıştırılmış tipik ek yeri	38
Şekil 3.17.	Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri.....	41
Şekil 3.18.	Tek tesirli bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve şekil değiştirdikten sonraki görünümü	42
Şekil 3.19.	Yüklenmiş haldeki tek tesirli bindirme bağlantısının deforme olmuş hali ve kayma gerilmesi dağılımı.....	43
Şekil 3.20.	Yüklenmiş haldeki çift tesirli bindirme bağlantısında ve yapıştırıcıda oluşan gerilmeler	44
Şekil 3.21.	En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları	44
Şekil 3.22.	Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları.....	46

Şekil 3.23. Şeffaf ve ışığa duyarlı malzemelerden yapılmış yapıştırıcı ve mekanik birleştirmelerde gerilme dağılımı	48
Şekil 3.24. Bir yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımı	49
Şekil 5.1. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kalıbın teknik resmi.....	64
Şekil 5.2. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kalıp.....	65
Şekil 5.3. Numunelerin çekilmesinde kullanılan üniversal çekme cihazı.....	65
Şekil 5.4. Bulk numunelerin çekilmesinde kullanılan üniversal çekme cihazı.....	67
Şekil 5.5. Açık verilmemiş numunelerin önden ve üstten görünüşü	68
Şekil 5.6. Açık numunelerin önden ve üstten görünüşü	68
Şekil 5.7. Numunelerin perspektif görünüşü	69
Şekil 5.8. Bulk numuneler için standart çekme numunesi.....	71
Şekil 5.9. Bulk numune hazırlarken kullanılan pres makinesi.....	72
Şekil 5.10. Neoxil CE 92 N8 bulk numuneleri	75
Şekil 5.11. Neoxil CE 92 N8 bulk numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı	75
Şekil 5.12. SikaForce 7710 bulk numuneleri.....	76
Şekil 5.13. SikaForce 7710 bulk numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	76
Şekil 5.14. Uç açısı sıfır olan numunelerin meshlenmiş hali.....	78
Şekil 5.15. Uç açısı sıfırdan farklı olan numunelerin meshlenmiş hali	79
Şekil 6.1. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafelerine bağlı olarak deneysel hasar kuvvetleri.....	83
Şekil 6.2. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafesine bağlı olarak deneysel hasar kuvvetleri	84
Şekil 6.3. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafesine bağlı olarak ortalama kayma gerilmesi değişimi.....	85
Şekil 6.4. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafesine bağlı olarak ortalama kayma gerilmesi değişimi.....	85
Şekil 6.5. Farklı uç açılara sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için kritik bölge.....	86
Şekil 6.6. 0° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları	93
Şekil 6.7. 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları	98

Şekil 6.8. 30° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları	102
Şekil 6.9. 45° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları	105
Şekil 6.10. 60° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları	108
Şekil 6.11. 75° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları	111
Şekil 6.12. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş 25.4mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi	115
Şekil 6.13. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş 38.1mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi	118
Şekil 6.14. SikaForce 7710 ile birleştirilmiş 25.4mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi	122
Şekil 6.15. SikaForce 7710 ile birleştirilmiş 38.1mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi	126
Şekil 6.16. Toplam yapışma alanı.....	127

- Şekil 6.17.** Neoxil CE82 N8 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi131
- Şekil 6.18.** SikaForce 7710 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi135
- Şekil 6.19.** İki farklı yapıştırıcı ile yapıştırılmış eşit yapıştırma alanına sahip bağlantılarda serbest uç açısının maksimum (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme oranları açısından karşılaştırılması.....137
- Şekil 6.20.** İki farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş 25.4 ve 38.1 mm bindirme mesafesine sahip bağlantılarda bindirme mesafesi ve serbest uç açısının maksimum (a) normal (σ_x), (b) soyulma, (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme oranları açısından karşılaştırılması141

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. En önemli solventler ve temizleme kapasiteleri	22
Tablo 3.2. Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Dağlama Solüsyonlarının Hazırlanması	26
Tablo 3.3. Malzemeye bağlı olarak ön işlem yöntemleri.....	29
Tablo 3.4. Temel hasar tipleri.....	50
Tablo 4.1. Matris, Takviye elemanı ve Kompozit malzeme yapı tipleri.....	53
Tablo 4.2. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri	56
Tablo 4.3. Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	57
Tablo 4.4. Belli başlı elyafların karşılaştırılması	59
Tablo 5.1. Kompozit malzemelerden üretilen numunelerin geometrik ölçüleri	66
Tablo 5.2. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.....	67
Tablo 5.3. Neoxil CE 92 N8'nin özellikleri.....	70
Tablo 5.4. SikaForce 7710'un özellikleri	70
Tablo 5.5. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri	77
Tablo 6.1. Numunelerin deneysel olarak tespit edilen hasar yükleri, ortalama kayma gerilmeleri ve hasar tipleri.....	82
Tablo 6.2. Yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan gerilmelerin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	88
Tablo 6.3. Yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan hasar yüklerinin deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılması.....	89

SİMGELER

M_e	Eğilme momenti
K	Moment parametresi
P	x- eksenine doğrultusunda uygulanan kuvvet
Ψ_{LS}	Katı-sıvı temaslarının yüzey enerjisi
Ψ_{LV}	Sıvı-gaz temaslarının yüzey enerjisi
Ψ_{SV}	Katı-gaz temaslarının yüzey enerjisi
τ	Kayma gerilmesi
σ	Normal gerilme
$\sigma_{eş}$	Von-Mises eşlenik gerilmesi
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
ν	Poisson oranı
τ_{ort}	Ortalama Kayma gerilmesi
w	Numune genişliği
a	Bindirme mesafesi uzunluğu
t	Yapıştırılan malzeme kalınlığı
n	Yapıştırıcı kalınlığı
l	Yapıştırılan malzemenin boyu
θ	Serbest uç açısı
DH	Kalkma (Delaminasyon) yoluyla hasar
AH	Adhezyon hasarı
KH	Kohesiv hasar
ÖKH	Özel kohesiv hasar
ρ	Yoğunluk
ε	Normal şekil değişimi

ÖZET

Doktora Tezi

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MEKANİK ANALİZ VE TASARIMLARI

Murat Yavuz SOLMAZ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

2008, Sayfa : 153

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik davranışları, bağlantının geometrik özellikleri ve bağlantıyı oluşturan malzemelerin özellikleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu durum bağlantının mekanik davranışını tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik davranışını anlayabilmek için birçok çalışma yapılmış ve farklı modeller önerilmiştir.

Bu çalışmada, farklı bindirme uzunluklarında ve farklı uç açılarında biri yüksek diğeri düşük dayanımlı iki yapıştırıcı kullanarak birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının aksenal çekme yükü altındaki mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışma deneysel ve sayısal olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmada kullanılan yapıştırıcılardan bulk numuneler hazırlanmış ve daha sonra bu numunelerden yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme davranışları belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan yapıştırıcıların performanslarını değerlendirebilmek amacıyla başlıca 2 farklı bindirme mesafesinde deneyler yapılmıştır. Bu iki bindirme mesafesine ilave olarak sadece serbest uç açısının bağlantı dayanımı üzerindeki etkisi tespit edilmeye çalışılmış bunun için 6 farklı uç açısına sahip numuneler toplam yapışma alanının sabit kalmasını sağlayan bindirme mesafeleri tespit edilerek birleştirilmiş ve bu numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınarak lineer sonlu elemanlar

yöntemiyle gerilme analizi yapılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyumun olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, Neoxil CE92 N8, SikaForce 7710 dan daha yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen bindirme mesafesindeki artış ve serbest uç açısındaki değişimle SikaForce 7710 ile birleştirilmiş bağlantıların Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılar kadar hatta serbest uç açısındaki değişiklikler ile daha iyi performans gösterebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcı bağlantılar, serbest uç açısı, bindirme mesafesi, lineer sonlu elemanlar yöntemi, aksenal çekme.

ABSTRACT

PhD Thesis

MECHANICAL ANALYSIS AND DESIGN OF ADHESIVE BONDED JOINTS

Murat Yavuz SOLMAZ

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

2008, Page : 153

The mechanical behaviour of the adhesively bonded joints depends on many parameters such as the geometrical features of the joint and the features of materials generating it. This dependence complicates the prediction of the overall mechanical behaviour of the joint. In order to understand the mechanical behaviour of adhesively bonded joints, many studies have been carried out and different models have been proposed.

In this thesis, it has been analyzed the mechanical behaviour under axial tensile loading of the single lap joints bonded by using two different adhesives that one is stiff and the other is flexible having different overlap lengths and different taper angles. The study has been carried out both experimentally and numerically. The bulk tensile specimens of adhesives used in the study have been initially prepared and then the stress-strain behaviour of the adhesives has been determined.

With the aim of evaluating the performances of the used adhesives, it has been basically realized experiments at two different overlap distances. Additionally, the effect on the joint strength of merely taper angle has been endeavoured to identify, such that the specimens having 6 different taper angles has been jointed by being invented the overlap distances achieving to fix total adherence area and the obtained specimens also have been subjected to the strain experiment. Taking into consideration the stress-strain behaviour of the adhesives and the bonded material at the single lap joints bonded by using Neoxil CE92 N8 and SikaForce 7710, the stress analysis has been accomplished by the linear finite elements method. The experimental results have been compared with the obtained results by finite elements method and a good agreement has been observed.

Consequently, the thesis has been finalized with the following novel emergent results: Although Neoxil CE92 N8 has more strength than SikaForce 7710, the joints bonded by SikaForce

7710 exhibits a good performance as well as the ones bonded by Neoxil CE92 N8 as increasing the overlap distance and changing the taper angle and even the performance of SikaForce 7710 may overcome that of the other according to the amount of the increasing or changing.

Keywords: Adhesive joints, taper angle, overlap length, linear finite elements method, axial tensile loading.

1. GİRİŞ

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.

Kompozit malzemeler ve onların üretim yöntemlerinde özellikle son 20 yılda önemli atılımlar gerçekleştirilmiştir. Bu durum hava taşıtlarının birçok parçasında polimer matris kompozitlerin yeni uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur[3]. Kompozit malzemelerde meydana gelen bu hızlı gelişim, yapısal elemanların birleştirme yöntemlerinde etkili ve güvenilir ilerlemelerin ortaya çıkmasını, dolayısıyla mekanik birleştirme yöntemlerinden uzaklaştırılmasını zorunlu hale getirmiştir[4].

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, sönümleme ve daha mükemmel yorulma özelliklerine sahiptirler.

Yapısal yapıştırıcılar mühendislik malzemeleridir ve yapıştırıcı birleştirme işlemleri üretim mühendisliğinin bir parçası olarak kabul edilmektedir. Ancak diğer birleştirme metotlarıyla birlikte yapıştırıcı ile birleştirmenin yada diğer bir adıyla kimyasal kaynaklamanın bazı avantaj ve kısıtlamaları söz konusudur. Modern endüstriyel tasarımcılar ve mühendisler çivileme, cıvatalama, perçinleme, lehimleme, kaynaklama yada yapıştırma gibi iki parçayı

birleştirmek istediklerinde kullanacakları yöntemin avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulundurmak zorundadırlar.

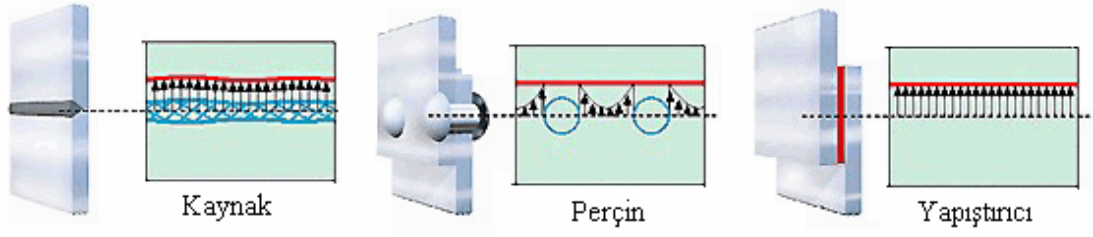
Kırılan ve kopan malzemeleri tekrar kullanabilmek için, mekanik birleştirme yöntemleri kullanılabilir. Ancak yapıştırıcılarla yapılan birleştirme daha kolay ve daha uzun ömürlüdür. Bu tip birleştirmelerde parçalar eski mukavemetine gelmese bile yine de uzun süre kullanılabilir. Yapıştırıcılarla sadece 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 kompleks geometri şekilleri birleştirebilir,
- Daha pürüzsüz aerodinamik yüzeyler elde edilir,
- Korozyon direnci geliştirilebilir,
- Ağırlığı azaltır,
- Titreşimi önler.

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, siyanoakrilik yapıştırıcılar ve polikloropen yapıştırıcılar da kimyasal formlarına göre sınıflandırmaya birkaç örnektir. Yapıştırma şartlarına göre sınıflandırmaya ise çözücü ile katılaşan yapıştırıcılar, soğuk katılaşan yapıştırıcılar ve erimiş durumda uygulanan ve soğuyup sertleştiğinde yapışma sağlayan (hot-melt) yapıştırıcılar örnek gösterilebilir[5].



Şekil 1.1. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları[6].

Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde yaşanan zorluklar, bu teknolojinin benimsenmesinde güçlüklerle karşılaşılmasına sebep olmaktadır. Bir yapıştırma bağlantısında kompleks 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 uniform 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.

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen şartlardan; birleşen parçaların bindirme bölgesindeki uç kısımlarının geometrisinin, farklı özelliğe sahip yapıştırıcı türlerinin ve farklı bindirme mesafelerinin bağlantının gerilme dağılımına etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

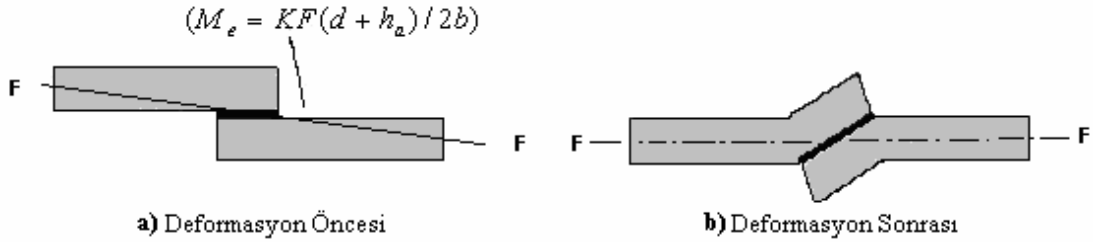
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

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.

Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analitik analizinin ilk girişimleri Volkersen (1938) tarafından yapılmıştır[7]. 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 etmiştir. 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 (1944) tarafından geliştirilen klasik yapıştırma modelinde ise genel olarak yapıştırıcının gerilme analizi çalışılmıştır. Goland ve Reissner Şekil 2.1’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[8]. Goland ve Reissner de yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemelerin lineer elastik bir malzeme gibi davrandıklarını kabul etmişler ve bir eğilme moment faktörü κ 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 bağlantıda gerilme dağılımına önemli miktarda bir katkıda 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.



Şekil 2.1. Tek bindirme bağlantısında yüklem hattı eksantrikliğinin eğilme momentlerine nasıl sebep olduğunun ve yüklemeye bağlı olarak yapıştırılan malzemelerin deformasyonunun bu eğilme momentlerini nasıl azalttığının şematik gösterimi[8].

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.

Goland ve Reissner'in teorisindeki temel sınırlamalar Benson (1969) tarafından gösterilmiştir[9]. Benson, teorisinin 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 (1955) ve Sazhin (1964), Golan ve Reissner'in teorisini ve Volkersen teorisini kullanarak benzer çalışmalar sunmuşlar[10,11], Segerlind (1968) ise bir çift bindirme bağlantısında kayma gerilmelerinde bağlantı boyunun etkisini tespit ederek optimum bir bağlantı tasarımının mevcut olduğunu ortaya koymuştur[12].

Hart-Smith tarafından 1973 yılında gerçekleştirilen çalışmada bu teori biraz daha geliştirilmiş[13] ve Ojalvo ve Idinoff (1978) ve Carpenter (1980), 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 Goland ve Reissner'in teorisini geliştirmişlerdir[14,15]. 1994 de ise Oplinger, bindirme kısmının yüksek yer değiştirmelerine müsaade ederek bu teoriyi daha da geliştirmiştir[16].

Kline (1982), yapıştırıcı ile birleştirmede gerilme dağılımı üzerine yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemiştir. Kalınlık boyunca gerilmelerin değişimin lineer kabul ederek,

kalınlık etkisini de içeren yapıştırıcı tabakasındaki değişken bağlantı parametrelerinin etkisini araştırmıştır[17].

Önceki 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 (1968)'in çalışmasını[18] temel alan Erdoğan (1969), malzemelerden birinin balta ucu şekline sahip olduğu ve diğerinin bunu çevrelediği ortamdaki gerilmelerin tespiti için bir metod sunmuştur[19]. 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 (1971) kademeli bindirme bağlantılarında yapıştırılan plakalardaki gerilme dağılımını tespit etmek için problemi genelleştirilmiş bir düzlem gerilme hali olarak kabul ederek Erdoğan'ın yaklaşımını kullanmışlardır[20]. Bu yaklaşım ile birkaç plaka geometrisi ve malzeme kombinasyonu için analizi tekrarlamış ve kademeli yapışma alanlarındaki uç etkilerini, her bir kombinasyon 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 çelikle 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 (1973), 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[21]. Chang ve Muki (1974) de 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[22]. Ayrıca yapıştırıcı hattının uçlarında yapıştırılan malzemelerin geometrisinin etkilerinin çok önemli olduğunu göstermiştir.

Adams (1989) 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[23].

Kompozit yapılar cıvata, perçin yada 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 (1998) tarafından 1998 yılında 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[24].

Hart-Smith (1982 ve 1985) 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[25,26].

Chan ve Vedhagiri 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[27].

Fu ve Mallick, 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[28].

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[29].

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 metodlarının 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 altına 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[30, 31, 32].

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 bağlantıların ilk sonlu elemanlar analizi Wooley ve Carver tarafından (1971) 1970 lerde gerçekleştirilmiş ve basit-bindirme bağlantılarında gerilme analizini konu edinmiştir. Vooley 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 kvadratik elemanların kullanımından dolayı çok hassas mesh kullanımı gerekmiştir[33]. Basit-bindirme bağlantılarının ilk modellerinin diğer pek çoğu bu çalışmayı takip etmişlerdir.

Bilgisayardan kaynaklanan güçlükleri aşmak için Carpenter ve Barsoum (1989) 2-düğümlü giriş elamanlı yapışan malzeme ve lineer düzlem elemanlı yapıştırıcı tabaka modelini çalışmışlardır. Bu sayede serbestlik derecesi sayısı önemli derecede azaltılmıştır[34].

Tsai ve Morton (1995) 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 olmasına rağmen sonuçları mevcut teorik sonuçlarla iyi bir uyum içerisindedir[35].

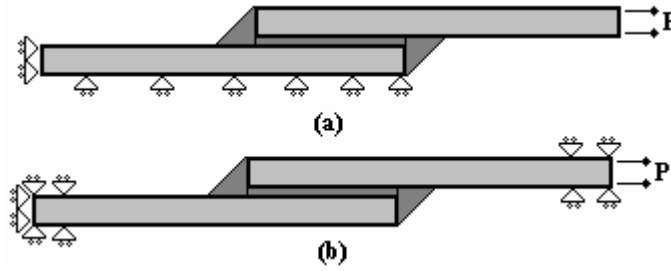
Richardson ve arkadaşları (1993) yapıştırıcı ile birleştirilmiş birçok bağlantı için iki boyutlu sonuçların yeterince kabul edilebilir doğrulukta olduğunu göstermişlerdir[36].

Li ve Lee-Sullivan 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 8-düğümlü izoparametrik kvadratik elemanlar kullanarak iyi sonuçlar elde etmişlerdir[37].

Non-lineerlik konusunda çalışan Andruet ve arkadaşları basit bindirme bağlantılarını hem 2-boyutlu hemde 3-boyutlu olarak çalışmıştır. 2-boyutlu analizlerinde yapıştırıcı tabaka, düzlem gerilme ya da düzlem uzama elemanları ile modellenirken yapışan malzeme için eksenel deformasyon altındaki Bernoulli giriş elemanlarını kullanmışlardır[38].

1999 yılında Pandey ve arkadaşları 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 alınmış ve yapıştırma uzunluğunun artmasıyla bağlantıda meydana gelen maksimum kayma ve soyulma gerilmelerinin azaldığı tespit edilmiştir[39].

Adams ve arkadaşları (1974) bu kritik sahada sonlu elemanlar tekniğini yaygın şekilde kullanmış olan başlıca araştırmacılardandırlar. 1974 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında Adams ve Peppiatt, standart metal malzemelerin yapıştırılarak birleştirildiği tek ve çift bindirme bağlantılarındaki gerilmeleri Şekil 2.2’de gösterildiği gibi iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz etmişlerdir[40]. 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.



Şekil 2.2. Bindirme bağlantılarının sonlu eleman modelleri için sınır şartları[40].
a) Tam boy çift bindirme bağlantısı, b) Tek bindirme bağlantısı.

Adams ve Peppiatt, tek tesirli bindirme bağlantıları için sonlu elemanlar tekniğinden ve klasik analitik tekniklerden elde edilen gerilme dağılımları arasında iyi bir uyuşma elde etmiştir. Ancak, kullandıkları eleman tipi kesinlikle gerilmelerin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesinde kullanılamaz. Bununla birlikte,

- 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 tarafından 2002 yılında 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 (adherent) üst ve alt yüzeylerinde yüksek termal gerilme yoğunlaşmaları gözlenmiştir. Detaylı analizler en kritik yapıştırıcı bölgenin yapıştırıcı-yapışan malzeme arayüzeyinin 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[41].

Lee ve Lee 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[42].

Redy ve Guess 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[43].

Ioka ve arkadaşları, arayüzey ile etkileşimdeki bölge ve birleştirilmiş farklı numunelerin serbest yüzeyleri üzerine sınır eleman metodunu kullanarak termal kalıntı gerilme dağılımını çalışmışlardır[44].

Humfeld ve Dillard 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[45].

1999 yılında gerçekleştirdikleri bir çalışmada Abedian ve Szyszkowski, 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[46].

Harris ve Adams (1984), yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin elastik-plastik davranışları yanında geometrik olarak non-linear etkileri de dikkate aldıkları bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı kullanarak hem pervazlı (spew fillet) hemde 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[47].

Sancaktar ve Simmons, tek tesirli bindirme bağlantılarının mukavemeti ve deformasyon davranışı üzerine yapıştırılan malzemede oluşturulan çentik etkisini incelemiştir. 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[48].

Avila 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 sayıda numune kullanımı hemde 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[49].

Kelly, 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 elamanlar çalışmasıyla araştırılmıştır[50].

Turgut ve Sancaktar, kompozit malzemelerde fiber-matris yapışması üzerine kürleşmenin ve yükleme durumlarının etkilerini incelemişlerdir[99].

Bigwood ve Crocombe, gerçekçi non-lineer malzeme modeli üzerine temellenmiş genel bir non-lineer yapıştırıcı bağlantının analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada yapıştırıcı tabaka non-lineer malzeme olarak kabul edilirken yapışan malzemelerin lineer elastik malzeme davranışı sergiledikleri kabul edilmiştir. Bu non-lineerlik, bağlantı mukavemeti üzerine yapıştırıcı tabaka kalınlığının etkilerinin çok daha doğru bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır[51].

Goncalves ve arkadaşları, yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların gerilme analizi için 3-boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Geometrik ve malzeme non-lineerliğinin yanı sıra yapıştırıcı tabaka kalınlığı boyunca gerilme değişimini de dikkate almışlardır. Çalışmalarında plastik deformasyondan dolayı malzeme non-lineerliğinin kritik bölgede gerilme konsantrasyonunda bir düşüşe neden olduğunu bulmuşlardır[52].

Lang ve Mallick, farklı uç geometrilerini incelemiş ve basit bindirme bağlantılarında farklı uç (spew) şekillerinin gerilme dağılımını ve maksimum gerilmeyi nasıl etkilediğini göstermişlerdir[53].

Dorn ve Liu, 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[54].

Taib ve arkadaşları, sırasıyla basit bindirme bağlantısı ve ucu çökertilmiş bindirme bağlantısı için iki farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı konfügrasyonlarının 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[55].

Kaya ve arkadaşları, dinamik kuvvetlere maruz kalan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda çeşitli dinamik karakteristiklerin etkilerini sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelemişlerdir. 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 sönümlendiği gözlemlenmiştir[56].

Özel ve arkadaşları, 2004 yılında yayınlanan bir çalışmalarında iki boyutlu sonlu elamanlar 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 incelemiştirler. Basit bindirme bağlantısının performansı üzerine geometrik değişkenlerin etkilerini tespit edebilmek için 4 farklı yapışan malzeme kalınlığı ve her bir yapıştırıcı için 4 bindirme uzunluğu kullanmışlardır. Elde ettikleri analiz sonuçlarını doğrulamak için sonlu elamanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve yapışan malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine her iki yapıştırıcı bağlantısı içinde önemli etkileri olduğunu gözlemlemiştirler. İlave olarak, şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan yapıştırıcı ile birleştirilmiş basit bindirme bağlantısı tarafından taşınan yükün artan bindirme mesafesi ile arttığını kaydetmişlerdir[57].

Aydın ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri bir çalışmalarında non-linear 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 incelemiştirler. Daha sonra hem geometrik non-linearlığı hemde yapışan malzeme ve yapıştırıcının non-linear malzeme davranışlarını göz önüne alarak basit bindirme bağlantılarında gerilme analizi yapmışlardır. Basit bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde iki farklı hasar tipi gözlemlenmiştir. Hem gerilme analizi sonuçlarından hemde deneysel sonuçlardan, yapıştırıcı tabakanın serbest uçlarındaki hasar çekme etkisiyle soyulma gerilmesinden kaynaklanırken, bindirme bölgesinin merkezinde ise kayma gerilmesinin etkisinden dolayı yıkıcı bir hasar gözlenmiştir[58].

Temiz ve arkadaşları, viskoelastik ve basınç hassasiyetli bir yapıştırıcının yaşlanmasını incelemiştirler. 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[59].

Aşağıda ülkemizde yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analiz ve tasarımları konusunda çalışılmış olan birkaç tane yüksek lisans ve doktora tezi görülmektedir.

Kaya (1991), 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 alınmamıştır. Model statik olarak ele alınmış ve daha sonra çalıştığı dinamik çalışmaların temelini biçimlendirmiştir[60].

Apalak tarafından yapılan bir çalışmada düz bindirme bağlantılarından farklı bir bağlantı şekli olan T-tipi bağlantıların, sonlu eleman metodu kullanılarak analiz ve tasarımları gerçekleştirilmiştir[61].

Kodakoğlu, yapıştırıcıların genel özellikleri ve çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesinin analitik ve nümerik olarak incelenmesi konusunda çalışmıştır[62].

Engin (1997), yapıştırıcılar ile birleştirilmiş çift bindirmeli ankastre bağlantıların sonlu eleman metodu ile geometrik bakımdan lineer ve lineer olmayan analizini çalışmıştır[63].

Şekercioğlu, yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi konusunda çalışmıştır[64].

Aydın 2003 yılında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi konusunu çalışmıştır[65].

Bu tezin amacı, birleştirme bölgesinde uç kısmının geometrisi farklı olan karbon fiber takviyeli polyester matristen oluşan kompozit malzemelerin, iki farklı şekil değiştirme kabiliyetine sahip yapıştırıcı kullanarak oluşturulmuş yapıştırıcı birleştirme bağlantılarının eksenel çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını belirlemektir.

Bu amaçla, çalışmada kullanılacak olan yapıştırıcılardan ve kompozit malzemelerden bulk numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler eksenel çekme deneyine tabii tutulmuştur. Deneyler neticesinde yapıştırıcıların ve kompozit malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları ve sayısal çalışmada kullanılacak olan mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen bu deneysel veriler yapıştırma bağlantısının lineer sonlu elemanlar analizleri ile gerilme dağılımlarının belirlenmesi ve hasar yüklerinin tahmin edilmesinde kullanılmıştır.

3. YAPIŞMA OLAYI VE YAPIŞTIRICILARIN GENEL ÖZELLİKLERİ

3.1. 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[66].

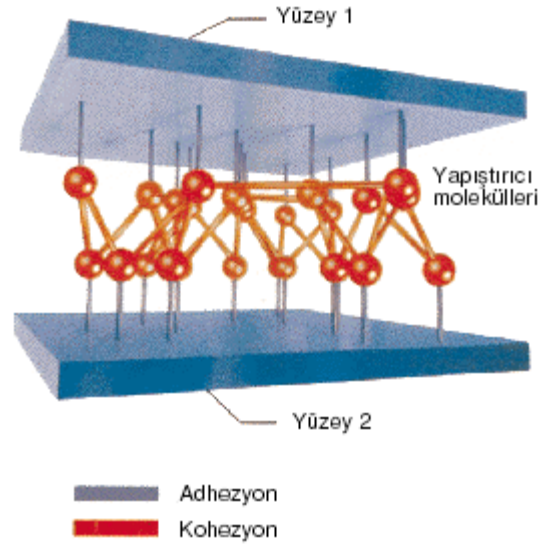
Bu bölümde, yapışma olayı ve yapıştırıcı mühendisliği terimlerini açıklamak amacıyla yapıştırıcı teknolojisi temelleri ele alınmış, yapıştırıcılar ve çeşitleri hakkında bilgi verilerek sonraki bölümler için bir temel oluşturulmaya çalışılmıştır.

3.2. 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.

3.2.1. 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 3.1. yapıştırma bölgesinde meydana gelen kuvvetleri göstermektedir[6].



Şekil 3.1.Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler[6].

Yapışma (adhesion) olayı için bu güne kadar farklı teoriler ortaya atılmıştır (Houwink ve arkadaşları, 1965 ve Wake, 1986) ve bunlardan önemli olan bir kaçına kısaca bakmak faydalı olacaktır[67,68].

- **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 mevkesindeki 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.

3.2.2. 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 yada 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 arttırılabilir.

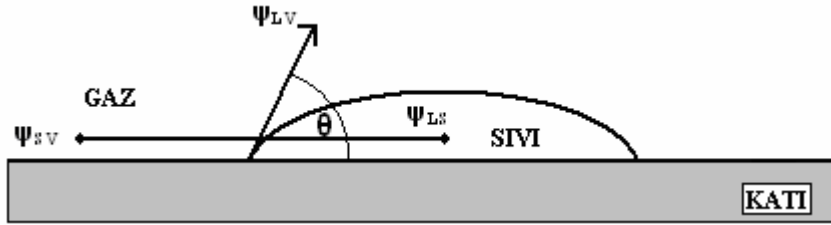
- Yağ alma veya mekanik aşındırma ile istenmeyen yüzey tabakalarının temizlenmesi,
- Primer ile kaplayarak yeni, aktif bir yüzey oluşturulması,
- Aşındırma, korona işlemi, düşük plazma işlemi vs. ile yüzey aktivitesinin değiştirilmesi.

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.

3.2.3. 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 özgür enerjisinin net olarak azalması ile damla yüzeye tamamen yayılır ve yüzeyi ıslatır. Şekil 3.2 sematik olarak bu durumu göstermektedir.



Şekil 3.2. Islanabilirlik

Katı yüzey üzerindeki damla, katı ve sıvı arasında temas açısı yapar. Şekil 3.2'de, ψ_{LS} , ψ_{LV} ve ψ_{SV} , sırasıyla katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz temaslarının yüzey enerjisini temsil etmektedir. Tamamen ıslanabilirlik için aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$\psi_{LS} + \psi_{LV} < \psi_{SV} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki; S, L ve V sırasıyla, katı (solid), sıvı (liquid) ve gazı (vapor) temsil ederken, ψ yüzey enerjisini temsil eder. Yüzey üzerindeki kuvvetler dengeleninceye kadar sıvı, katı yüzeye yayılır. Bunun anlamı kısmi bir ıslanmadır. Yukarıdaki şekilden de görülebildiği gibi θ açısına, temas açısı denir. Kuvvetlerin dengesinden,

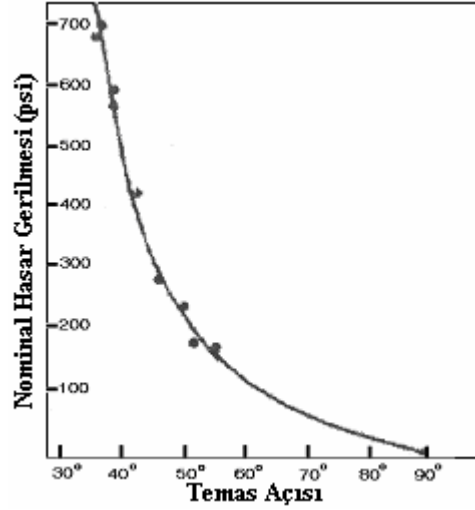
$$\psi_{LS} + (\psi_{LV} \cos\theta) = \psi_{SV} \quad (3.2)$$

veya

$$\theta = \cos^{-1}[(\psi_{SV} - \psi_{LS}) / \psi_{LV}] \quad (3.3)$$

yazılabilir. $\theta = 180$ için küresel damla yada ıslanma olmadığı anlamına gelir. Ters olarak $\theta = 0$ için mükemmel ıslanma oluşur. $0 < \theta < 180$ için ise kısmi ıslanma oluşur. Temas açısı θ , yüzeyin

yapısına bağlıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü θ temas açısını azaltır. Emilmiş gazlar θ temas açısını artırır. Şekil 3.3., temas açısı ile mukavemet arasındaki değişimi göstermektedir. θ temas açısı artıkça, yapışma mukavemeti azalır.

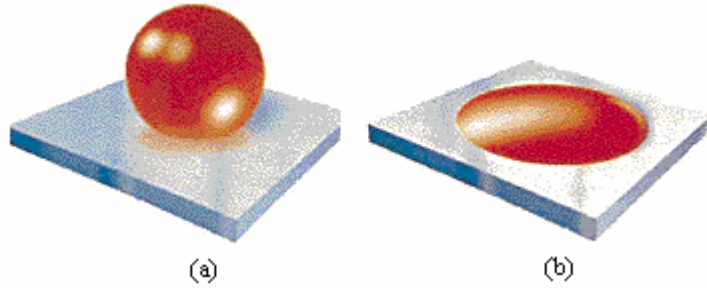


Şekil 3.3. Temas Açısı ile Mukavemet Değişimi

Yapışma yüzeyi üzerindeki leke ve kimyasal reaksiyonlar sırasında oluşacak kirlilik, ıslanabilirliği etkiler. Islanabilirlik, sıvının katıyı ıslatmasının boyutunu tanımlamak için kullanılır. Yüksek temas açısı fakir bir ıslanabilirliği temsil ederken, düşük temas açısı yüksek ıslanabilirliği temsil eder (Şekil 3.4).

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.

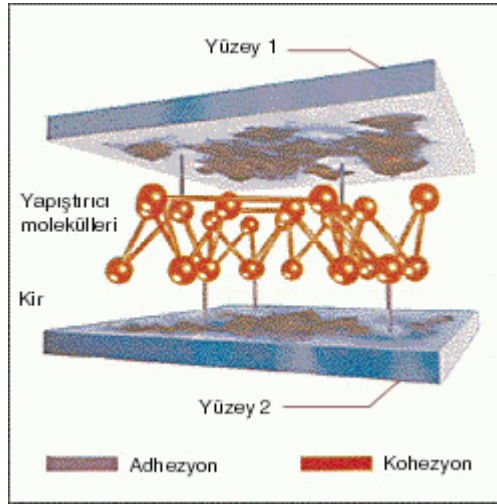
Bu yöntem alüminyum ve magnezyum üzerindeki anodik kaplamalar için uygun değildir. Su kopma testinin avantajı, “test sıvısı” olan suyun kolay bulunabilmesidir. Fakat avantajı bununla sınırlı kalır, çünkü suyun sertliği yüzey gerilimini etkiler. Bazı durumlarda, damıtılmış su bile su kopma testinde güvenilir sonuç vermez. Bu nedenle kritik uygulamalarda, belirli yüzey gerilimlerine sahip yüzey gerilim sınırları kullanılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, bu testin yalnızca ıslatılabilirliği gösterdiği, yapıştırılma kabiliyetini ölçmediğidir.



Şekil 3.4. Islanabilirlik testi. a) Yapıştırma yüzey hazırlığı yetersiz b) Yapıştırma yüzey hazırlığı yeterli[6].

3.2.4. Yüzey Hazırlığı

En iyi yapışma için iyi bir ön-işlem gereklidir. Yapışma kuvveti büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvveti tarafından belirlenir. Yüzeyler iyi temizlendiği ve ön-işlem yapıldığı oranda yapışma kuvvetinin artacağı iyi anlaşılmalıdır(Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirler adhezyonu düşürür[6].

Her ne zaman yapısal parçalar yapışma ile birleştirilmek zorunda kalırsa, yapışan yüzeylerin durumu göz önüne alınmalıdır. Yüzeyler üzerinde istenmeyen malzemeler ve şartlar, yapışmanın kalitesini düşürür.

Yapışma işleminin gerçekleştirileceği yüzeylerin son derece temiz olması gerekir. Yapışma yüzeylerinin yapışma işlemi öncesi yüzey temizlikleri, bu işlemin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen en önemli noktadır. Bu amaç ile özellikle havacılık ve uzay sanayinde kimyasal temizleme ve aşındırma işlemleri geliştirilmiştir.

Değişik tür malzemeler için, işlemlerin ve kullanılan kimyasalların değişebileceği göz önünde bulundurulmak kaydıyla aşağıda sırasıyla anlatılacak ön işlemler, yüzeyleri yapışmaya hazırlar:

- a) Sadece yağ ve pislikten arındırma
- b) Yağın temizleme, aşındırma ve artık malzemelerin temizliği
- c) Tekrar yağdan arındırma ve kimyasal ön işlem

Ön işlem süresince ya da sonra yüzeylerin lekelenmesi el, iyi temizlenmemiş eldiven, yağlı zımpara ve kimyasal malzemeler ile olur. Ayrıca lekelenme, yapışma alanında yapılan diğer işlemlerden dolayı (sprey, tozlu malzeme kullanımı, yağ buharı vb.) oluşabilir.

Yüzeyler için her ne tip ön işlem yöntemi kullanılırsa kullanılsın yapışmanın kalitesini artıracaktır.

Aşağıda birçok yüzey hazırlama metotları genel hatlarıyla özetlenmiştir.

3.2.4.1. Yapıştırılacak yüzeylerin yağdan ve pisliklerden arındırılması

Mümkün olan en iyi yapışmayı elde etmek için yapıştırılacak yüzeylerden yağ, gres, toz ve diğer kalıntıların tamamen temizlenmesi gerekir. Kalıntı bırakmadan buharlaşan solventler buna uygundur. En önemli solventler ve temizleme kapasiteleri Tablo 3.1 de görülebilir.

Alkalin veya asit bazlı sulu temizleyiciler her zaman korozyon önleyici içerirler. Bunlar eğer temizleme sonrası yüzeyde kalırsa, yapışma kuvvetini azaltabilir veya yapıştırıcının kürlüşmesini engelleyebilir. Eğer bu tür temizlik sistemleri kullanılacaksa, mutlaka önceden testler yapılmalıdır. Her durumda tüm yüzeyler iyice durulanmalı veya silinmelidir.

Tablo 3.1. En önemli solventler ve temizleme kapasiteleri[6].

Solvent	Temizleme Kapasitesi	Yanıcı veya parlayıcı
Hidrokarbonlar (izoparafınlar)	İyi	Evet
Ketonlar (aseton)	İyi	Evet
Alkoller (izopropanol)	Orta	Evet
Su bazlı	İyi	Hayır

Eğer yüksek miktarda imalatlar için özel yağ alma banyoları kullanılıyorsa, temizlik banyosunun kirlenmemesi için çok kirli yüzeylere ön-temizlik yapılması tavsiye edilir. Buharlı yağ alma sistemleri çok sık kullanılır. Bu yöntemde solvent kaynama noktasına kadar ısıtılır ve

buharlaştırılır. Soğuk parçalar buharlaşmış temizleyici ile temas ettiğinde, temizleyici yüzeyler üzerinde yoğuşur. Oluşan sıvı, yüzeylerde kalmış kir ve gres parçacıklarını temizler.

Yağ alma, çoğunlukla tamamen kapalı makinalarda, yağ alma solventleri ile yapılır. Birçok uygulamada yüzeylere hızlı etkili bir temizleyici ile ön-işlem yapılması yeterlidir. Bu şekilde yüzeyler yağ, gres, kir ve diğer kalıntılardan temizlenir ve yapıştırma için hazır olur. Solventler ile temizlik yapılırken daha iyi netice almak için, yüzeylerden kiri ayıran kimyasal işlem mekanik olarak ta desteklenebilir.

3.2.4.2. Mekanik ön işlem

Kirli metal yüzeyler çoğunlukla bir oksit tabakasıyla kaplıdır ve bu tabaka yağ alma ile temizlenemez. Böyle durumlarda, zımparalama, taşlama veya tel fırça ile fırçalama gibi mekanik ön-işlem gereklidir.

Zımparalama geniş yüzeyleri temizlemek için iyi bir yöntemdir. Çok kalın zımpara kullanmamak kaydıyla, bu yöntemle elde edilen yüzey pürüzlüğü çok iyi yapıştırma sağlar. Taşlama ile de aynı şekilde iyi bir yüzey pürüzlüğü elde edilir. Bu yöntemde yüzey pürüzlüğünü iyi seçmek önemlidir. Taşlama, zımparalama veya fırçalama sonrası, tüm kalıntıların temizlenmesi için parçalara yağ alma işlemi uygulanmalıdır. Çok kirli parçalar mekanik işlem öncesi de yağdan arındırılmalıdır ki, kullanılan zımpara veya taş yüzeydeki kirleri bulaştırmassın. Pratikte mekanik ön-işlem metotlarının kullanılması çok kolaydır ve genellikle yeterli yapışma kuvveti sağlarlar.

Eğer plastik veya lastik parçalar yapıştırılacak ise, yüzey tabakası, kalıp ayırıcı ve vulkanizasyon tabakası gibi yabancı maddeler öncelikle temizlenmelidir. Plastikler için alışımlı döküm veya alüminyum oksit aşındırıcılar iyi sonuç vermektedir. Lastik yüzeyler solventlerle veya taşlanarak temizlenebilir.

3.2.4.3. Aşındırma

Cilalama işleminin yerine yapışma yüzeylerinin hafifçe aşındırılması, yapışmada daha iyi sonuç verir. Aşındırma işleminin amacı, yapışmada iyi bir yüzey elde etmektir. Yani yapışma yüzeylerindeki toz, oksit ve gevşek malzemelerin temizlenmesidir. Aşındırma işleminden sonra yapışma yüzeyleri üzerindeki istenmeyen parçalar, daha sonra gerilme çatlakları ile sonuçlanır. Bu yüzden yapışma yüzeyleri üzerindeki toz, oksit ve gevşek malzemelerin temizlenmesi gerekir.

Aşındırma işleminde zımpara kullanımı, aşındırılacak malzemelere bağlıdır. Örneğin alüminyum zımpara, galvanik korozyondan dolayı düşük mukavemetli çelikler için kullanılmaz. Bu yüzden, demir ya da çelik tipi zımpara kullanılır.

Zımpara tipinin ve büyüklüğünün seçimi, çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler; ön işlem yapılacak metal, kullanılacak ekipmanın tipi, basınç, zımparanın açısı ve süresidir.

Zımparalama el ve makine olmak üzere iki şekilde yapılır. Makine ile zımparalamanın su ve hava ile kullanılan iki türü vardır. Su ile beraber kullanılan tipi, demir malzemelerin aşındırılması için kullanılırsa, aşındırma işleminden hemen sonra parçalar kurutulmalı yada suya korozyon önleyici ilave edilmelidir. Plastik malzemelerin zımparalanmasında makine kullanılırsa, zımparalama süresinin çok kısa olması gerekir. Aksi takdirde plastik malzemeler oluşan ısıdan dolayı erir. Eğer zımpara makinesi mevcut değilse, yüzeyler 125 ile 315 µm arasındaki zımparalar kullanılarak el ile aşındırılması gerekir.

El ile aşındırmada en uygun zımpara tipi deneme ile bulunur. Genelde 125 µm' lik zımpara en uygundur. Aşındırma işleminin nemli ortamda yapılması, yapışacak parçaların toz tutmasını ve lekelenmesini önler. Aşındırma işleminden sonra parçaların temiz, sıcak hava ile kurutulması gerekir.

Aşındırıcı çözeltilerin uygulama ve atık yönünden giderek pahalı olması nedeniyle bu yöntemin sanayide kullanımı sınırlıdır.

3.2.4.4. Kimyasal ön işlem

Yukarıda anlatılan yağdan arındırma ve aşındırma ön işlemleri yapışma için yeterli olabilir ama yapışmanın kalitesini daha da artırmak için, yapışma yüzeylerinin kimyasal ön işleme tabii tutulması, maksimum yapışma mukavemeti ve dayanıklılığı artırmak açısından önem taşır.

Kimyasal ön işlem malzemelerin tipine göre iki ana başlık altında ele alınır:

- a) Metalik malzemelerin kimyasal ön işlemi
- b) Plastik malzemelerin kimyasal ön işlemi

3.2.4.4.1. Metalik Malzemelerin Kimyasal Ön İşlemi

Anlatılacak olan her bir metal malzeme grubu, yapılacak olan kimyasal ön işleme farklı yanıt verecektir. Bir yöntemin bir başka yöntem üzerindeki etkisi (aynı metal ve aynı yapıştırıcı için) sadece deneme ile sonuçların karşılaştırılması ile anlaşılır. Ayrıca metaller üzerinde boya varsa, kimyasal ön işlemden önce kesinlikle sökülmüş olmalıdır.

3.2.4.4.1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

a) Alüminyum Honeycomb

Leke izi görülmedikçe, alüminyum honeycomb'a yapışmadan önce herhangi ön işlem yapmaya gerek yoktur. Eğer leke izi varsa, yağından arındırma işleminde anlatıldığı gibi honeycomb temizlenerek kurutulmalıdır. Yapışmanın kalitesi açısından honeycomb kenarlarında ezilmeler olmamalıdır.

b) Alüminyum Levha

Alüminyum malzemeler yüksek sünekliğe sahip olduklarından, yapışma yüzeylerinin aşındırılmaması gerekir. Alüminyum levhaların kimyasal ön işlemleri çeşitli metotlar kullanılarak yapılabilir. Kullanılan alaşım ve kimyasal ön işleme bağlı olan etkili alüminyum oksidin kontrol edilebilen film kalınlığı yapısal yapışma için uygun olabilir.

Alüminyum levhaların kimyasal ön işlemleri aşağıda verildiği gibi dört değişik yöntem ile yapılır:

- Kromik /Sülfürik asit dağlama yöntemi
- Kromik asit anotlama yöntemi
- Fosforik asit anotlama yöntemi
- Sülfürik asit anotlama yöntemi

c) Anotlanmış Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Boyanmış yada korozyona karşı anotlanmış alüminyum ve alüminyum alaşımları, yapışma için uygun değildir. Bu tip malzemelerin üzerindeki kaplama, yapışma işleminden önce sökülmelidir. Sökme işlemi için aşındırma işlemi iyi sonuç vermez. Bu yüzden alüminyum levhaların üzerindeki anodik oksit film, kromik / sülfürik asit solüsyonları ile sökülür. Sökme işlemi biter bitmez alüminyum ve alüminyum alaşımları için yukarıda verilen yöntemlerden biri kullanılarak yapışma öncesi kimyasal ön işlem yapılabilir.

3.2.4.4.1.2. Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Kimyasal Ön İşlem

Bakır ve nikel malzemeler için yüzey hazırlığı, yukarıda anlatıldığı gibi ya yağından arındırma ve aşındırma yada sıcaklığı 23°C' de olan konsantre nitrik asit solüsyonunda yapışma yüzeylerinin dağlanması ile gerçekleştirilir. Dağlama için uygun solüsyon Tablo 3.2'de gösterildiği gibi hazırlanır.

Tablo 3.2. Bakır ve Nikel Malzemeler İçin Dağlama Solüsyonlarının Hazırlanması

Malzeme	Bakır ve Bakır Alaşımları	Nikel ve Nikel Alaşımları
Dağlama Solüsyonu	Konsantre Nitrik Asit ve 1/3 Oranında Su	Sulandırılmış Konsantre Nitrik Asit
Daldırma Süresi	30 Saniye	5 Saniye

Dağlama işleminden sonra parçalar soğuk su ile yıkanarak sıcak hava ile kurutulur. Optimum yapışma mukavemeti, kimyasal ön işlemden sonra kullanılacak yapıştırıcı tipine göre

3.2.4.4.1.3. Bakır / Nikel Alaşımları

Bu tip malzemeler için en iyi solüsyon ve daldırma süresi aynı tip malzeme ve aynı tip yapıştırıcı için, bakır ve nikel malzemeler için kullanılan dağlama solüsyonu ile aynı almak şartıyla, yapılan denemelerle bulunabilir.

3.2.4.4.1.4. Düşük Mukavemetli Çelikler

Düşük mukavemetli çelikler için yağdan arındırma ve aşındırma işlemleri yapışma öncesi ön işlem olarak kullanılabilir. Ayrıca düşük mukavemetli çelikler için, bu ön işlemler yerine dağlama yöntemi de kullanılabilir. Sıcaklığı 60°C olan dağlama solüsyonu aşağıdaki gibi hazırlanarak parçalar 10 dakika süre ile bu dağlama solüsyonuna daldırılır.

Metil Alkol	2 litre
Ortofosforik Asit	1 litre

Bu işlem sonunda parçalar dağlama banyosundan çıkarılır. Daha sonra şiddetli soğuk su ile yıkanır ve yumuşak, temiz, sünek naylon fırça ile fırçalanır. Metil alkolle ıslatılmış temiz bir bez ile parçalar üzerindeki artık malzemeler temizlenerek 120°C' deki fırında 1 saat süreyle kurutulur.

Birkaç uygun fosfatlama sistemi mevcut olmasına rağmen düşük mukavemetli çelikler için en uygun yapışma mukavemeti aşındırma ön işlemi ile elde edilmektedir.

3.2.4.4.1.5. Paslanmaz Çelikler

Yapışma ile birleşmede paslanmaz çelik kullanımı oldukça zor ve dayanıklılık açısından iyi sonuç vermemesinden dolayı, paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanımı genelde tercih edilmez. Ama paslanmaz çelikler için yapıştırıcı kullanmak gerekirse ön işlem olarak dağlama, yağdan arındırma ve aşındırma yöntemleri kullanılır. Aşındırma ön işlemi için, demir zımpara, cam zımpara veya alüminyum zımpara kullanılır. Eğer dağlama yapılırsa sülfürik / fosforik asit esaslı dağlama solüsyonları kullanılır. Paslanmaz çelikler ile yapışma

öncesi kimyasal ön işlem, yapıştırılacak parçaların planlanan dayanıklılık süresine ve parçaların minimum çekme mukavemetine bağlıdır.

3.2.4.4.1.6. Titanyum ve Titanyum Alaşımları

Yağdan arındırma, aşındırma, dağlama ve anotlama işlemleri bu tür malzemeler için ön işlem olarak kullanılabilir. Yağdan arındırma ve aşındırma ön işleminden sonra dağlama işlemi, oda sıcaklığındaki aşağıda verilen solüsyona parçaların 20 dakika daldırılması gerçekleştirilir.

Konsantre Nitrik Asit	4.5	litre
Hidroflorik Asit	0.045	litre
Su	10	litre

Dağlama banyosundan parçalar çıkarıldıktan sonra, şiddetli soğuk su ile yıkanır. Daha sonra temiz, sünek fırça ile fırçalanır. Dağlama işlemi bu şekilde sona erdikten sonra, parçalar standart anotlama için aşağıda verilen 40°C' deki solüsyona (katot oranı 1/3) daldırılır.

Krom Trioksit (CrO ₃)	0.7	litre
Su	10	litre

Anotlama banyosunun voltajı, 30 dakika süre ile 20 volta yükseltilerek parçaların özel mavi bir renge dönüşmesi ile anotlama işlemi biter. Anotlama banyosundan çıkarılan parçalar, şiddetli soğuk su ile yıkanır ve 45°C' yi geçmeyen fırınlarda veya temiz sıcak hava ile mükemmel bir şekilde kurutulur. Yapışma astarının tatbikinden sonra ve yapışmadan önce parçalar, 1 saat 175°C' de kurutulmalıdır.

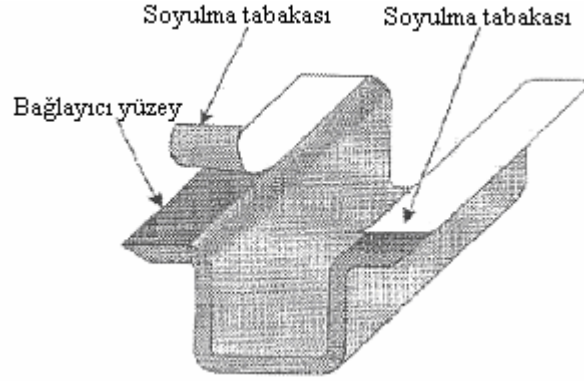
3.2.4.4.2. Plastik Malzemelerin Ön İşlemi

Polimerik termoplastikler (özellikle belli solventlerle kimyasal reaksiyona giren plastikler) ve termoset malzemelerin ön işlemi için teknik bilgilere ve testlere gerek vardır.

3.2.4.4.2.1. Termosetler

Amina, epoksi, fenolik, polyimide ya da doymamış polyester plastiklerden üretilen kalıp, eriyik, kompozit tabakalar gibi malzemeler polimerik termoset grubuna dâhildir.

Islak metot ya da preprelerden oluşan fiber takviyeli termoset kompozit tabakaların yapışma işleminde yapışma yüzeyleri üzerine soyulma tabakası korunur. Yapışmadan hemen önce bu soyulma tabakası ve yapışma için temiz, iyi hazırlanmış bir yüzey elde edilir.



Şekil 3.6. Soyulma Tabakası[71].

İyi bir yapışma mukavemeti ve dayanıklılık elde etmek için, tabakalar yapışmadan önce kurutulmalı ve üzerindeki nem alınmalıdır. Bu kurutma işlemi, soyulma tabakası söküldükten sonra, tabakalara ısıl bir zarar vermeyecek şekilde temiz sıcak hava kullanılarak hemen yapılmalıdır. Bu soyulma tabakası kullanma tekniği yapışacak yüzeyler için oldukça iyi sonuç verir.

Bununla beraber tabakalara fazla miktarda yapıştırıcı emdirilmesi, yapışma mukavemetinin azalmasına neden olur. Bu tip malzemeler için yapışma öncesi ön işlem olarak fazlasıyla el mahareti ve ustalık isteyen aşındırma yöntemi de kullanılabilir. Aşındırma işlemi esnasında tabakalardan oluşan kompozit yapının hasar almamasına da özen gösterilmelidir.

3.2.4.4.2.2. Termoplastikler

Polimerik termoplastiklerin yapışmasını belli faktörler etkiler. Bunlar; polimerin tipi ile derecesi, erime şartları ve karışım oranlarıdır. Verilen şartlar altında yapışma mukavemeti ve dayanıklılık testlerle bulunabilir. Bu tip plastikler için yapışma öncesi flame, corona ve plazma gibi alışılmamış teknikler, mükemmel mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine sahip yapışma birleşmelerini elde etmek için kullanılan çok özel kimyasal ön işlemlerdir.

3.2.4.4.2.3. Plastik Köpükler

Fenolik reçine, poliüretan ve PVC gibi malzemelerden yapılan köpükler, kirlenmedikçe ön işlem gerekmez. Temiz, kuru ve tozsuz yüzey olması yapışma için yeterlidir.

3.2.4.4.2.4. Metalik Olmayan Honeycomb'lar

Aramidden yapılan honeycomb'lar, kirlenmedikçe ön işlem gerekmez. Bununla beraber sadece yapışmadan önce 120°C' de 1 saat honeycomb'ların kurutulması ile daha yüksek mukavemetli ve daha dayanıklı yapışmalar elde edilir.

3.2.4.5. Primerler

Primerler genellikle solvent içerisinde seyreltilmiş reaktif kimyasallardan oluşur. Primer, malzeme yüzeyine fırça ile sürülerek veya sprey halinde sıkılarak kullanılır. Taşıyıcı solventin uçması beklenir, geride aktif kimyasallar kalır. Primer çeşidine bağlı olarak siyanoakrilatlar için poliolefin primerleri gibi- yüzey anında yapıştırma işlemine hazır hale gelebilir. Yüzey primerleri genellikle, yüzey ile yapıştırıcı arasında kimyasal köprü oluşturarak yapışabilme özelliğini artırır. Genel olarak bir primerdeki reaktif maddeler çok fonksiyonludur, bir dizi reaktif gurup yüzey ile reaksiyona girerken ilave guruplar yapıştırıcı ile uyumu sağlar. Tablo 3.3.'de malzemeye bağlı olarak yapıştırılacak malzemelerde uygulanması gereken ön işlemler görülmektedir.

Tablo 3.3. Malzemeye bağlı olarak ön işlem yöntemleri[6].

Malzeme	Ön-İşlem Yöntemi					
	Yağ alma	Mekanik aşındırma	Aşındırma	Primer	Korona	Düşük basınç plazma
Metaller	xxx	xxx	x	x		x
Cam	xxx	x	x	x	x	x
Seramikler	xxx		x	x	x	x
Plastikler	xxx	xxx	x	x	xxx	xxx
Lastik	xxx	x		x	x	x
Ahşap	x	xxx		x		x

xxx = tercih edilen yöntem x = alternatif veya ilave yöntem

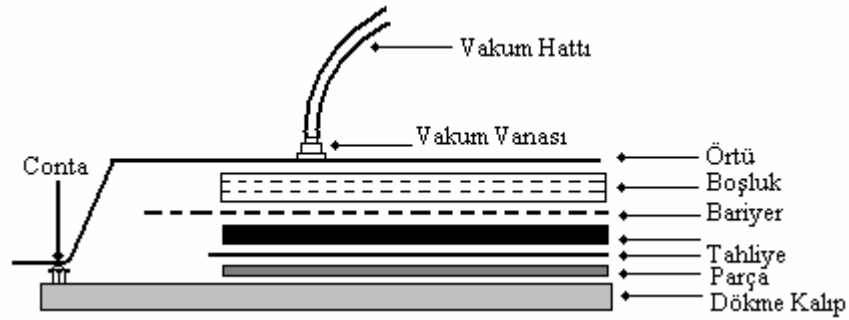
3.2.5. Montaj

Yapıştırıcı ile birleştirilen parçalarda yapıştırıcı kuruma sıcaklığına erişinceye kadar, yapıştırıcının akma ve erime ihtimali vardır. İyi bir yapışma elde etmek için birleştirilen parçaların, yapıştırıcı sertleşinceye kadar hareketsiz, dengeli ve hiçbir gerilmeye maruz kalmadan sabitlenmesi gerekir. Bu işlem imalat miktarına, birleştirilecek parçaların geometrisine, çevre şartlarına ve yapıştırıcının formuna bağlıdır.

Yapışma işlemi çeşitli aparatlar kullanarak değişik yöntemler aracılığı ile yapılabilir. Bu yöntemler;

1. Hidrolik / Pnomatik Basınç ile Basınçlandırılan Isıtılmış levhalar
2. Sabit aparatlar
3. Vakum torbası
4. Basınçlı Fırın (Autoclave)
5. Kaynak ve Perçin Yardımı İle Yapışma

şeklinde sıralanabilir. Genelde kompozit parçaların imalatında iki yöntem kullanılır. Birincisi ıslak metot, ikincisi ise prepreg metodudur. Her iki metot ile kompozit parça imalatında vakum torbası vazgeçilmez bir ekipmandır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Vakum Torbası[69].

İlk modern kompozit parçalarının imalatında kullanılan yöntem ıslak metot yöntemidir. Bu yöntem de, fiberler önceden hazırlanmış bir kalıba serilerek, üzerine fırça ile reçine emdirilir. Böylece hazırlanan ilk katın üzerine parçada istenilen kalınlığı sağlayacak şekilde diğer katlar serilir ve sertleşmeye bırakılır. Sertleştirme işlemi, çoğu zaman oda sıcaklıklarında gerçekleştirilir. Bu yöntem genelde cam elyafli polyesterden üretilen kompozit parçaların imalinde kullanılır.

Kompozit parça imalatında kullanılan prepreg metodu, oldukça basit ve hızlı bir metottur. Yöntemin basit olmasından kaynaklanan bazı avantajları vardır. Örneğin reçine önceden fibere emdirildiğinden imalat esnasında fiberin kullanımı son derece kolaydır. Islak metot ile kompozit parça imalinde, reçinenin fiberi ıslatabilme özelliği iyi olmayabilir. Bundan dolayı reçinenin kalınlığının ayarlanması oldukça zordur. Buda sertleşme sonrası kompozit parça üzerinde çok kalın ya da çok ince bölgelerin oluşmasına neden olur. Prepreg metodu ile kompozit parça imalinde böylesine bir dezavantaj yoktur.

Eğriliğe sahip yada düz parçaları sıcak hava ile yada fırında sertleşmesi esnasında vakum uygulamanın iki büyük amacı vardır. Birincisi yapışmayı hızlandırmak, ikincisi ise yapışan katlar arasında yapıştırıcının sertleşmesi esnasında oluşan hava kabarcıklarını gidermektir. Yapıştırılan yüzeyler hava çantası denilen çantalar içine alınarak vakum yapılır. Çok yaygın bir yöntemdir.

Büyük, karmaşık ve eğriliğinden dolayı yüksek basınç gerektiren parçalar, basınçlı fırın aracılığıyla sertleştirilir. Aynı anda birkaç değişik yapışma birleşmeleri basınçlı fırın içine konulabilir. Basınçlı fırında sertleştirme süresi göreceli olarak düşer. Genel olarak bir basınçlı fırın sistemi, basınçlı bir kabin içerisinde önceden belirlenen bir program çerçevesinde karmaşık kimyasal reaksiyonların oluşmasına imkân sağlar. Bir basınçlı fırının belli başlı sistemleri; basınca dayanıklı bir kap, basıncı sağlayan akışkanın ısıtılması ve bu gazı uniform olarak basınçlı fırında dağıtılabilmesi için gerekli kaynaklar, akışkanı basınçlandırmak, vakum torbası içerisindeki parçaya vakum uygulayabilmek ve operasyon parametrelerini kontrol edebilmek için gerekli alt sistemlerdir.

Basınçlı fırında sertleştirilmiş parçalar, basınçsız pişirilen parçalara nazaran çok daha kaliteli olduklarından basınçlı fırın özellikle havacılık sanayinde kompozit parça üretiminde ve metal / metal yapıştırmada vazgeçilmez bir ekipman durumuna gelmiştir.

3.3. Yapıştırıcılar ve Çeşitleri

Yapıştırıcılar, genel olarak en az iki malzemenin birbirine yapıştırılarak birleştirilmesinde istenilen tasarım özelliklerini veren epoksi, fenolik, polyamid, polyimid ve silikon gibi malzemelerin kimyasal olarak birleştirilmesinden oluşan karışımdır[70]. Yapıştırıcılar birleştirilmeden önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara, yapısal yapıştırıcılar denilmektedir.

Yapısal yapıştırıcılar, yük taşıyabilen, esnek, ısıya dayanıklı yüksek kayma mukavemetine sahip yapıştırıcılardır. Yapısal yapıştırıcılar, uzay sanayi, otomotiv endüstrisi, gemicilik vb. birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır.

Günümüzde kullanılan modern yapıştırıcılar, kimyasal tipleri ve formları açısından iki ana grup olarak sınıflandırılmaktadır[71].

- a) Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar
- b) Formları açısından yapıştırıcılar

Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

3.3.1. Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar

En güçlü yapıştırıcılar kimyasal reaksiyon ile sertleşir. Bu tip yapıştırıcılara, yapısal yapıştırıcılar da denir. Günümüzde kullanılan kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı tipleri ve özellikleri şöyledir:

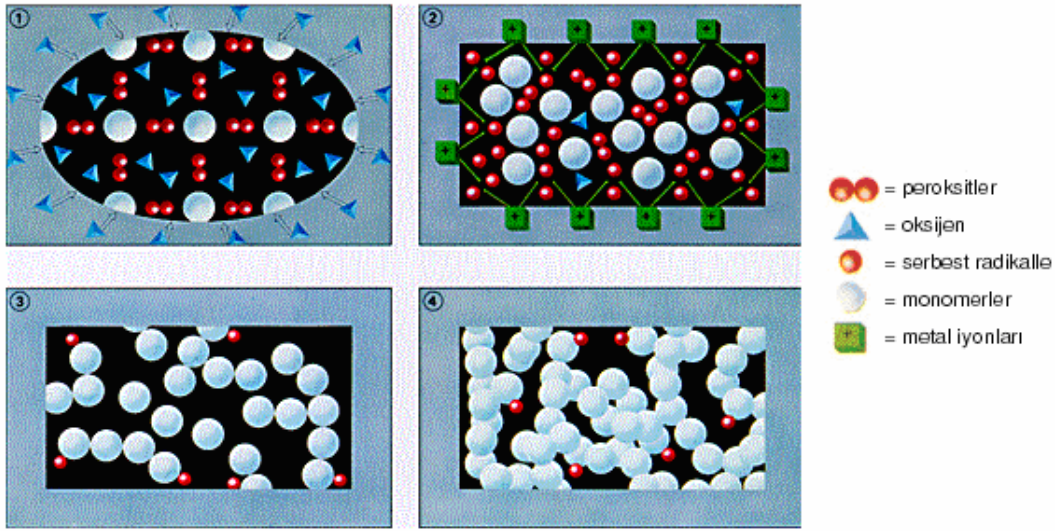
3.3.1.1. Anerobikler

Anaerobik yapıştırıcılar, oksijenle temasları kesildiğinde oda sıcaklığında katılaştıran tek-bileşenli malzemelerdir. Sıvı haldeki yapıştırıcının içinde bulunan kürleştirici bileşen, havadaki oksijenle temasta olduğu sürece etkisiz kalır. Eğer yapıştırıcının oksijen ile teması kesilirse, örneğin yapıştırılacak yüzeyler arasında hapsedildiğinde, kürleşme hızla gerçekleşir - aynı zamanda metalle temas söz konusu ise kürleşme daha da hızlanır. Kürleşme aşağıdaki şekilde düşünülebilir. Oksijenle temas kesildiğinde serbest radikaller oluşur ve metal iyonlarının (Cu, Fe) etkisiyle bu serbest radikaller polimerizasyonu başlatır (Şekil 3.8).

Kılcallık etkisiyle sıvı yapıştırıcı en küçük boşluklara girerek ek yerini doldurur. Bu şekilde, kürleşen yapıştırıcı yüzey pürüzlerinin tam şeklini almış olur. Kürleşme işlemi ayrıca, bir katalizör vazifesi gören metal yüzey ile yapıştırıcının teması ile de hızlanır. Pasif malzemelerin katalizör etkisi azdır veya hiç yoktur, böyle durumlarda hızlı ve tam kürleşme için aktivatör kullanılması gereklidir. Sıvı haldeki aktivatör, yapıştırıcı sürülmeden önce yapıştırılacak yüzeylerden birine veya ikisine uygulanır. Aktivatör ile yapıştırıcının karıştırılması söz konusu olmadığı için, açıkta bekleme süresi gibi bir kaygı yoktur.

Anaerobik reaksiyon ile katılaşılan yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

- Çok yüksek kesme mukavemeti
- Yüksek sıcaklık dayanımı (-55 °C'den maksimum +230 °C'ye kadar)
- Hızlı kürleşme
- Parça yüzeylerinin parlatılması gerekmez
- Yapıştırmanın yanında sızdırmazlık ve mükemmel kimyasal dayanım
- Yüksek titreşim mukavemeti
- Yüksek dinamik yük mukavemeti



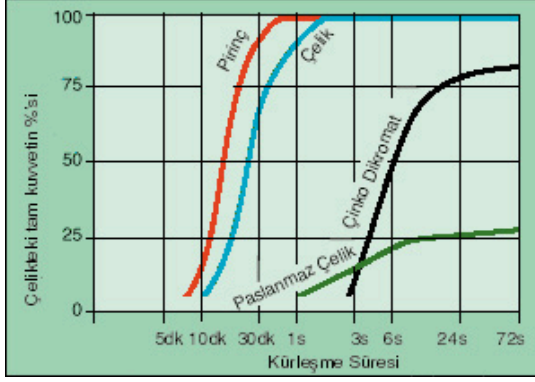
Şekil 3.8. Anaerobiklerin sertleşme mekanizmaları[6].

Şekil 3.8'de verilen anaerobiklerin sertleşme mekanizmasında:

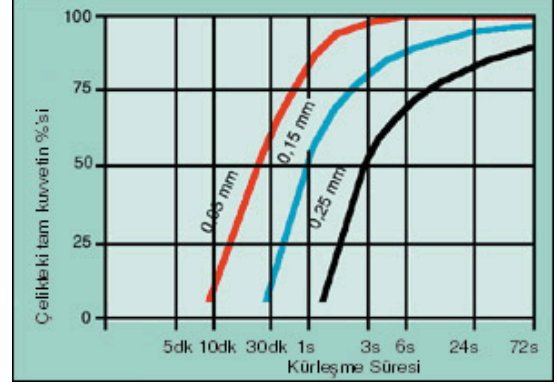
1. Durumda sıvı haldeki anaerobik yapıştırıcı oksijenle temas halinde olduğu için bir reaksiyon meydana gelmektedir.
2. Durumda yapıştırıcı yapıştırma boşluğuna doldurulduğunda oksijen ile teması kesilmektedir ve peroksitler serbest kök haline dönüşerek metal iyonları ile reaksiyona girmektedir.
3. Durumda serbest kökler, polimer zincirlerinin oluşmasına neden olmaktadır.
4. Durumda ise reaksiyon sona erip çapraz bağlı zincirleri oluşturarak, termoset plastik halini almaktadır.

Anaerobik ürünlerin kürleşmesi, özellikle kürleşme hızı aşağıdaki parametrelerden etkilenir:

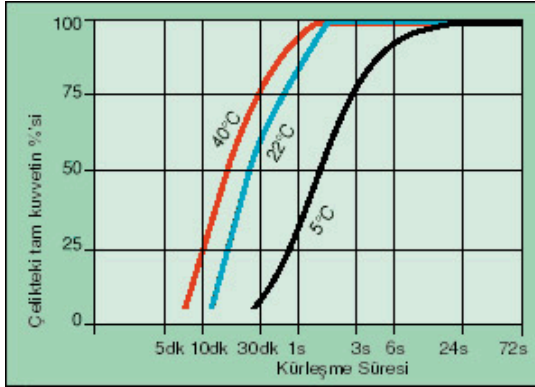
- Yapıştırılacak malzemeler (Şekil 3.9.)
- Yapıştırılacak parçalar arasındaki boşluk (Şekil 3.10.)
- Sıcaklık (Şekil 3.11.)
- Aktivatör (Şekil 3.12.)



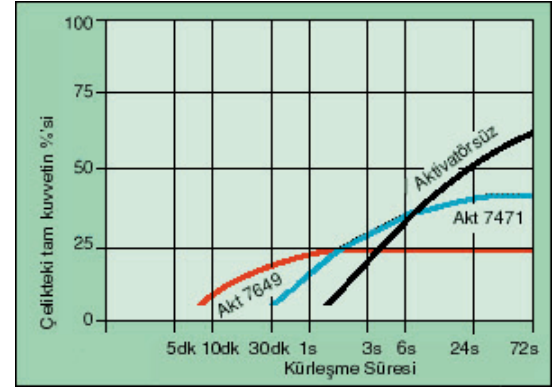
Şekil 3.9. Kürleşme hızı – malzeme[6].



Şekil 3.10. Kürleşme hızı – boşluk[6].



Şekil 3.11. Kürleşme hızı – sıcaklık[6].



Şekil 3.12. Kürleşme hızı – aktivatör[6].

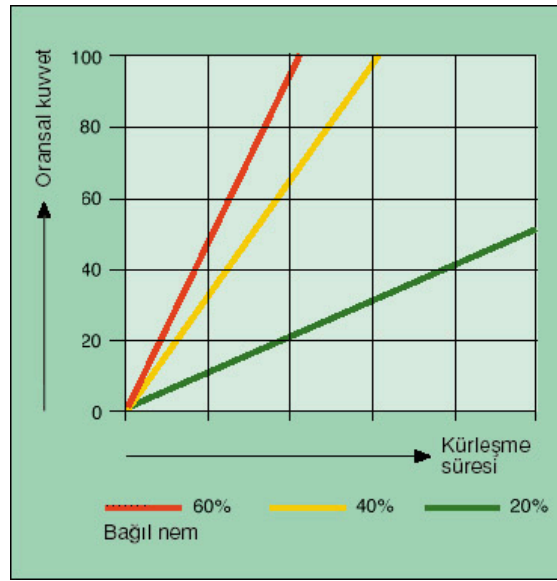
Yapıştırıcıların çoğu oda sıcaklığında etkili olurlar. Ancak yüksek sıcaklıkla yapıştırıcı daha etken olur ve yapışma süresi kısalmır. Birçok kimyasal reaksiyonda olduğu gibi sıcaklıkla reaksiyon hızında bir artış olur. Ancak sıcaklığın kontrolü yapılmalıdır. Aksi halde yapıştırıcıyı oluşturan polimer maddenin bozunması ihtimali ile karşılaşılır. Yapışmada en etkili faktör sıcaklıktır[97].

3.3.1.2. Siyanoakrilatlar

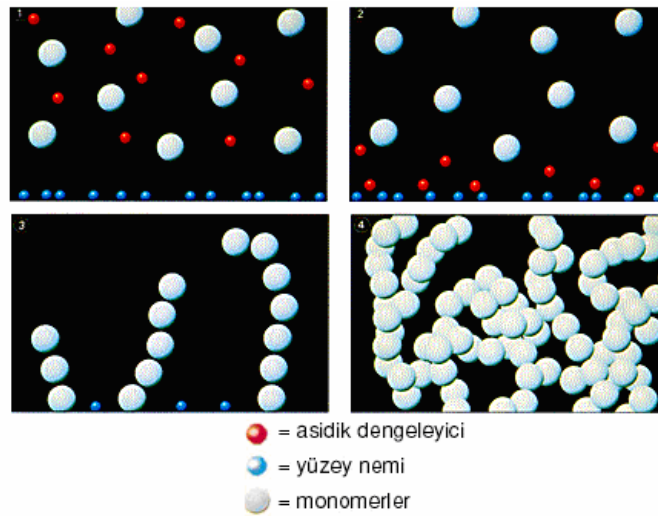
Tek bileşenli siyanoakrilat yapıştırıcılar, hafifçe alkalik özellik gösteren yüzeyler ile temas ettiklerinde kürleşirler. Genel olarak havadaki ve yapıştırılacak yüzeydeki ortam nemi kürleşmeyi birkaç saniye içinde başlatmak için yeterlidir. Yapıştırılacak yüzey üzerindeki nem,

yapıştırıcının içindeki dengeleyiciyi nötralize eder, böylece polimerizasyon bir yüzeyden diğerine gerçekleşir. En hızlı ilk kürleşmeyi elde etmek için tercihan “sıfır boşluk” gereklidir. Çalışma ortamında, oda sıcaklığında %40 ila %60 bağıl nem bulunması halinde en iyi netice elde edilir. Düşük nem kürleşmeyi yavaşlatır, yüksek nem ise hızlandırır fakat yapıştırıcının en son tutma kuvvetini olumsuz etkiler (Şekil 3.13).

Kuru hava genellikle yapıştırıcının kuvvetini olumsuz etkilemez. Fakat kürleşme süresinin uzaması imalatı yavaşlatır. Bir hava şartlandırma sistemi ile yapıştırma yapılan yerde tercih edilen nem seviyesi sabit tutulabilir. Asidik yüzeyler ($pH < 7$) kürleşmeyi yavaşlatır veya engeller, buna karşılık alkalın yüzeyler ($pH > 7$) kürleşmeyi hızlandırır.



Şekil 3.13. Bağıl nemin bir fonksiyonu olarak siyanoakrilat yapıştırıcıların kürleşmesi[6].



Şekil 3.14. Siyanoakrilatların sertleşme mekanizması[6].

Şekil 3.14’de verilen siyanoakrilatların sertleşme mekanizmasında:

1. Durumda kırmızı ile gösterilen asidik düzenleyici moleküllerin reaksiyona girmesini engelleyerek sıvı halde kalmasını sağlamaktadır.
2. Durumda yüzeye yapıştırıcı uygulandığında, mavi ile gösterilen yüzeydeki nem, asidik düzenleyiciyi nötr hale getirmektedir.
3. Durumda polerizasyon başlamaktadır.
4. Durumda ise reaksiyon tamamlandığında yüzeyde nem ve asidik düzenleyici kalmadığı için polimer zincirleri birbiri içerisine örülmüş gibi şekillenmektedir.

Yapıştırıcı uygulandıktan sonra polimerizasyon birkaç saniye içinde başladığı için parçalar hemen birleştirilmelidir. Yapıştırıcının açıkta kalma süresi, bağıl neme, yapışma yüzeylerindeki neme, yapıştırıcıya ve ortam sıcaklığına bağlıdır. Çok hızlı kürleştikleri için, siyanoakrilat yapıştırıcılar özellikle küçük parçaların yapıştırılması için uygundur.

Siyanoakrilat yapıştırıcılar yalnızca bir yüzeye sürülmelidir. En iyi yapışma için boşluğu dolduracak kadar yapıştırıcı uygulanması şarttır.

Yukarıda açıklandığı gibi, kürleşme hızı yapıştırılacak yüzeylerdeki neme bağlıdır. Kürleşmeyi hızlandırmak veya ortam neminden bağımsız hale getirmek için aktivatörler kullanılabilir. Taşan yapıştırıcı veya açıktaki yapıştırıcı damlası da aktivatörler kullanılarak saniyeler içinde kürleştirilir.

Siyanoakrilat yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

- Çok yüksek kesme ve çekme mukavemeti
- Çok yüksek kürleşme hızı (saniyeler içinde tutar)
- Hemen hemen tüm malzemeleri yapıştırır
- Yaşlanmaya dayanıklıdır

3.3.1.3. Akrilikler

Bu yapıştırıcılar oda sıcaklığında aktivatör ile kürleşir. Yapıştırıcının türüne göre, yapıştırıcı ve aktivatör yapıştırılacak yüzeylere ayrı ayrı uygulanabilir veya hemen uygulama öncesinde bir mikserde karıştırılabilir. Bazı yapıştırıcılar düşük viskoziteli bir aktivatör ile kullanılır. Bu yapıştırıcılar hiçbir zaman aktivatörle karıştırılmamalıdır. Yapıştırıcı ve aktivatör her zaman ayrı ayrı tatbik edilmelidir. İki parça birbirine temas ettiğinde yapıştırıcı kürleşmeye başlar.

Sıvı aktivatörü ortadan kaldıran, yapıştırıcı ile aktivatörün aynı kıvamda olduğu akrilik yapıştırıcılar da vardır. Bunlar iki bileşenli sistemlerdir ve yapıştırıcı ile aktivatör yan yana veya

üst üste şeritler halinde uygulanır. Yapıştırılacak parçalar birleştirilirken yapıştırıcı da karışmış olur. Eğer karışmış haldeki yapıştırıcı 5 dakika veya daha uzun bekleyebiliyor ise bir statik mikser de kullanılabilir. Statik mikser tarafından önceden karıştırılmış yapıştırıcı kullanmanın avantajı, karışmanın parçaları birleştirme esnasındaki harekete bağımlı olmamasıdır.

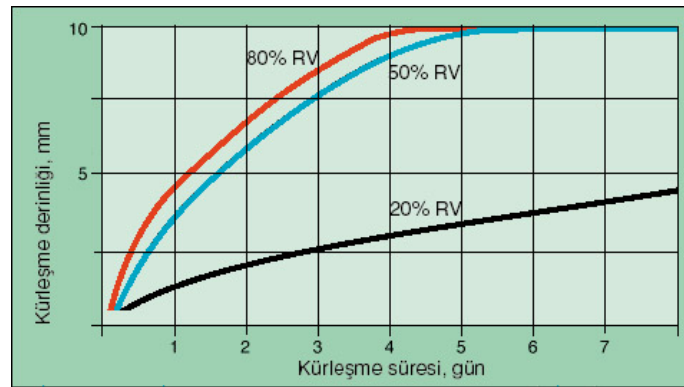
Modifiye akrilik yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

- Çok yüksek kesme ve çekme mukavemeti
- Yüksek darbe mukavemeti
- Geniş çalışma sıcaklık aralığı (-55 °C ila +120 °C)
- Hemen hemen tüm malzemeler yapıştırılabilir
- Yüksek boşluk doldurma kabiliyeti (özellikle önceden karıştırılan akrilikler)
- Ortam şartlarına yüksek dayanım

3.3.1.4. Silikonlar

Bu malzemeler oda sıcaklığında ortam nemi ile vulkanize olurlar RTV(Room Temperature Vulcanising). Siyanoakrilatlarda dengeleyicinin nem tarafından nötralize edildiği aniyonik reaksiyona karşılık, silikonlarda kenetlenme için su molekülleri kullanılır. Bu nedenle, suyun silikonun içine, vulkanizasyonun gerçekleştiği bölgeye nüfuz etmesi gerekir. Su molekülü silikon molekülleri zincirine eklendiği zaman bir yan ürün açığa çıkar. Kürleşmenin kimyasal özelliğine bağlı olarak yan ürün asidik olabilir. Bu yapıştırıcıların kürleşme hızı öncelikle bağıl neme bağlıdır.

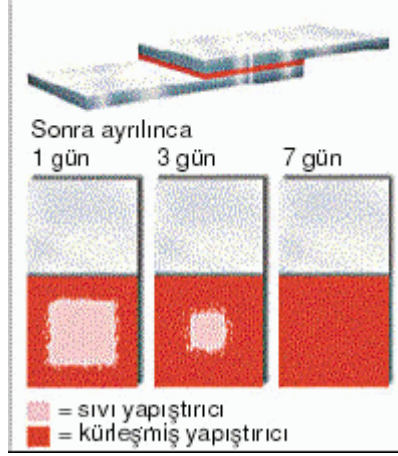
Kürleşme mekanizmasının tabiatı gereği, silikonlar yapışma sathının dış kenarlarından içeriye doğru vulkanize olur. Nemin, vulkanizasyonun gerçekleştiği her noktaya ulaşması gerektiği için, kürleşme derinliği 10- 15 mm ile sınırlıdır.



Şekil 3.15. Kürleşme hızı - bağıl nem[6].

Silikon elastomerlerin (veya k rleŒmiŒ silikon) genel  zellikleri Œunlardır:

- M kemmek sıcaklık dayanımı (230  C'den fazla)
- Esnek, dayanıklı, uzama katsayısı yüksek
- D Œ k ile orta sertlik
- Birçok akıŒkan için etkili sızdırmazlık
- M kemmek boŒluk doldurma



Œekil 3.16. Silikonla yapıŒtırılmıŒ tipik ek yeri[6].

3.3.1.5. Poliüretanlar

Poliüretanlar (genellikle) suyun, izosiyanat grupları içeren bir katkı maddesi ile reaksiyonu neticesinde oluŒurlar. Silikonlarda olduğu gibi, su molekülünün yapıŒtırıcının içine nüfuz ederek yapıŒtırıcı bağlarının oluŒtuĐu her noktaya ulaŒması gerekir. Bunun sonucunda silikonlar ile aynı k rleŒme hadisesi meydana gelir, fakat yan ürün açığa çıkmaz. K rleŒme hızı yine ortamın bağıl nemine bağlıdır.

Poliüretanların genel  zellikleri Œunlardır:

- M kemmek dayanıklılık
- Esneklik, yüksek uzama yeteneği
- M kemmek boŒluk doldurma
- K rleŒtikten sonra boyanabilme
- M kemmek kimyasal direnç

En iyi ve uzun ömürlü yapıŒma için uygun temizleyici ve primerlerin (yapıŒma baŒlatıcı) kullanılması tavsiye edilir. YapıŒtırılacak yüzeye göre farklı primerler kullanılır.

3.3.1.6. Epoksiler

Epoksi yapıştırıcılar, epoksi reçine ile sertleştiriciden oluşur. Epoksi yapıştırıcılar ile son derece mukavemetli yapışmalar elde edilir. Çok farklı tipte malzemeleri yapıştırmak için kullanılabilirler. Tek bileşenli, iki bileşenli ve film olarak üç farklı formdadırlar. Her iki bileşen birleştirildiğinde kovalent bağlar oluşur ve termoset polimer halini alır. Katalizör ilavesi yada ısı sertleşme zamanını hızlandırabilir. Yüksek sıcaklıklarda sertleşen epoksiler daha yoğun çapraz bağlar oluşturduklarından dolayı daha mukavemetli yapışmalar elde edilir. Derinliğine sertleşme miktarı çok iyidir. Çok farklı tipteki malzemelerin yapıştırılmasında kullanılabilirler.

3.3.1.7. Fenolikler

Yüksek mukavemet gerektiren metal ile metal, metal ile ağaç ve metal ile kompozit esaslı fren pabucu yapışmaları için oldukça iyidir. Sertleşmesi için, ısı ve basınç uygulamak gerekir.

3.3.2. Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara nazaran, fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar, daha düşük yapışma mukavemetine sahiptirler. Bu yapıştırıcılara, yapısal olmayan yapıştırıcılar da denilir. Endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahip fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcı tipleri şöyledir.

3.3.2.1. Sıcak Eriyikler

Sıcak eriyikler polimer esastır. Hafif yüklere maruz kalacak şekilde tasarlanmış yapıları, hızlıca birleştirmek için kullanılırlar.

3.3.2.2. Kauçuk Yapıştırıcılar

Eriyik esaslı kauçuk yapıştırıcılar, su ortamının ya da çözülmenin kaybolması ile sertleşirler. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildir.

3.3.2.3. PVA'lar (Polyvinyl Acetates)

Ağaç ve karton gibi gözenekli malzemelerin yapışması için uygundur. Endüstride oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler.

3.3.3. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar

Teyp ve etiket için uygun olan bu tip yapıştırıcılar sertleşmelerine rağmen çevre şartları durumlarını değiştirebilir. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildir.

3.3.4. Formları Açısından Yapıştırıcılar

Modern yapıştırıcılar, kullanılmadan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. Kullanım yerleri olarak, yani formu bakımından yapıştırıcılar çeşitli gruplarda değerlendirilebilir. Bu gruplar:

- Macun tip yapıştırıcılar
- Film tipi yapıştırıcılar
- Düşük viskoziteli yapıştırıcılar
- Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar
- Reçineler
- Köpükler

3.3.5. Reçineler

Kompozit kumaşların emdirilmesi için kullanılan, iki parçalı düşük viskoziteli epoksi reçinelerdir. Optimum yapıştırma kuruma eğrisine göre sertleşme işlemi tamamen sona erdikten sonra elde edilebilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa uygulama süresi göreceli olarak düşer.

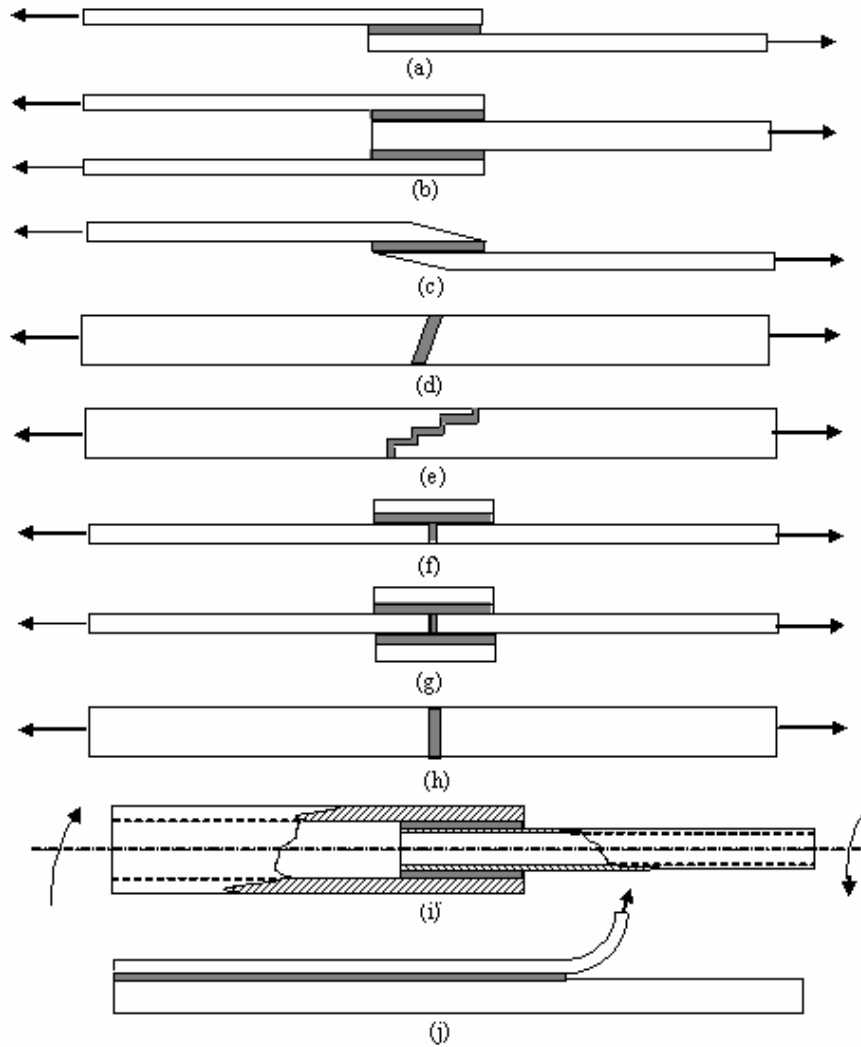
3.3.6. Köpükler

Köpükler, kuruma süresince genişleyen epoksi esaslı yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar birleşmedeki boşlukları doldurur ve bileşen parçalarının tümünü birbirine kuvvetlice yapıştırır. Köpük kalınlığının en az 2 mm olması istenir.

3.4. Yapıştırıcı ile Birleştirme Şekilleri

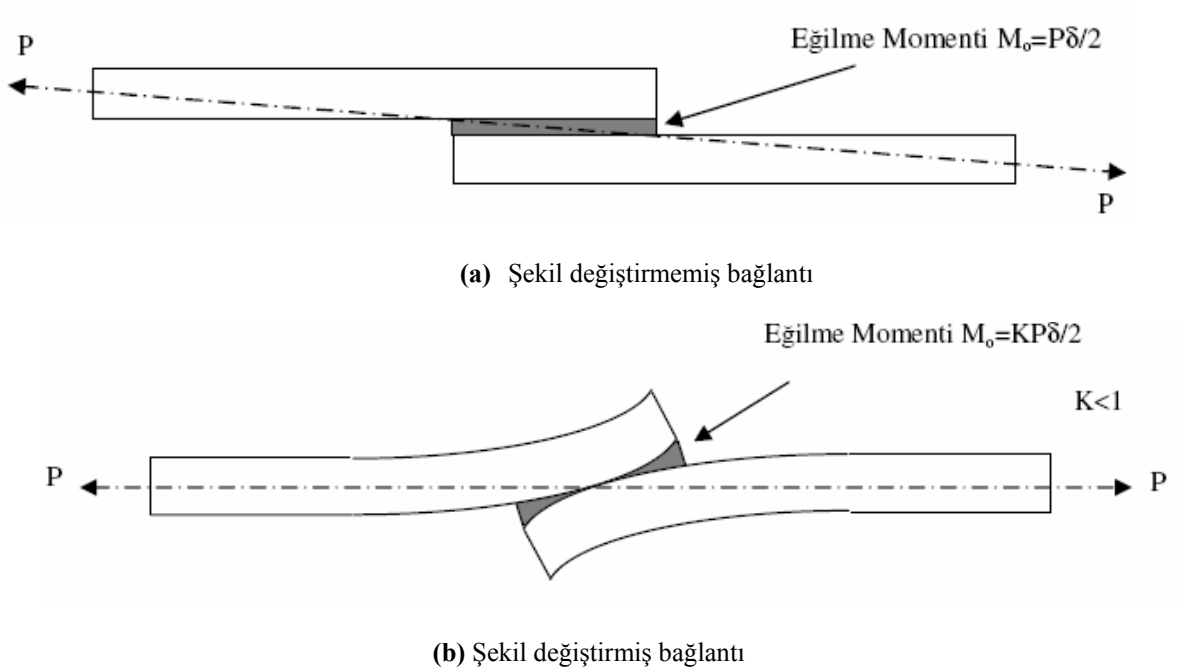
Uygun bir tasarım, yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme dağılımı ve bağlantının hasar mukavemeti hakkında yeterli bilgiye sahip olmayı gerektirir. Bağlantının davranışı, geometri ve malzeme davranışı gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu bağıllık bağlantının ortalama mekanik davranışını tahmin etmeyi zorlaştırır. Karşılaşılan güçlükler özellikle yapıştırıcıların kontrol mekanizmalarının karşılaştırılmalarındaki eksikliklerden dolayıdır[55].

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[72].



Şekil 3.17 Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri[72].

Şekil 3.17.a, tek tesirli bindirme bağlantısını göstermektedir. Bu bağlantı tipi yapıştırıcıların test edilmesinde en fazla kullanılan bağlantı tipidir. Bununla beraber oluşan gerilme durumu karmaşıktır. Şekil 3.18.a’da da görüldüğü gibi tek tesirli bindirme bağlantısında yük aynı doğru üzerinde etki etmemektedir. Bu yüzden eğilme momenti oluşur ve Şekil 3.18.b’de 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.

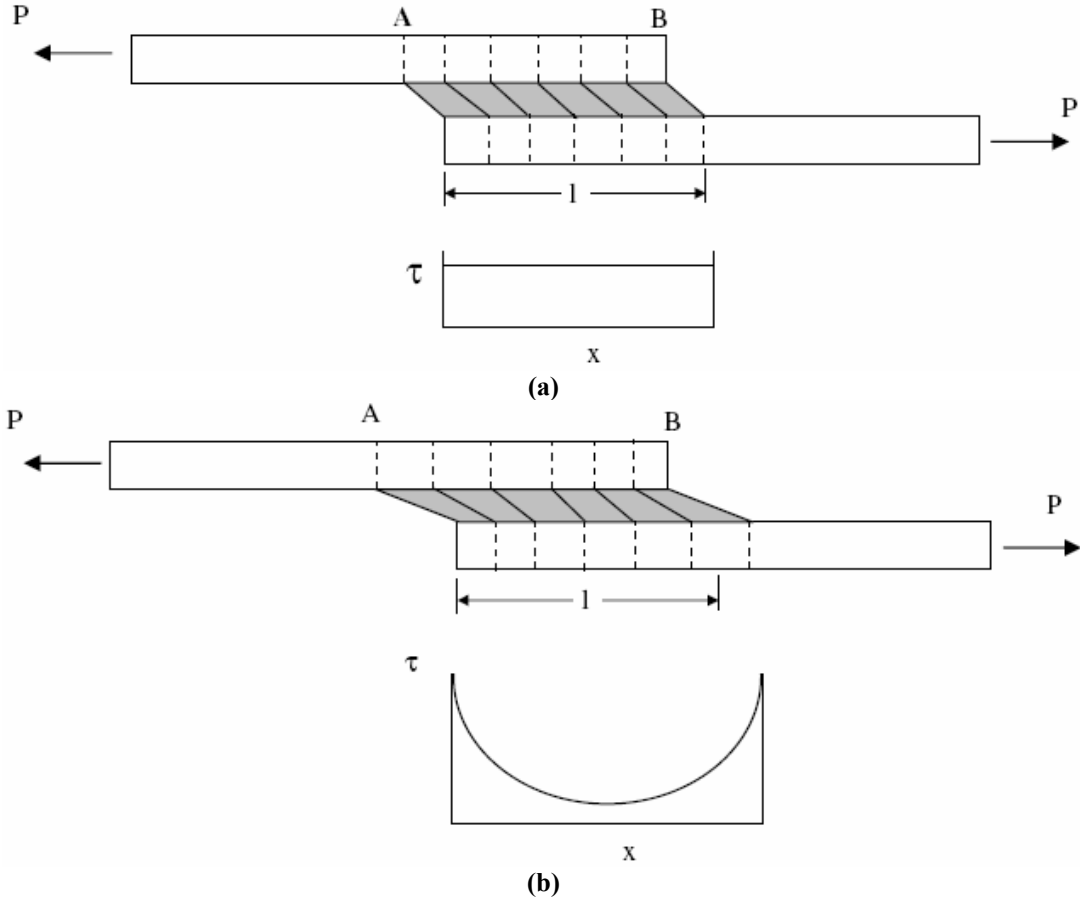


Şekil 3.18 Tek tesirli bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve şekil değiştirdikten sonraki görünümü[72].

Tek tesirli bindirme bağlantıların kalite kontrolünde numuneler test edilir. Bağlantının yapılışı basittir ve elde edilen sonuçlar hem yapıştırıcı kalitesi hem de malzeme yüzey işlemleri açısından hassastır.

Tek tesirli bindirme bağlantıların basitleştirilmiş analizinde, malzemenin rijit ve yapıştırıcının sadece kayma yönünde şekil değiştirdiği kabul edilir (Şekil 3.19.a). Eğer bağlantının genişliği b , uzunluğu l ve yüklenen kuvvet P ise, kayma gerilmesi $\left(\tau = \frac{P}{bl} (N/mm^2) \right)$ şeklinde olur. Malzemede oluşan kayma gerilmeleri A-B bindirme uzunluğu boyunca lineer azalır. Şekil 3.19.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 3.19.a'da görülen yapıştırıcının düzgün bölünmüş paralelkenarı, Şekil 3.19.b'de görülen bozulmuş şekle döner. Bu olaya diferansiyel kayma denir.

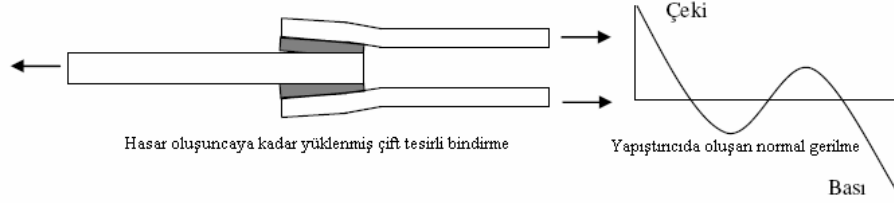


Şekil 3.19. Yüklenmiş haldeki tek tesirli bindirme bağlantısının deforme olmuş hali ve kayma gerilmesi dağılımı. (a) Rijit malzeme, (b) Elastik malzeme [72].

Şekil 3.17.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 3.20).

Şekil 3.17.'deki diğer bağlantı yapılandırmaları, çoğunlukla gerilme yığılımlarını 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 3.17.j'de ki yükleme durumu gibi, bağlantı uçlarında, yırtılmaya neden olan ve soyulma gerilmesi denen yanal normal

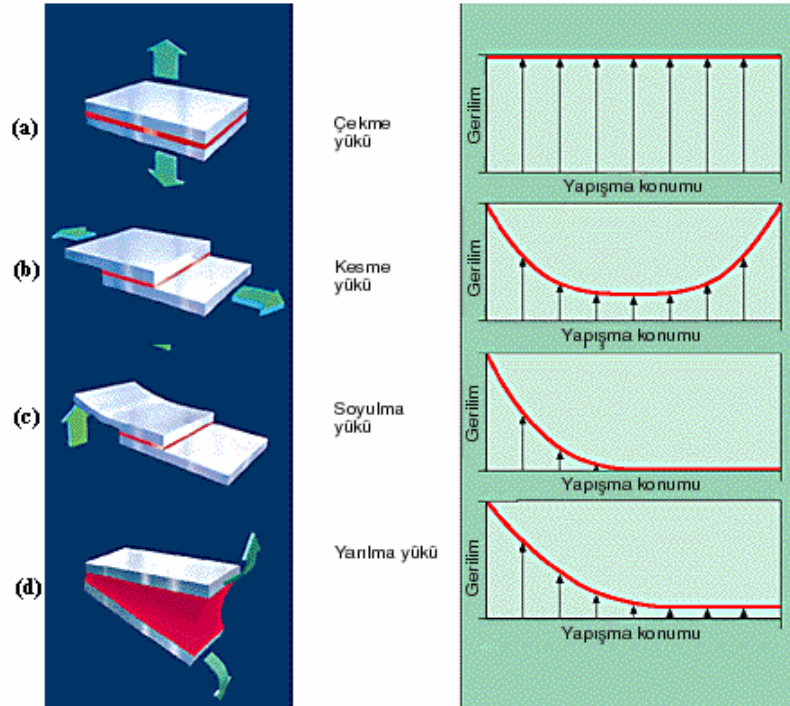
gerilmeler oluşur. Zaten Şekil 3.17.j’de görülen bağlantı şekli, birçok soyulma deneylerinin temelini oluşturmaktadır[72].



Şekil 3.20. Yüklenmiş haldeki çift tesirli bindirme bağlantısında ve yapıştırıcıda oluşan gerilmeler[72].

3.5. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilme Halleri

Bir yapıştırma bağlantısına etki eden yükler farklı türde gerilmelere neden olur. Gerilmeler genel olarak N/mm^2 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. 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.



Şekil 3.21. En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları[6].

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 3.21. de yapıştırıcı bağlantılarında meydana gelen dört önemli gerilmeyi oluşturan yükleme tipi ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları verilmiştir.

Şekil 3.21.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 etkidüğinden 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[74].

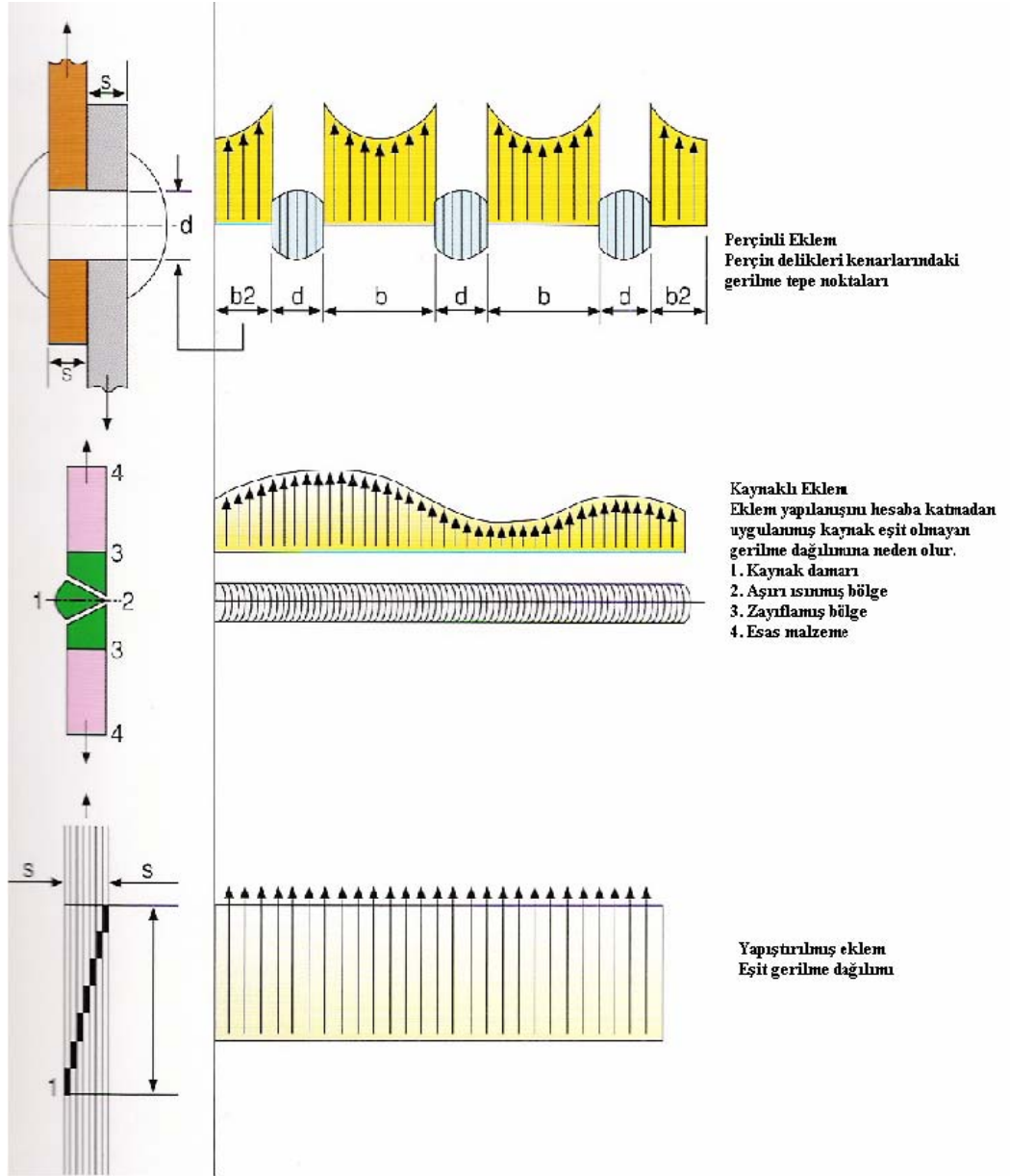
Kesme yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder (Şekil 3.21b). Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar. Eğer mümkün ise bağlantılar yükün büyük bir kısmını kesme yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır.

Bu tür gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 3.21c). 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 3.21d'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[75].

3.6. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözümeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantıların tümünün yerini alacağını düşünülmesi yanlıştır. Bu alışılmış birleştirme tekniklerinin her biri farklı şartlar altında kendine özgü üstünlüklere sahiptir. Şekil 3.22.'de perçin, kaynak ve yapıştırıcı bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları görülmektedir.



Şekil 3.22. Kaynak, perçin ve yapıştırıcı birleştirmelerinde oluşan gerilme yığılmaları[76].

Değişik birleştirme usullerinin belirli avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi izah ve mukayese edebilir[77, 78, 79].

3.6.1. 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 etkemediği için ek olarak bir eğilme momenti de ortaya çıkabilir.

3.6.2. 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.

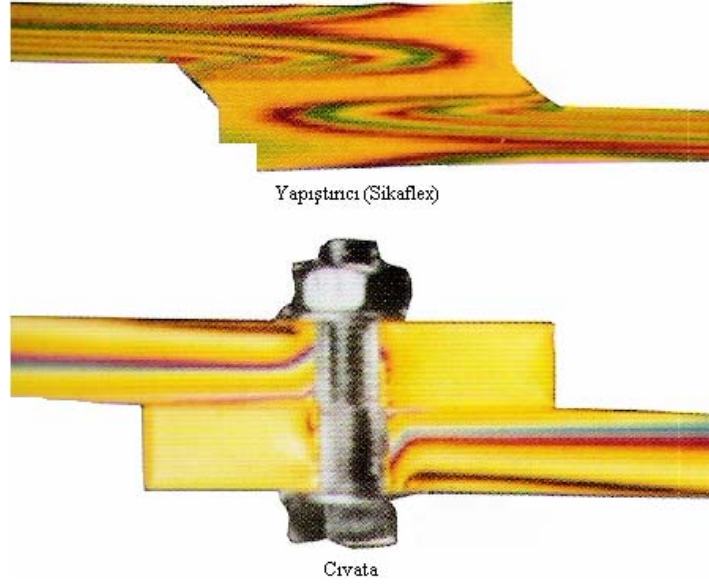
Farklı malzemelerin birbiriyle kaynak edilmesi de birçok sorunlar doğurur. Birleştirilecek malzemelerin her ikisinin de aynı tip olması durumunda kaynak mümkün olabilmektedir. Kaynak işlemi yüksek dayanımlı çeliklere ve metal alaşımlara özellikle tatbik edilebilir. Bunların da bazılarının kaynak edilebilme kabiliyetleri oldukça düşüktür ve bu nedenle uygulamada kaynak edilemezler.

3.6.3. 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.

3.6.4. 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. 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 düzgünsüzlüğü, tekrarlı yükler altında yumuşamadır. Ayrıca, vidalar ve cıvatalar ile birleştirme genellikle yavaş ve emek tüketici bir işlemdir.



Şekil 3.23. Şeffaf ve ışığa duyarlı malzemelerden yapılmış yapıştırıcı ve mekanik birleştirmelerde gerilme dağılımı[76].

3.6.5. 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.

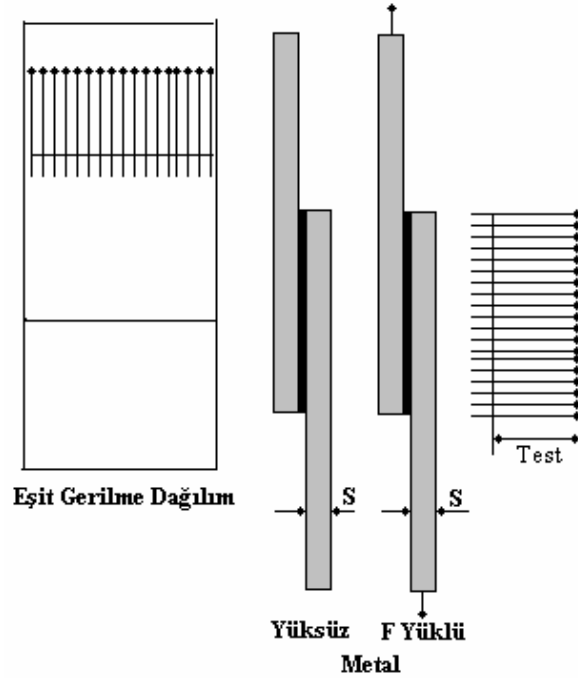
3.6.6. Yapıştırma Bağlantıları

Metal yapıştırma bağlantılarında diğer bağlantılar için anılan sakıncaların birçoğu görülmez. Ancak yapıştırma bağlantıları, diğer bağlantıların yerini alan bir bağlantı değil, onları tamamlayan ve onların uygulandığı durumlarda etkili olan bir yöntemdir.

Yapıştırma bağlantılarında, büyük termik ve mekanik zorlamalar olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer yöntemlere nazaran önemli bir avantajdır. Böylece; birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi iç gerilmeler yoktur. Şekil 3.24’de görüldüğü üzere, yük yönündeki gerilme dağılımı ile yüke dik yöndeki gerilme dağılımı aynıdır.

Metal yapıştırma bağlantılarının tasarımındaki hususlar şunlardır[80].

1. Yapıştırma bağlantıları her zaman büyük uygulama yüzeyi gerektirir.
2. Yapıştırma bağlantıları, esas metalin akma sınırı göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır.



Şekil 3.24. Bir yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımı[81].

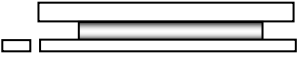



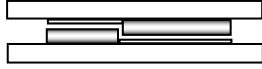

3. Yapıştırma bağlantıları mümkün olduğu kadar kayma (kesme) gerilmelerine maruz kalacak tarzda şekillendirilmelidir. Çekme zorlamaları bu bağlantı türü için uygun değildir. Eğilme ve özellikle sıyrılma zorlanmalarından kaçınılmalıdır.
4. Yapıştırma bağlantılarının dinamik mukavemeti özel bağlantı formları ile ya da kombine bağlantılarda kullanılarak önemli ölçüde yükseltilmelidir.
5. Yapıştırılan parçalar yüksek rijiditeye sahip olmalıdır.
6. Yapıştırma bağlantıları farklı metallerin birleştirilmesinde, özellikle metal ile metal olmayan malzeme birleştirilmesinde çok uygundur.
7. Yapıştırıcı kalınlığı yaklaşık olarak 0.1mm olmalıdır. Yapıştırıcıya dolgu maddesi eklenmesi yapıştırıcı özelliklerini değiştirir.
8. Yapıştırma bağlantıları sızdırmazlık ve izolasyon özelliklerine sahiptir.
9. Yerinde kullanılan yapıştırma konstrüksiyonları maliyetten önemli ölçüde ekonomi sağlar.

3.7. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Tipleri

Farklı yükleme durumlarında yapıştırma bağlantılarının ya da yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Genel olarak yapıştırma bağlantılarında adhezyon ve kohezyon olmak üzere iki tip hasar modeliyle karşılaşılır.

Yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde meydana gelen ayrılmadan kaynaklanan kopma olayı Adhezyon Hasarı olarak adlandırılırken, yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemedeki hasardan dolayı meydana gelen kopma olayı ise Kohezyon Hasarı olarak adlandırılmaktadır(Tablo 3.4.).

Tablo 3.4. Temel hasar tipleri (ISO 10365)

	Hasar Tipleri	Tanımlanma Şekli
Yapıştırılan Malzeme	 <p>Yapıştırılan malzemelerin biri veya ikisinde de hasarın oluşması</p>	YH
	 <p>Kohosiv yapıştırılan malzeme hasarı</p>	KYH
	 <p>Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar</p>	DH
Yapıştırıcı	 <p>Kohezyon hasarı</p>	KH
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>	ÖKH
	 <p>Adhezyon hasarı</p>	AH

4. KOMPOZİT MALZEMELER

4.1. Giriş

Kompozit malzemenin ilk örnekleri aslında çok eskilere dayanmaktadır. Ancak "Kompozit Malzeme" kavramının ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir. Bu gelişmeler için tahrik edici güç malzemelerde yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü / yoğunluk oranı elde etmek olmuştur. Bu nedenle de özel uygulama alanlarında kullanımları hızla artmıştır. Bu malzemeler belirli uygulama alanları için üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek amacıyla belli özel konfigürasyonda değişik fazdaki malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan malzemeler olduklarından çok fazlı malzeme olarak da adlandırılırlar.

Bu bölümde kompozit malzemeler hakkında genel bir bilgi verildikten sonra çalışmamızda kullanılan polyester matrisli kompozit malzemelerin üretimi, avantaj ve dezavantajları ve kullanım alanları konusunda bilgi verilmiştir.

4.2. Kompozit Malzemelere Genel Bakış

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler (plastikler) olarak üç ana gruba ayrılır. Bu üç ana gruba ilave olarak, aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede toplamak ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler "Kompozit (karma) Malzeme" olarak adlandırılır.

Kompozit malzemeye, "Çok Bileşenli Malzeme", "Çok Fazlı Malzeme", "Donatılı Malzeme" ve "Pekiştirilmiş Malzeme" gibi adlar da verilmektedir.

Gerçek bir kompozit malzeme tanımlaması ise yapısal biçim ve malzeme bileşenlerinin kompozisyonunu hesaba katan tanımlamadır ve şu şekildedir; "Kompozit malzeme özel karakteristikler ve özellikler elde etmek amacıyla, makro ölçekte, farklı kompozisyon veya formda malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen malzemedir. Malzemeyi meydana getiren bileşenler yapı içerisinde kendi özelliklerini korur. Öyle ki fiziksel olarak belirlenebilir ve bileşenler arasındaki ara yüzey kolaylıkla gözlenebilir."

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzeme bileşimleri gerçekte sınırsız olmasına rağmen, bileşenlerin şekilleri sınırlıdır. Kompozit malzemenin yapısını fiberler ve matris oluşturur. Turgut ve Sancaktar fiber-matris ara yüzeyinin mukavemeti üzerine viskoelastisitenin ve üretim şeklinin etkilerini araştırmışlardır[98]. Fiberler, kompozit yapının takviye elemanı olup mekanik mukavemeti sağlarlar ve iplikçik halinde bulunurlar. Fiber

malzemesinin kompozit malzeme içerisindeki uzunluğu, tipi ve oryantasyon açısı, kompozit malzemenin aşağıdaki özelliklerini değiştirmektedir[82,83].

- Yoğunluk
- Çekme dayanımı ve çekme kuvvetindeki elastisite modülü
- Basma dayanımı ve bası kuvvetindeki elastisite modülü
- Kırılma ve yorulma performansı
- Darbe (impact) yükü
- Elektriksel özellikleri
- Termal iletkenlik ve yalıtkanlık
- Korozyon direnci
- Akustik yalıtım
- Titreşim sönümlendirme
- Maliyet

Matris ise fiberleri bir arada tutan, fiberler arasında gerilim aktarımını sağlayarak mekanik yapının oluşumunu dolaylı olarak etkileyen ve fiberleri fiziksel ve kimyasal dış etkilerden koruyarak kompozit yapının bir sistem olarak ortaya çıkmasını sağlayan ana yapıdır. Matris malzemesi olarak metal alaşımları kullanılabilirdiği gibi daha uygun olan reçineler kullanılmaktadır.

Fiber malzemesi olarak karbon, çelik, cam lif, kevlar, grafit gibi mukavemeti yüksek olan malzemeler seçilir. Matris malzemesi olarak da, termoset reçineler (epoxy, polyester, vinylester, phenolics, polyurethanes, bismaleimides, polyimides, polybenzimidazoles), termoplastikler (ylon 6, polycarbonate, polyacetals, polyamide-imide), metaller (alüminyum, titanyum, magnezyum alaşımları, bakır temelli alaşımlar, nikel temelli alaşımlar), seramikler (silicon carbide, alüminyumoksit) kullanılabilir.

Kompozit malzemelerde, polyester ve epoxy en çok kullanılan reçinelerdendir. Matris malzemelerin en büyük özelliği, pek çok alanda kullanılabilmesi, düşük üretim maliyeti ve imalat işleminin kolay olarak yapılabilmesidir.

Ayrıca, bu malzemelerin mekanik özellikleri oldukça iyidir. Kullanılan matrise bağlı olarak kompozit malzemeler, polimer matris kompozitler, metal matris kompozitler ve seramik matris kompozitler olmak üzere sınıflandırılabilirler[84]. Ticari olarak kullanılan kompozitlerin çoğunluğu, polimer matrisli kompozit malzemelerdir. Ancak, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler; büyük oranda, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır[85].

4.3. Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme tanımı, temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemeleri belirtmek için kullanılmaktadır. Genel olarak ise kompozit malzeme denildiğinde elyaf ile güçlendirilmiş plastik malzemeler anlaşılmaktadır. İlk modern sentetik plastiklerin 1900'lerin başında geliştirilmesinin ardından, 1930'ların sonunda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile boy ölçüşür düzeyde gelişmeye başlamıştır. Kolay biçim verilebilir olması, metallere oranla düşük yoğunlukta olması, üstün yüzey kalitesi ve korozyona karşı dayanımı plastiğin yükselmesindeki en önemli özelliklerdir. Birçok üstün özelliğinin yanı sıra sertlik ve dayanıklılık özelliklerin düşük olması plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla 1950'lilerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kompozitler, özellikle polimer kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sunarlar. Ayrıca kompozit malzemeler dayanıklılık ve sertlik yönünden metallerle yarışabilecek olmasına rağmen çok daha hafiftirler.

Kompozit malzemeler reçine (matris) ve takviye (reinforcement) bileşenlerinden oluşur. Kompozitler temel olarak kalıp görevi gören reçine içine gömülmüş sürekli veya kırılmış elyaflardan oluşmaktadır. Bu bileşenler birbirleri içinde çözülmezler veya karışmazlar. Kompozit malzemelerde elyaf sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri, plastik reçine malzemesi ise elyafın yapısal bütünlüğü oluşturması için birbirine bağlanması, yükün elyaf arasında dağılmasını ve elyafın kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar. Aşağıda verilen tablo matris ve takviye malzemesine göre kompozit yapı tiplerini göstermektedir.

Tablo 4.1. Matris, Takviye elemanı ve Kompozit malzeme yapı tipleri.

Matris Malzemeleri	Takviye Elemanları	Kompozit Yapının Şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers	Film-Folya
	Pudra	Honey-Combs (Bal peteği)
	Yonga	Filaman Sarılmış Yapılar

Kompozit malzemelerde kullanılan matrisler, polimerlerden (termosetler ve termoplastikler) metal ve seramiklere kadar değişmektedir. Polimerler düşük yoğunluklu göreceli olarak düşük dayanıklılıktadır. Başlıca polimer matris malzemeleri polyester, epoksi, fenol ve vinil esterdir.

Kompozit malzemelerde kullanılan takviyeler ise,

1. Doğal elyaflar,
2. Sentetik organik elyaflar (nylon, aramid)
3. Sentetik inorganik, elyaflar (cam, karbon boron vb.)'dir.

Çalışmamızda kullanılan kompozit malzemelerin matris malzemesi olarak polyester reçine, takviye malzemesi olarak ise karbon fiber seçilmiştir. Kompozit malzemelerde plastik matris olarak kullanılan genelde üç tip plastik mevcut olup bunlar; termosetler, termoplastikler ve elastomerler'dir. Şimdi sırası ile bunların bazı özellikleri üzerinde duralım.

4.3.1. Termoset Matrisler

Termoset esaslı matrisler kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılamaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadır. Aşağıda en yoğun kullanılan matrisler ve genel özellikleri, Tablo 4.2'de ise bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri yer almaktadır;

Polyester: Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyester. Polyester reçinelerin polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar.

Reçinelerin avantaj ve dezavantajları;

1. Kolay kullanım
2. Çok düşük maliyet, 0.5 – 1 \$/kg
3. Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme
4. Zehirli Sitiren gazı yayma
5. Orta mekanik özellikler
6. Kısa raf ömrü

Epoksiler: Geniş kullanım alanına sahiptirler.

1. İyi mekanik özellikler
2. Suya dayanım
3. Islakken 140°C, kuruyken 220°C 'ye kadar ısı dayanımı
4. Sertleşme sırasında düşük oranda çekme
5. Yüksek maliyet, 5 – 25 \$/kg
6. Cilde aşırı zararlı
7. Doğru karışım son derece önemli (Hayati)

Vinil ester:

1. Son derece yüksek kimyasal/çevresel dayanım
2. Polyesterden daha yüksek mekanik özellikler
3. Aşırı sitiren içermesi
4. Polyesterden daha pahalı, 4 – 7 \$/kg
5. İyi özellikler için ikincil kür işlemi gerekir.
6. Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme

Bismaleimid (BMI): Uçak motorlarında ve yüksek ısıya maruz kalan parçalarda kullanılır

1. Son derece yüksek ısı dayanımı, Yaşken 230°C, kuru halde 250°C
2. Çok yüksek maliyet, 80 \$/kg

Fenolikler: Ateşe dayanım ihtiyacı olan yerlerde kullanılır. Kür işleminin buharlaşma özelliği hava boşlukların oluşmasına ve yüzey kalitesinin düşmesine neden olur. Uçakların iç bölümlerinde, deniz araçlarının motorlarında ve demiryollarında kullanılır.

1. Yüksek ateş dayanımı
2. Düşük maliyet, 4 – 8 \$/kg
3. Yaş halde son derece zararlı

4. Oldukça kırılğan
5. Düşük yüzey kalitesi

Silikon:

1. Yüksek ateş dayanımı
2. Yüksek ısılarda ürün özelliklerini koruyabilme
3. Kür işlemi için yüksek ısı gereklidir
4. Maliyeti 30 \$/kg'dan az

Cynate Esters: Esas olarak uçak endüstrisinde kullanılır. Mükemmel yapışkanlık özelliğine sahiptir. Yaş durumda 200°C'ye kadar dayanımı vardır.

Tablo 4.2. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Malzeme cinsi	Epoksi	Polyester	Fonelik
Yoğunluk (g/cm ³)	1.11	1.04-1.46	1.24-1.32
Elastik modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	42	1.5-2.0
Isıl iletkenlik	0.19	0.19	0.15
Isıl genleşme Katsayısı (1/°C)	45-65	55-100	68

4.3.2. Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerlerin çeşitleri çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ve ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler. Tablo 4.3.'de bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmektedir. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimdeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına

neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termosetlere kıyasla termoplastiklerin hammaddesi daha pahalıdır.

Tablo 4.3. Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.

Malzeme özellikleri	Polietilen	Politetratken	PA6.6	Polipropilen
Yoğunluk (g/cm ³)	0.95	0.92	1.14	0.90
Elastik modülü (MPa)	1000	22	700	1400
Çekme dayanımı (MPa)	30	14-34	70	35
Kopma uzaması (%)	10-1200	100-650	300	10-500
Termal iletkenlik	0.48	0.33	0.25	0.12
Isıl genleşme katsayısı	60-110	100-220	70-120	80-100
Ergime sıcaklığı (°C)	-	-	260	175

4.4. Takviye Malzemeleri (Elyafar)

Kompozit malzemelerde kullanılan elyafarın fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır; parçacıklar, süreksiz elyafar ve sürekli elyafar. Parçacıklar genelde küresel bir biçimde olmamalarına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyuttadırlar. Çakıl, mikrobalonlar ve reçine tozu parçacık takviyelerine örnekler arasında sayılabilir. Takviye malzemelerinin bir boyutu diğer boyutlarına göre daha büyük olduğunda elyafardan bahsetmeye başlarız. Süreksiz elyafar (doğranmış elyafar, öğütülmüş elyafar veya whiskers-püskül) birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Çoğu lifin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle elyafın parçacık halden lif haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur.

Sürekli elyafar ise tel sarma yöntemi gibi yöntemlerde kesilmeden ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyafar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok boylarına gösterirler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallerde rastlanmayan aşırı anizotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur. Bu nedenle tasarım aşamasında elyafarın reçine içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmamak çok önemlidir. Malzemenin anizotropik özelliği tasarım aşamasında ürünün uygun yerinde kullanılarak avantaja dönüştürülebilir.

Bazı durumlarda malzemenin dayanımını artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaf kumaş olarak dokunurlar. Sürekli liflerle hazırlanan dokuma elyaf kumaşların farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri vardır.

4.4.1. Cam Elyafı

Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyafı, elyaf takviyeli kompozitler arasında en bilinen ve kullanılanıdır. Elyaf işlem sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar. Cam elyafı halen aramid ve karbon elyaflarından daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahiptir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir. İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilmektedir;

A Cam: Pencerelelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.

C Cam: Yüksek kimyasal direnç gösterir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.

E Cam: Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. Düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı özelliklerine sahiptir.

S + R Cam: Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Elyaf içindeki tellerin çapları E Cam'ın yarısı kadardır, böylelikle elyaf sayısı fazlalaşır dolayısıyla birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir

4.4.2. Karbon Elyafı

Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Karbon elyaflarına çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticilerinin devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı, karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır.

Karbon elyafları piyasada 2 biçimde bulunmaktadır:

Sürekli Elyaf: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreg'lerde kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Kırılmış Elyaf: Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorulma dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.

4.4.3. Aramid Elyafı

Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid elyafı piyasada daha çok ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Tablo 4.4'de piyasada bulunan bazı elyafların mekanik özellikleri ve yoğunlukları verilmektedir. Farklı uygulamalardaki ihtiyaçları karşılamak için farklı özelliklerde birçok aramid elyafı üretilmektedir.

Önemli Özellikleri;

- Genellikle rengi sarıdır.
- Düşük yoğunlukludur.
- Yüksek dayanıklılık
- Yüksek darbe dayanımı
- Yüksek aşınma dayanımı
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek kimyasal dayanım
- Kevlar elyafı kompozitler cam elyafı kompozitlere göre 35% daha hafiftir.

Tablo 4.4. Belli başlı elyafların karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E-Cam	2.55	2000	80
S-Cam	2.49	4750	89
Aluminyum	3.28	1950	297
Karbon	2.00	2900	525
Kevlar 29	1.44	2860	64
Kevlar 49	1.44	3750	136

Kompozit malzemelerin bugün karayolu ve demiryolu taşımacılığı, havacılık ve uzay taşıtları, denizyolları, inşaat, kimya, elektrik ve nükleer endüstri sektörleri, otomotiv sanayi, iş makineleri, ev aletleri, şehircilik ve tarım sektöründe geniş bir kullanım alanı vardır.

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerden başlıcaları;

- Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- Yorulma dayanımı, aşınma direnci,
- Korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık,
- Isı iletkenliği veya ısı direnç,
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç,
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Rijitlik, ağırlık,
- Görünüm ve benzeri özellikler,
- Ayrıca, dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düşürülebilmektedir.

Bu amaca yönelik olarak, kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hemen hemen tamamı, ilkel şekilde de olsa başlangıçtan beri kullanılan yöntemlerdir. Ancak, hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin istenilen amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir.

4.5. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları aşağıdadır;

4.5.1. Elle Yatırma (Hand Lay-Up)

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak 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. Elle yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksi'nin yanısıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.

4.5.2. Püskürtme (Spray-Up)

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak da kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

4.5.3. Elyaf sarma (Filament Winding)

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. 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.

4.5.4. Reçine transfer kalıplama RTM / Reçine enjeksiyonu

Bu kompozit üretim yöntemi diğer yöntemlere göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmasına rağmen iki parçalı kalıp kullanımını gerektirir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıba nazaran maliyetin daha düşük kalmasına neden olmaktadır.

4.5.5. Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)

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

4.5.6. Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC, BMC)

Hazır kalıplama, bünyesinde kalıplama bileşenleri olarak cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemelerini içeren kalıplanmaya hazır, kompozit malzemelerin (SMC, BMC) sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır.

4.5.7. 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 bir malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3mm kalınlığında üretilirler.

4.5.8. 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 bir malzemedir. Bu yöntem RTM'ye benzer bir yöntemdir. Farklılığı reçine/elyaf karışımın kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte ediliyor olmasındadır. Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir.

5. MATERYAL ve YÖNTEM

5.1. Giriş

Fiber ile takviye edilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanma alanına sahiptir. Takviye malzemesi olarak genellikle cam, karbon, kevlar ve boron lifleri kullanılır.

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli matriks malzemesi ise (bağlayıcı malzeme) polyester ve epoksidir. Takviye liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumdadırlar. Bu üstünlüklerinden dolayı da polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilmektedirler.

Bu bölümde çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin üretimi, bu malzemeleri yapıştırmak için seçilen yapıştırıcıların bulk numunelerinin üretimi, üretilen bulk numunelerinin ve bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar izah edilmiş daha sonra elde edilen sonuçlardan hareketle gerçekleştirilen sayısal çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

5.2. Yapıştırılan Kompozit Malzeme (Adherent) ve Mekanik Özellikleri

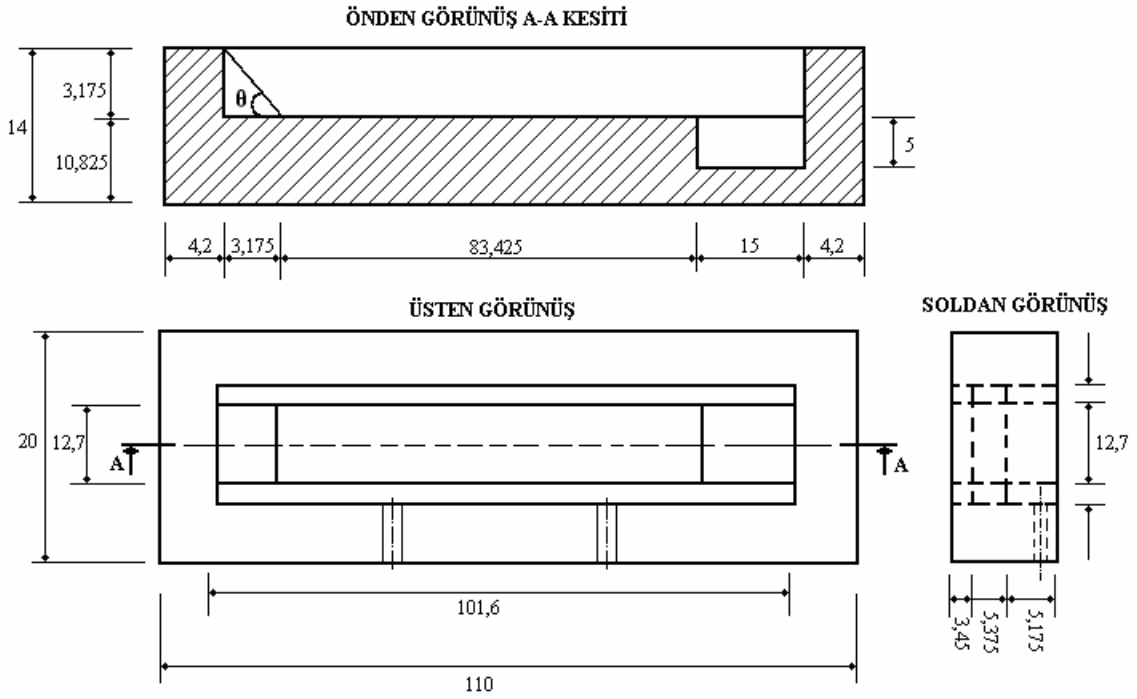
Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumdadırlar. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemet 110 Nm/gr olmasına karşın cam lifi – polyesterlerde 620 Nm/gr'dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksida 700 Nm/gr ve kevlar epoksida 886 Nm/gr'dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır[86].

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılmasının nedeni de yukarıda bahsedilen özelliklere sahip olması ve endüstrinin birçok alanında sıklıkla tercih edilmesidir.

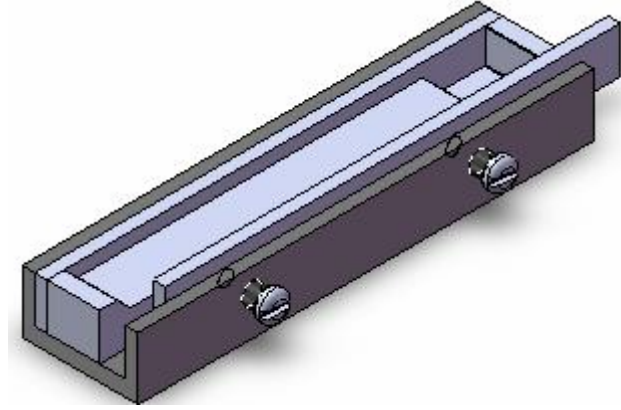
Çalışmada kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında üretilmiştir. Matriks malzemesi olarak polyester reçine takviye malzemesi olarak ise karbon fiber seçilmiştir. İlk olarak Şekil 5.1'de teknik resmi görülen, numunelerin dökümünün yapılacağı kalıplar tasarlanıp üretilmiştir. Kalıp tasarlanırken çekme deneyi esnasında eksantrikliği gidererek eksenlemeyi sağlamak ve moment oluşumunu engellemek için Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi numunelerin çekme cihazının çenelerine bağlanacak serbest kısımlarına 5x15x12.7 mm ebatlarında destek elemanı için boşluk bırakılmış ve numuneler kalıptan bu şekilde çıkarılmıştır.

Daha sonra takviye malzemesi olarak seçilen karbon fiberler uygun ölçü ve miktarlarda kesilerek döküme hazır hale getirilmiştir. Karbon liflerin her birinin kalınlığı 0,2 mm'dir. Çalışmada kullanılan tüm numunelerde birim cm^2 başına yaklaşık 0.033 gr karbon fiber kullanılmış ve fiberlerin oryantasyon açısı kuvvetin uygulanma yönüne paralel olarak alınmıştır.

Matriks malzemesi olarak, Erco Polyester E-6 döküm tipi polyester reçine, sertleştirici (hardener) olarak Erco Mek Peroksit- Ece Perox ve hızlandırıcı olarak da Erco Kobalt Oktaat (%6) - Ece Dryer kullanılmıştır. Karışım oranları 100 gr reçineye karşılık 2,5 gr sertleştirici ve 0.45gr hızlandırıcı karıştırılmıştır(100:2.5:0.45). Döküm işleminden önce numunelerin kalıba yapışmasını engellemek için polyester kalıplama sistemleri için PVA esaslı Dewilux marka kalıp ayırıcısı kullanılmıştır. Daha sonra uygun boyut ve miktardaki karbon fiberler (101.6x12.7mm) Şekil 5.2.'de resmi görülen kalıba serilmiş ve hazırlanan polyester karışım, fiberlerin üzerine dökülerek çevre sıcaklığında katılaşmaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığında katılaştıran numuneler kalıptan çıkarılarak düz ve temiz bir zemin üzerinde korumaya alınmıştır.



Şekil 5.1. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kalıbın teknik resmi.



Şekil 5.2. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kalıp.

Üretilen kompozit malzemeler yukarıda görülen kalıba dökülerek üretildiğinden dolayı her bir parametre için numunelerin şekil ve boyutları standart olarak elde edilmiştir. Numunelerin ölçüleri Tablo 5.1’de gösterildiği gibidir.

Deneyler için tüm numunelerin yapışma yüzeyleri aseton ile temizlendikten sonra numuneler Neoxil CE 92 N8 ve Sikaflex 7710 yapıştırıcılar ile yapıştırılmıştır. Seçilen bu yapıştırıcılar ile yapıştırılan numuneler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik atölyesinde bulunan ve Şekil 5.3.’de gösterilen bilgisayar kontrollü UTEST 15 (1kN) universal test cihazında, 1 mm/dk’lık çekme hızında deneylere tabi tutulmuştur. Deneyler oda sıcaklığında ve %50+5’lik nemli ortamda gerçekleştirilmiştir. Hata oluşumunu engellemek için, numunelerin serbest uçları çekme cihazının çenelerine tutturulurken mümkün olduğunca eşit basınç uygulanmaya çalışılmış ve deney esnasında ekslenmeye büyük bir özen gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Numunelerin çekilmesinde kullanılan universal (UTEST 15) çekme cihazı

Tablo 5.1. Kompozit malzemelerden üretilen numunelerin geometrik ölçüleri.

Yapıştırıcı Malzeme	Num. No	Açı (Derece)	Kalınlık (t) (mm)	Genişlik (w) (mm)	Bind.Mesaf. (a) (mm)	Yapışma Alanı (mm ²)
Neoxil CE 92 N8	1	0	3.175	12.7	25.4*	322.5800
	2	15	3.175	12.7	25.4	333.1971
	3	30	3.175	12.7	25.4	344.1888
	4	45	3.175	12.7	25.4	355.9842
	5	60	3.175	12.7	25.4	369.1404
	6	75	3.175	12.7	25.4	384.4611
	7	0	3.175	12.7	38.1**	483.8700
	8	15	3.175	12.7	38.1	494.4871
	9	30	3.175	12.7	38.1	505.4787
	10	45	3.175	12.7	38.1	517.2742
	11	60	3.175	12.7	38.1	530.4304
	12	75	3.175	12.7	38.1	545.7510
	13	0	3.175	12.7	30.27252	384.4611
	14	15	3.175	12.7	29.43653	384.4611
	15	30	3.175	12.7	28.57105	384.4611
	16	45	3.175	12.7	27.64227	384.4611
	17	60	3.175	12.7	26.60635	384.4611
	18	75	3.175	12.7	25.40000	384.4611
SikaFlex 7710	19	0	3.175	12.7	25.4	322.5800
	20	15	3.175	12.7	25.4	333.1971
	21	30	3.175	12.7	25.4	344.1888
	22	45	3.175	12.7	25.4	355.9842
	23	60	3.175	12.7	25.4	369.1404
	24	75	3.175	12.7	25.4	384.4611
	25	0	3.175	12.7	38.1**	483.8700
	26	15	3.175	12.7	38.1	494.4871
	27	30	3.175	12.7	38.1	505.4787
	28	45	3.175	12.7	38.1	517.2742
	29	60	3.175	12.7	38.1	530.4304
	30	75	3.175	12.7	38.1	545.7510
	31	0	3.175	12.7	30.27252	384.4611
	32	15	3.175	12.7	29.43653	384.4611
	33	30	3.175	12.7	28.57105	384.4611
	34	45	3.175	12.7	27.64227	384.4611
	35	60	3.175	12.7	26.60635	384.4611
	36	75	3.175	12.7	25.40000	384.4611

* 25.4 mm=1”

** 38.1mm=1.5”

Yukarıda da izah edildiği gibi bu çalışmada Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik atölyesinde üretilen matris malzemesi polyster reçine takviye malzemesi karbon fiber olan kompozit malzeme kullanılmıştır. Oda sıcaklığında yüksek

mekanik mukavemete sahip olan bu malzemenin alev iletmemeye özelliği yoktur. Çalışmada kullanılan kompozit malzemenin Tablo 5.2’de verilmekte olan mekanik özellikleri, kompozit malzemelerden kuvvet yönüne paralel, kuvvet yönüne dik ve kuvvet yönüne 45° açı yapacak şekilde takviyelendirilmiş bulk numuneler üretilerek, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında bulunan bilgisayar kontrollü Shimadzu (100 kN) üniversal test cihazında video extensiyometre kullanılarak ve 1mm/dk’lık çekme hızında deneylere tabi tutularak tespit edilmiştir (Şekil 5.4).



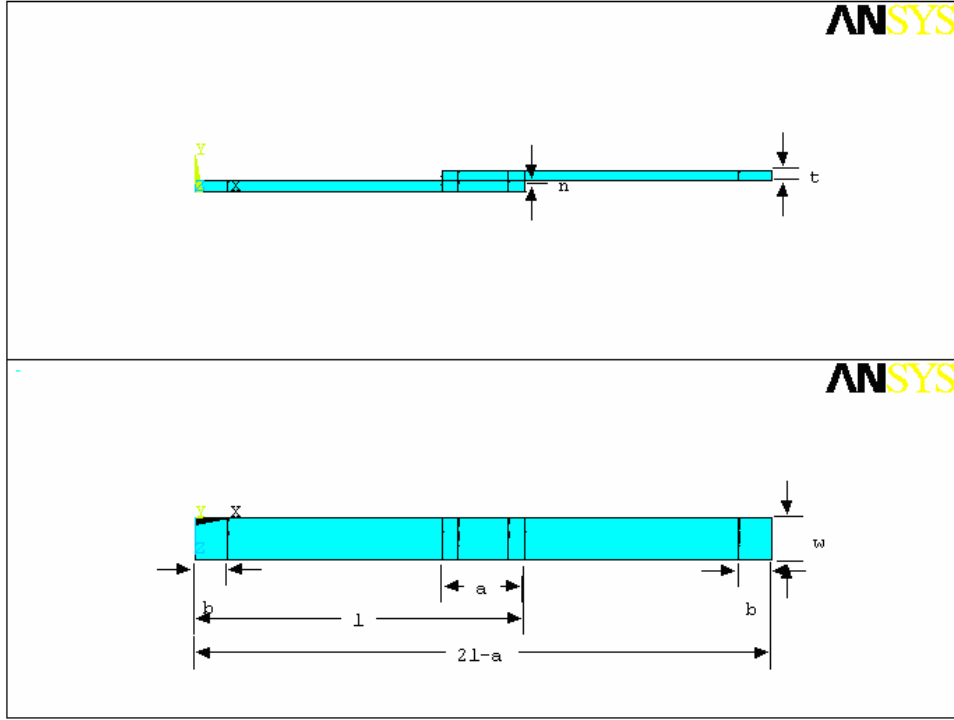
Şekil 5.4. Bulk numunelerin çekilmesinde kullanılan üniversal çekme cihazı.

Tablo 5.2. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.

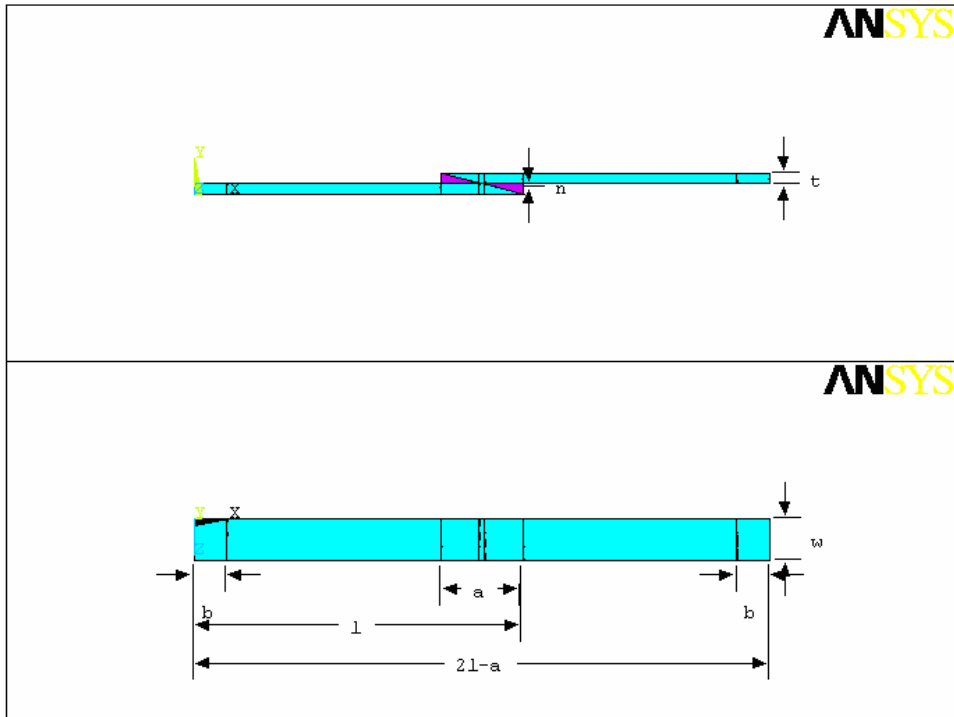
Özellikler	Test Metodu	Birim	Malzeme
Yoğunluk	ISO 1183-A	(g/cm ³)	1.78 – 2.0
Elast. Mod. E_x	ISO 178	(MPa)	9284
Elast. Mod. E_y	ISO 178	(MPa)	2816
Elast. Mod. E_z	ISO 178	(MPa)	2816
Çekme mukavemeti	ISO 527	(Mpa)	48
Poisson oranları	ISO 527	(---)	0.31,0.098,0.31
Kayma mod. G_{xy}	ISO 527	(Mpa)	1862
Kayma mod. G_{xz}	ISO 527	(Mpa)	1862
Kayma mod. G_{yz}	ISO 527	(Mpa)	1862

Çalışmada kullanılan yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit malzemelerin önden ve üstten görünüşleri Şekil 5.5’de ve Şekil 5.6’da perspektif görünüşleri ise Şekil 5.7’de gösterildiği

gibidir. Burada ölçüler simgeler ile belirtilmiş ve bu simgelerin sayısal değerleri ise Tablo 5.1’de verilmiştir.

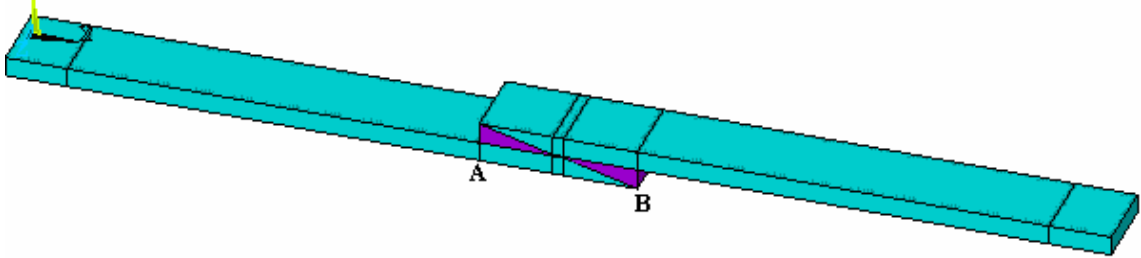


Şekil 5.5. Açı verilmemiş numunelerin önden ve üstten görünüşü.



Şekil 5.6. Açılı numunelerin önden ve üstten görünüşü.

Çekme sırasında çeneler arasından kaymayı engellemek için çeneler arasına gelen kısımlara bant yapıştırıcı çekilmiştir. Ayrıca numuneler cihaz çenelerine bağlanırken yapıştırmanın yapıldığı bindirme bölgesinde ilave gerilmeler ve moment oluşturacak işlem ve hareketlerden özellikle kaçınılmıştır.



Şekil 5.7. Numunelerin perspektif görünüşü

Toplam yapışma alanı, bindirme mesafesi ile numune genişliğinin çarpılması sonucunda elde edilir. Çalışmada kullanılan numunelerde; 0° (açısız), 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° olmak üzere 6 farklı açı (θ), 25.4mm ve 38.1mm olmak üzere iki farklı bindirme mesafesi (a) ve iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Toplam yapışma alanı hem θ açısının arttırılmasıyla hem de bindirme mesafesinin arttırılmasıyla artmaktadır. Bunun yanında bindirme mesafesi a sabit kalmasına rağmen numunelerin toplam yapışma alanı yalnızca uç açısının artmasıyla da artmaktadır. Bundan dolayı sadece uç açısı θ 'nın etkisini gözlemleyebilmek için her açı değerinde meydana gelen yapışma alanının eşit olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için her açı değerinde aynı yapışma alanını sağlayacak bindirme mesafesi a tespit edilmiş ve numuneler tespit edilen bu yapıştırma mesafesinde yapıştırılarak da deneyler gerçekleştirilerek bindirme mesafesinden dolayısıyla toplam yapıştırma alanından bağımsız olarak sadece uç açısının etkisi araştırılmıştır (Tablo 5.1).

5.3. Kullanılan Yapıştırıcılar

Bu çalışmada iki çeşit yapıştırıcı kullanılmıştır. Bunlar; Neoxil CE 92 N8 ve SikaForce 7710 dur. Neoxil CE 92 N8 Cam Elyaf Sanayi A.Ş. tarafından, SikaForce 7710 ise Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından imal edilmektedir.

5.3.1. Neoxil CE 92 N8

Genel amaçlı CTP uygulamaları için geliştirilmiş, orta reaktiviteli ortoftalik polyester reçinedir. Uygun viskozitesi sayesinde elyafları çabuk ve kolay ıslatma özelliğine sahip, yüksek mekanik dayanım sağlayan bir reçinedir. Karışım oranı 100gr reçineye %25 oranında %6'lık

kobalt neftonat ve %2 oranında %50 aktif metil etil keton peroksit ilavesiyle gerçekleştirilir. Bu reçineler bir katalizör tarafından başlatılan reaksiyonda bir monomerle çapraz bağlanan alçak molekül ağırlıklı alkid reçinelerdir. Oda sıcaklığında, reçine ve sıvı monomer karışımından oluşan çözelti kararludur. Herhangi bir peroksit katalizörü ilave edilirse bileşim oda sıcaklığında dahi çapraz bağ şeklinde katı haline geçer[87]. Tablo 5.3.'de Neoxil CE 92 N8'nin üretici firma kataloğunda verilen teknik özellikleri görülmektedir.

Tablo 5.3. Neoxil CE 92 N8'nin özellikleri[88].

Sıvı Neoxil CE 92 N8 özellikleri		
Özellikler	Birim	Spesifikasyon Değerleri
Görünüm	Berrak
Viskozite	Cps	400 +/- 60
Sertleşmiş Neoxil CE 92 N8 özellikleri		
Sertlik	Barcol	Min.45

5.3.2. SikaForce 7710

SikaForce 7710, poliüretan yapıştırıcı ve SikaForce 7010 sertleştiricinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşan iki bileşenli bir yapıştırıcıdır. Başlıca metal, ahşap, polyester, poliüretan köpük sandviç elamanlar ve diğer konstrüksiyon elamanlarının birleştirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Karışım oranı; ağırlıkça 100:19 ve hacimce 100:25'dir. Tablo 5.4.'de SikaForce 7710'un üretici firma tarafından verilen teknik özellikler görülmektedir.

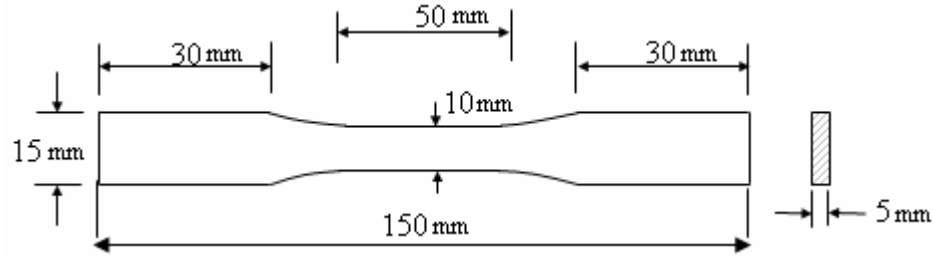
Tablo 5.4. SikaForce 7710'un özellikleri[89].

	SikaForce 7710	Karışım
Renk	Beyaz	Hafif kahve
Yoğunluk	1.6gr/cm ³	1.5 gr/cm ³ (CQP-006-4)
Viskozite (23°C)	30,000 mPa.s	10,000 mPa.s (CQP-538-2)
Sertlik	23°C, %50 nem ve 1ay süre sonunda 80 Shore D	

5.4. Yapıştırıcıların Gerilme-Şekil Değişirme Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılmak üzere seçilen yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit edebilmek amacıyla, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgâhları Laboratuvarında yapıştırıcıların bulk numunelerinin döküleceği bir kalıp üretilmiştir. Daha sonra yapıştırıcıların her ikisinden de Şekil 5.8.'de ki boyutlara uygun olarak

bulk numuneler dökülüp hazırlanmış ve ASTM E8(1999)'de tanımlanan çekme deney esasları uygulanarak gerilme-şekil değiştirme davranışı tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. Bulk numuneler için standart çekme numunesi (ISO 527-2).

5.4.1. Bulk Numunelerin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantılarının son derece yaygın bir kullanım alanı olmasına karşın, yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde yaşanan zorluklar, bu teknolojinin benimsenmesinde güçlüklerle karşılaşılmasına neden olmaktadır. Bu durum, araştırmacıların tasarım amaçlarına uygun mekanik özelliklerin tespiti üzerine yoğunlaşmalarına sebep olmuştur[90].

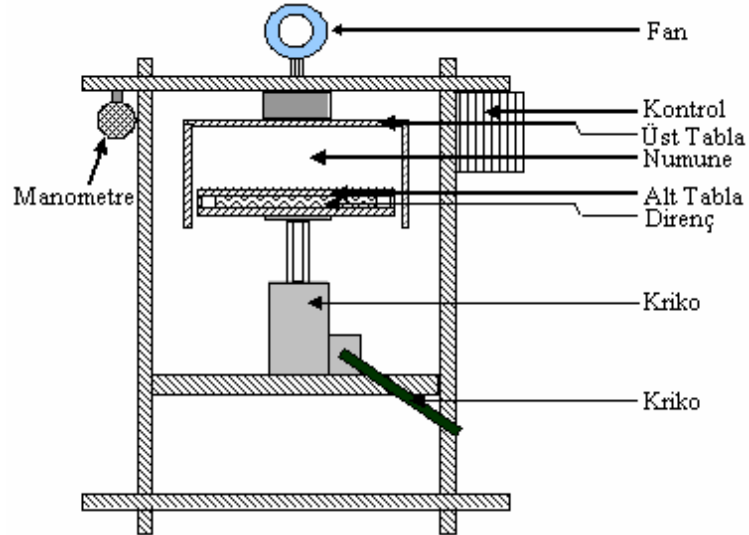
Bir yapıştırıcının mekanik özellikleri tespit edilirken, bulk formda ya da bağlantı formunda numuneler kullanılır. Bağlantı formundaki numunelerin kullanılması uygulama yerindeki orijinal yükleme tipini temsil etmesine karşın, bu tipteki numunelerde yapıştırıcının herhangi bir mekanik özelliğinin tespitinden ziyade yapıştırılan malzemenin yapışabilmesi test edilmiş olur. Bu gibi dezavantajlar bulk numunelerin kullanılmasıyla giderilebilir[90].

Yapısal yapıştırıcılardan uygun boyutlarda bulk numunelerin hazırlanması, mühendislikte kullanılan standart deney yöntemlerinin farklı yük şartlarında yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesine imkân sağlayan hem daha doğru hem de daha ucuz bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmamızda kullanılan yapıştırıcıların bulk numunelerinin hazırlanmasında Erzurum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde geliştirilmiş olan bir pres kullanılmıştır(Şekil 5.9).

Bulk numuneler hazırlanırken; belirli kalınlığa sahip iki levha ve bunlar arasına yapıştırıcı tabakasının kalınlığını ayarlamak amacıyla yerleştirilmiş kalıplar kullanılır. Kalıp sayesinde yapıştırıcı içerisindeki gaz boşlukları ve süreksizlikler giderilmiş olur.

Yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit üzere kullanılan bulk numuneleri aşağıda anlatılan esaslara göre hazırlanmıştır;

- Dean ve Duncan (1995), 2-3 mm kalınlıkları arasında hazırlanmış bulk numunelerden daha doğru ve tekrarlanabilir veriler elde edileceğini rapor etmişlerdir[91]. Ancak çalışmamızda kalınlığı 5 mm olan kalıp hazırlanmıştır.
- Silikon yağlayıcı, kalıbın içerisine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulmuş ve böylece hem bulk yapıştırıcıların kalıbın üzerine yapışması engellenmiş hem de kürleşme sonrası yapıştırıcının kalıptan kolayca ayrılması sağlanmıştır.
- Kullanılan her bir yapıştırıcı için iki adet bulk numune hazırlanmıştır. Hazırlanan toplam dört bulk numune Şekil 5.9.'da gösterilen pres makinesinin içine konularak hem gaz boşluklarının giderilmesi sağlanmıştır hem de yapıştırıcının kürleşebilmesi için gereken basınç uygulanmıştır.
- Bulk numuneler test edilinceye kadar, sıcaklığı 22°C olan ortamda saklanmıştır(ISO 291).



Şekil 5.9. Bulk numune hazırlarken kullanılan pres makinesi.

5.4.2. Bulk numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Davranışının Belirlenmesi

Genellikle mekanik davranış, yük altında malzemelerin bünyesinde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeleri açıklayan en genel kavramdır. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri, plastikler için geliştirilmiş standartlara uygun olarak hazırlanmış numunelerin çekme cihazına bağlanıp tek eksenli gerilme uygulanması ile belirlenebilir[90].

Çekme deneyinden elde edilecek yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin güvenilirliği, uygulanan kuvvet altında oluşan yer değiştirmelerin doğru tespitini gerektirir. Genelde uygulanan kuvvetin ölçülmesinde nadiren problemlerle karşılaşılmasına rağmen, ölçülecek yer değiştirmeler; şekil değişim oranı ve şiddetine, yapıştırıcının mukavemetine bağlıdır.

olduğundan bu tür ölçümlerin yapılmasında güçlüklerle karşılaşılır. Sert ve esnek yapısal yapıştırıcılar için şekil değişimini ölçen sistemler genelde iki kategoriye ayrılır[92]. Bunlarda numuneye temas halinde olan (extensometre veya strain gauge) veya temas halinde olmayan (optik ve video extensometreler) ölçüm aletleri ve çekme cihazının çene pozisyonuna göre tespit edilir.

Yapıştırıcı numuneleri üzerinden şekil değişimlerinin ölçülmesinde kullanıldığında strain gauge'lerin önemli hatalar verdiği görülür. İşçilik ve maliyetleri de dikkate alındığında strain-gaugeler diğer yöntemlerin kullanılmayacağı durumlar dışında tavsiye edilmezler[92].

Numuneye temas halindeki extensometreler, %10'nun altındaki şekil değişimlerinin tespitinde tekrarlanabilir sonuçlar üreten oldukça doğru ve uygun sistemlerdir. Bununla birlikte yüksek doğruluk oranının sağlanabilmesi için numunenin her iki yüzüne de extensometre yerleştirilerek şekil değiştirmelerin ortalaması alınmalıdır[92].

Hasar anına kadar yüksek şekil değişimine uğrayan yapıştırıcılar için temas halinde olmayan ölçüm sistemlerinin kullanılması daha doğru sonuçlar vermektedir. Bunun başlıca nedeni, esnek malzemelerin vizko-elastik davranış sergilemeleri ve extensometre ağırlığının burkulmaya neden olmasıdır. Bu yüzden temas halinde olmayan extensometrelerin esnek yapıştırıcı numunelerde kullanılması büyük avantajlar sağlamaktadır. Ancak %2'nin altındaki şekil değiştirmelerin tespitinde bu cihazlar doğru sonuçlar vermezler[91].

Bulk numunelerin çekme deneyleri; Şekil 5.4.'de gösterilen bilgisayar kontrollü Shimadzu (100 kN) universal test cihazında video extensometre kullanılarak yapılmıştır. Çekme deneyleri oda sıcaklığında ve %50 nem ortamında yapılmıştır. Hata oluşumunu engellemek için, numunelerin serbest uçları çekme cihazının çenelerine tutturulurken mümkün olduğunca eşit basınç uygulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca eksenlemeye dikkat edilmiştir.

Yapıştırıcıların elastisite modülü belirlenirken, numuneler ISO 527-2 ve ISO 527-1'de tavsiye edilen 1 mm/dk'lık çekme hızıyla yüklenmiştir. Çalışmada kullanılan yapıştırıcıların elastisite modülü 0.001 ve 0.01 aralığındaki şekil değiştirmeler ve bu değerlere karşılık gelen gerilmeler kullanılarak denklem (5.1)'deki formülden hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5.1)$$

Elastisite modülü tespit edildikten sonra numunelerdeki yük boşaltılmış ve numunelerin tamamıyla önceki durumlarına dönmeleri sağlanmıştır. Daha sonra yapıştırıcıların hasar anına kadar sergiledikleri gerilme-şekil değiştirme davranışlarını belirleyebilmek için, numuneler kopma gerçekleşinceye kadar 1 mm/dk. şekil değiştirme hızıyla yüklenmiştir.

Kopma anına kadar oluşan yük-uzama verilerinden (P-Δl), denklem (5.2) ve (5.3) kullanılarak da gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) diyagramı elde edilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.2)$$

$$\sigma = \frac{P \cdot (1 + \varepsilon)}{A_0} = \frac{P \cdot (1 + \varepsilon)}{b_1 \cdot h} \quad (5.3)$$

Deneyler yapılırken her numune yakından gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, numuneler test edilirken kuvvet-yer değiştirme verileri, numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük ve hasar tipi kaydedilmiştir. Numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük denklem (5.4)'de verilen eşitlikte yerine konarak bağlantının ortalama kayma dayanımı hesaplanmıştır.

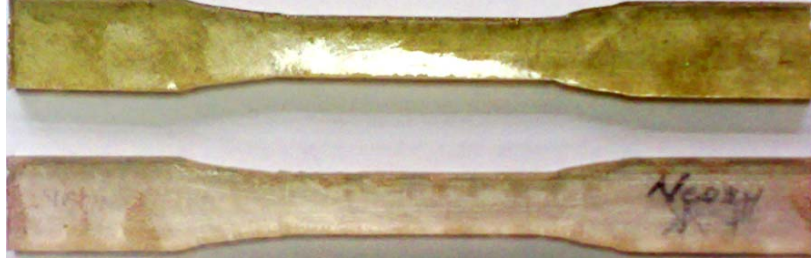
$$\tau_{ort} = \frac{P_{max}}{a \cdot w} \quad (5.4)$$

Bağlantı, geometrisinden dolayı çekmeye zorlandığında eksantrik bir yükleme durumu söz konusu olur. Bu durum, numunelerde eğilme momentinin meydana gelmesine ve dolayısıyla bindirme bölgelerinde dönmelerin oluşmasına neden olur. Yapıştırılan malzemelerdeki dönmeler ise, yapıştırmanın yapıldığı bölgede soyulma gerilmelerini oluşturur. Amijima ve arkadaşları (1989) ve Özel ve arkadaşları (2003) tarafından yapılan çalışmalarda soyulma gerilmelerinin meydana geldiği bölgelerin hasarın başlama bölgeleri olduğu ve dolayısıyla yapıştırmanın yapıldığı bölgedeki eksantrikliklerin oldukça önemli olduğu sonucuna varmışlardır[93,94]. Çalışmamızda yapıştırıcı bağlantılarda eğilme momenti oluşumunu engellemek için Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi numunelerin çekme cihazının çenelerine bağlanacak serbest kısımlarına 5x15x12.7mm ebatlarında destek elemanı için boşluk bırakılmıştır.

5.4.2.1. Neoxil CE 92 N8 Bulk Numunelerinin Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramı

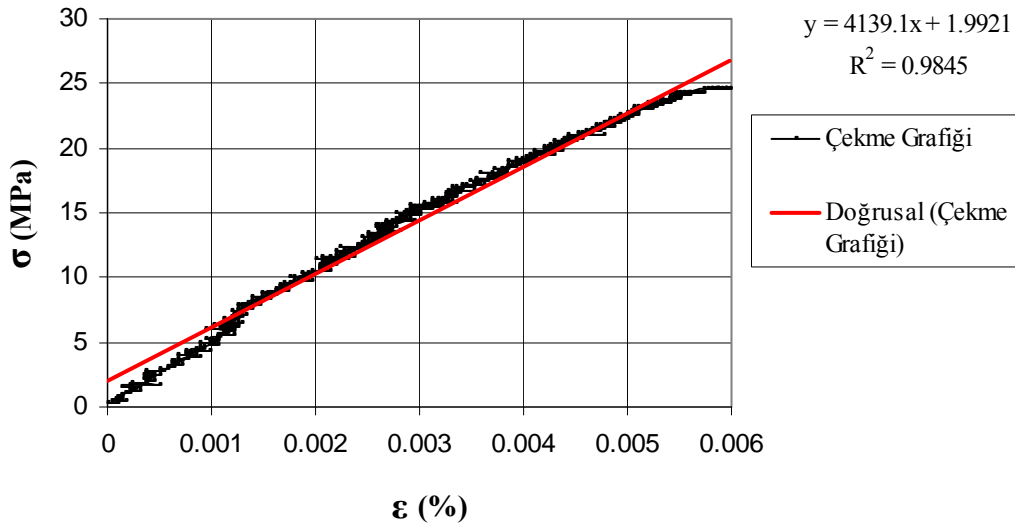
Şekil 5.10'da Erzurum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında hazırlanan Neoxil CE 92 N8 bulk numuneleri görülmektedir. Bu numuneler, Şekil 5.9'da ki pres makinesinde gaz boşlukları ve süreksizlikleri giderilmiş olarak üretilmiştir. Daha sonra 100

kN'luk bilgisayar kontrollü Shimadzu çekme makinasında 1 mm/dk'lık çekme hızında çekilmiştir(Şekil 5.4).



Şekil 5.10. Neoxil CE 92 N8 bulk numuneleri.

Çekme deneyine tabii tutulan Neoxil CE 92 N8 bulk numunelerinin kuvvet-uzama değerleri denklem (5.2) ve (5.3) deki eşitliklerde yerine konularak Şekil 5.11'de ki gerilme-şekil değiştirme diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 5.11. Neoxil CE 92 N8 bulk numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.

Gerilme-şekil değiştirme diyagramında görüldüğü gibi eğri, doğruluk oranı 0.9845 olan bir doğrudur. Deney neticesinde elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiğinin yaklaşık olarak bir doğru olması numunenin akmaya uğramadan koptuğunu göstermektedir. Bundan dolayı Neoxil CE 92 N8 ile yapıştırılan numunelerin gerçekleştirilecek olan nümerik çalışmalarında elastik gerilme analizi yapılacaktır.

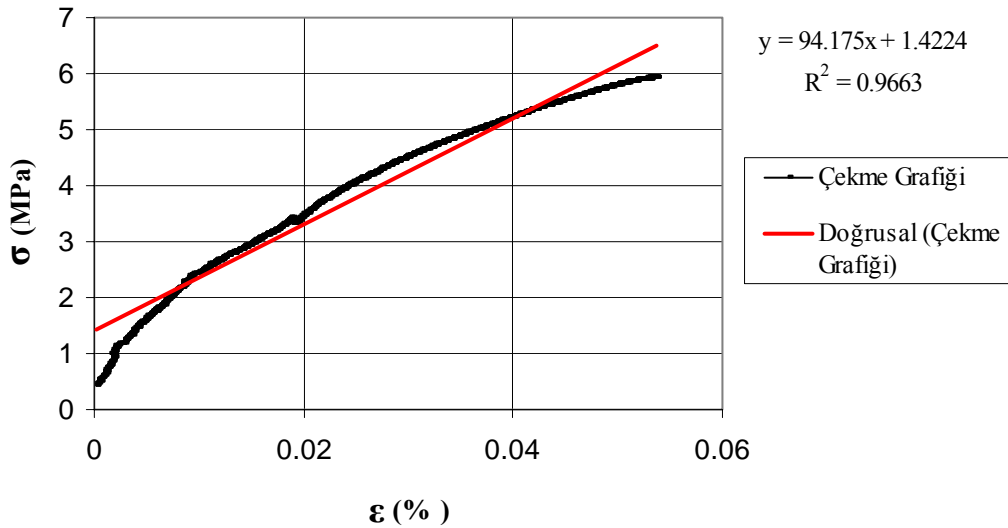
5.4.2.2. SikaForce 7710 Numunelerinin Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramı

Şekil 5.12’de görülen SikaForce 7710 bulk numuneleri de Erzurum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında hazırlanmış ve Şekil 5.9’da görülen pres makinesinde gaz boşlukları ve süreksizlikleri giderilmiş olarak üretilmiştir. Daha sonra 100 kN’luk bilgisayar kontrollü Shimadzu çekme makinesinde 1 mm/dk’lık çekme hızında çekilmiştir.



Şekil 5.12. SikaForce 7710 bulk numuneleri

Gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda SikaForce 7710 bulk numunelerin kuvvet-uzama değerleri elde edilmiştir. Daha sonra denklem (5.2) ve (5.3) yardımıyla Şekil 5.13’de görülen gerilme-şekil değişirme diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 5.13. SikaForce 7710 bulk numunelerin gerilme-şekil değişirme diyagramı

Gerilme-şekil değiştirme diyagramında görüldüğü gibi eğri yaklaşık bir doğrudur. Çünkü doğruluk oranı grafikte de görüldüğü gibi 0.9663'dür. Eğri yaklaşık bir doğru olduğu için numune akmaya uğramadan kopmuştur. Bundan dolayı, Neoxil CE 92 N8 de olduğu gibi SikaForce 7710 ile yapıştırılan numunelerin nümerik çalışmalarında da elastik gerilme analizi yapılacaktır.

Tablo 5.5. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri

Yapıştırıcı	Test Metodu	Birim	Neoxil CE 92 N8	SikaForce 7710
Yoğunluk	ISO 1183-A (CQP 006-4)	(g/cm ³)	1.1 - 1.4	1.5
Elastisite modülü	ISO 178	(MPa)	4152	110
Çekme mukavemeti	ISO 527	(Mpa)	24.7	5.93
Poisson oranı	ISO 527	(---)	0.35	0.38
Kayma modülü	ISO 527	(Mpa)	1540	40
Sertlik	ASTM-D2583 (DIN 53505)	(---)	45 Barcol	80 Shore D

Bulk numunelerin mekanik özellikleri Tablo 5.5.'de görüldüğü gibidir. Tabloda yer alan değerlerden yoğunluk ve sertlik üretici firma kataloglarından alınmış, diğer mekanik değerler ise bulk numunelerin çekme deney sonuçlarından elde edilmiştir.

5.5. Teorik Analiz

5.5.1. Elastik analiz

Çekme yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısı için Goland ve Reissner (1944) tarafından kurulan model ve bu modelin yapıştırılan malzemede oluşan kayma şekil değişimleri dikkate alınarak Tsai *et al.* (1998) tarafından iyileştirildiği model ile analiz yapılmıştır[8, 95].

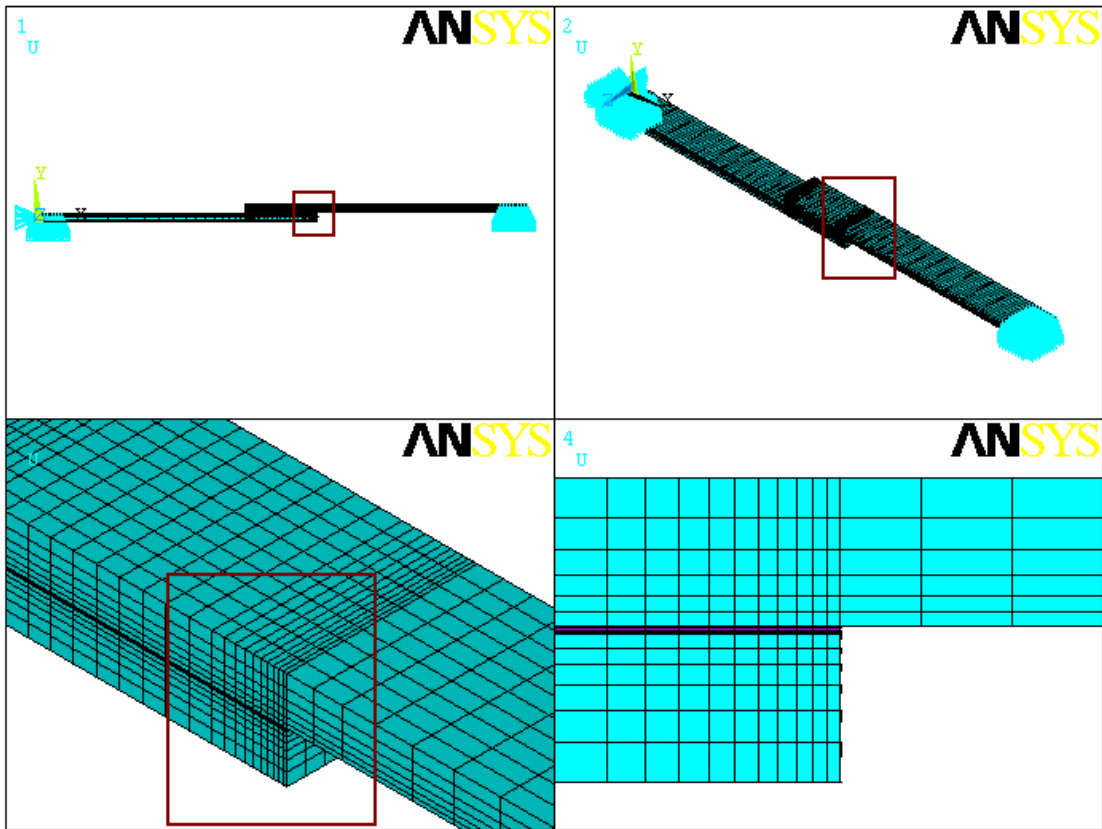
Sonlu eleman analizlerinde, deneysel çalışmalarda iki farklı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısı ve 2 farklı bindirme mesafesine sahip kompozit numuneler Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da gösterildiği gibi modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan numune boyutları ve yükleme şartları deneysel çalışmalarda kullanılanlarla aynıdır.

Numunelerin elastik ve elasto-plastik gerilme analizleri, sonlu elemanlar paket programı ANSYS 10.0 kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerde kompozit malzeme, üç serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip üç boyutlu (3-D) Solid 64 elemanı kullanılarak yapıştırıcı malzeme ise üç serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip üç boyutlu (3-D) Solid 45 elemanı kullanılarak modellenmiştir.

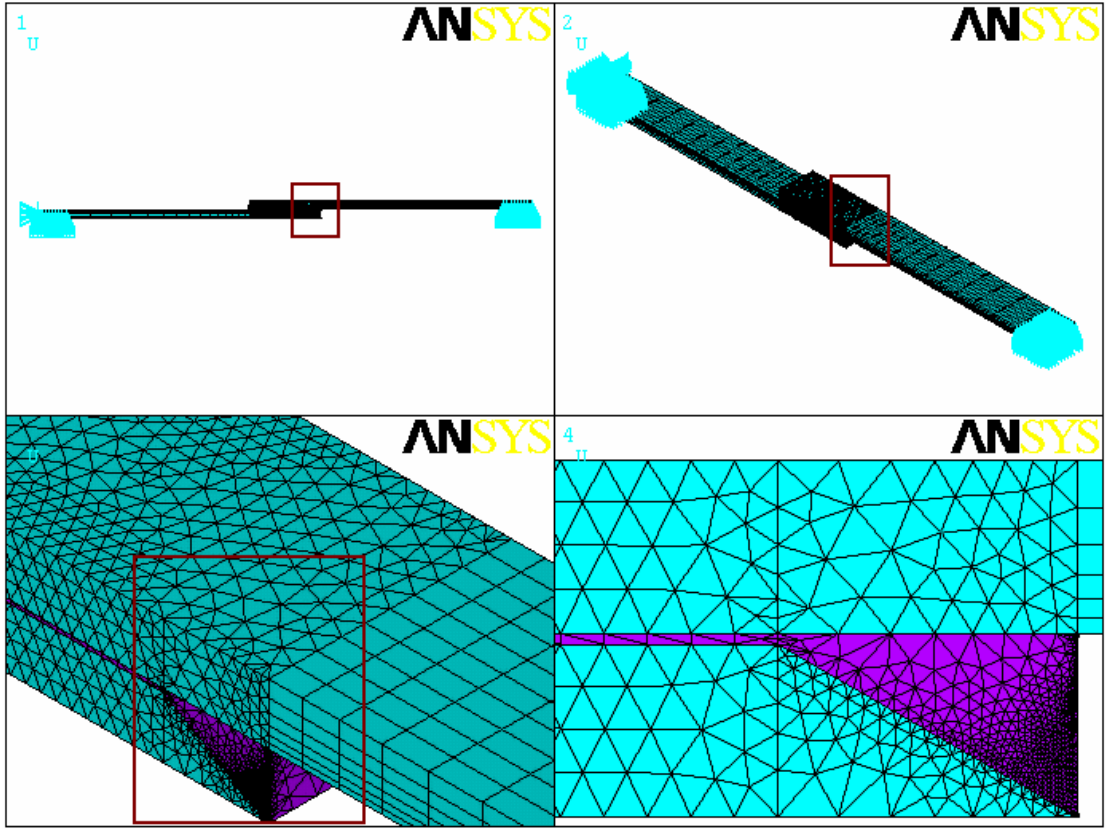
Ansys’de oluşturulan modelin mesh yapısı Şekil 5.14. ve Şekil 5.15’de görüldüğü gibidir. Gerilme dağılımları açısından kritik bölge olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölge daha küçük elemanlara bölünerek bu bölgelerde daha hassas bir meshleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uç açısının mevcut olduğu numunelerde ($\theta=15, 30, 45, 60$ ve 75°) açılı kısımlardan dolayı bindirme bölgesinin meshlenmesinde üçgen elemanlar kullanılmıştır(Şekil 5.15).

Sonlu elemanlar analizinde yapıştırma bağlantılarını düzlem elemanlara ayırma işlemi son derece önemlidir. Çalışmada bindirme mesafesi ve uç açısının etkisi incelendiğinden, kullanılan düzlem eleman boyutlarının bu parametrelerden etkilenmemesi için tüm modellerde mümkün olduğunca aynı boyutlara sahip elemanlar kullanılmıştır. Non-linear sonlu elemanlar analizlerinde, bulk numunelerinin tek eksenli çekme deneyinden elde edilmiş olan gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınmıştır. Ayrıca, yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemelerde oluşan eş değer gerilmelerin hesaplanmasında denklem (5.5)’te verilen von Mises akma kriteri kullanılmıştır.

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (5.5)$$



Şekil 5.14. Uç açısı sıfır olan numunelerin meshlenmiş hali.



Şekil 5.15. Uç açısı sıfırdan farklı olan numunelerin meshlenmiş hali.

5.6. Ansys Sonlu Elemanlar Yazılımı

ANSYS (Swanson Analysis System) yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimlerini gerçeğe uygun bir şekilde kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır[96].

Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simule edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu modellemeler neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır.

Başlıca kullanım alanları;

- Mukavemet Hesapları
- Titreşim Hesapları
- Yorulma Hesapları

- Çarpma ve Devrilme Simülasyonları
- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
- Isı transferi Hesapları
- Metal Şekillendirme Hesapları
- Elektromanyetik Hesaplar
- Mekanizma Dinamiği Hesapları
- Test ve Ölçüm Sistemleri
- Sistem Modelleme
- Otomatik Kontrol Simülasyonları'dır.

ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD verilerini alabilmekte hem de içindeki menü imkânları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Gene aynı menü içinde hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli yani mesh de oluşturulmaktadır. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilir[96].

Ansys'te analizi yapılan model sonlu sayıda elemana bölünerek, sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Önemli olan geometrik modeli doğru ve sağlam bir şekilde oluşturmaktır. Ansys'te farklı analiz tipleri için geliştirilmiş yaklaşık 140 eleman tipi mevcuttur.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra yükleme ve sınır koşulları belirlenir ve programa işlenir. Bu aşamada problemin çok iyi yorumlanması ve modele gelen yükleri doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir.

Çalışmamızda Ansys 10.0 versiyonu kullanılarak deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin bire bir modelleri oluşturulmuş (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6), oluşturulan bu modellere yine deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen Tablo 5.2 ve Tablo 5.5'de görülen kompozit malzeme ve yapıştırıcı malzemenin özellikleri girilmiştir. Daha sonra model Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de görüldüğü gibi sonlu elemanlara bölünerek sınır şartları uygulanmış ve çözüm gerçekleştirilmiştir.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

6.1. Giriş

Çalışmada Tablo 5.1’de verilen ölçü ve geometrilerde karbon fiber takviyeli polyester matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve üretilen bu kompozit malzemeler Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görüldüğü gibi uç açısı ve bindirme mesafesi değiştirilerek, Neoxil CE 92 N8 ve SikaForce 7710 yapıştırıcıları kullanılarak birleştirilmiştir. Belirli bir süre kurumaya bırakılan yapıştırıcı bağlantı numuneleri daha sonra bulk numunelerinin de çekme hızı olan 1mm/dk. çekme hızında çekme deneyine tabi tutulmuş ve deney sonucunda bağlantılardan gerekli sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde ilk önce gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen veriler değerlendirilmiş daha sonra elde edilen bu verilerden hareketle gerçekleştirilen nümerik çalışmaların sonuçları tartışılmış ve her iki sonuç birbiri ile karşılaştırılarak en uygun yapıştırıcı tipi ve serbest uç açısı belirlenmeye çalışılmıştır.

6.2. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

Çekme deneyleri gerçekleştirilmeden önce numunelerin gerekli ölçüleri kaydedilmiş, deney esnasında hasar mekanizmasını anlayabilmek için deney boyunca numuneler yakından gözlenmiş ve deney sonrasında da numune ölçüleri ve hasar kuvvetleri kaydedilmiştir. Deney neticesinde kaydedilen bu bilgilerden yararlanılarak yapıştırıcı birleştirmeli bağlantılarda meydana gelen ortalama kayma gerilmesi hesaplanmış ve hasar mekanizması tespit edilerek Tablo 6.1.’de verilmiştir.

Tek tesirli bindirme bağlantılarında numunelere uygulanan kuvvetin eksantrikliğinden dolayı bindirme bölgesinde eğilme momenti meydana gelmekte ve meydana gelen bu moment bindirme bölgesinin serbest uçlarında büyük dönmeler oluşturarak soyulma gerilmelerinin oluşmasına sebep olmakta ve bu tip bağlantılarda kopma genellikle dönme açısının kritik bir değere ulaşmasından sonra meydana gelen çatlağın ilerleyerek belirli bir kesit alanına ulaşması ile anlık olarak gerçekleşmektedir[65].

Neoxil CE92 N8 ile yapıştırılan numunelerde tüm bindirme mesafeleri için soyulma etkisi az da olsa oluşmuş ve herhangi bir başlangıç hasarı gözlenmeden kopma anlık olarak gerçekleşmiştir. Serbest uç açısı 0° olan numunelerde yapıştırmanın gerçekleştirildiği bindirme bölgesinde oluşan hasar incelendiğinde “Kohosiv Hasar (KH)” tipinin meydana geldiği ve yapıştırılan her iki malzemede de eşit miktarda yapıştırıcı tabakası kaldığı gözlenmiştir. Serbest uç açısı 15, 30, 45, 60 ve 75° olan numunelerde ise “Özel Kohosiv Hasarı (ÖKH)” meydana

gelmiş ve yapıştırılan malzemelerden birinde diğerine oranla daha fazla yapıştırıcı tabakası kaldığı görülmüştür.

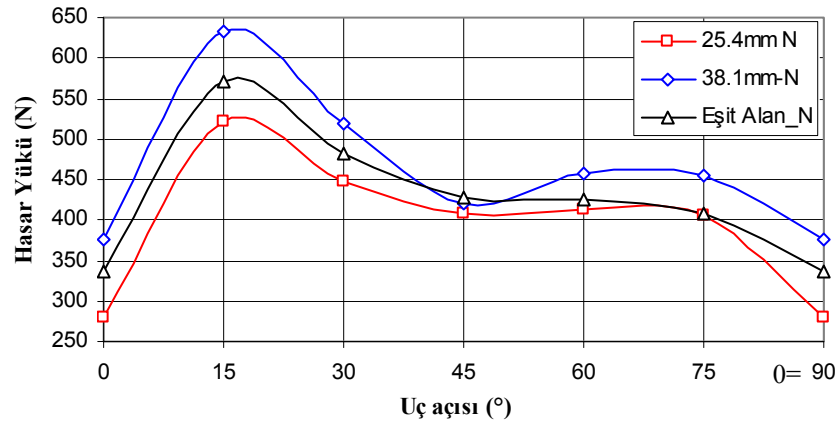
Tablo 6.1. Numunelerin deneysel olarak tespit edilen hasar yükleri, ortalama kayma gerilmeleri ve hasar tipleri.

Num. No	Yapıştırıcı	Açı (°)	Bindir. Mesafesi (mm)	Genişlik w (mm)	Hasar Yükü (N)	τ_{ort} (N/mm ²)	Hasar Tipi
1	Neoxil CE 92 N8	0	25.4*	12.7	279.186	0.865478	K.H.
2		15	25.4	12.7	522.695	1.620358	Ö.K.H.
3		30	25.4	12.7	447.931	1.388589	Ö.K.H.
4		45	25.4	12.7	408.579	1.266597	Ö.K.H.
5		60	25.4	12.7	411.937	1.277007	Ö.K.H.
6		75	25.4	12.7	404.529	1.254042	Ö.K.H.
7		0	38.1**	12.7	376.606	0.778321	K.H.
8		15	38.1	12.7	632.54	1.307252	Ö.K.H.
9		30	38.1	12.7	519.137	1.072885	Ö.K.H.
10		45	38.1	12.7	420.978	0.870023	Ö.K.H.
11		60	38.1	12.7	458.148	0.946841	Ö.K.H.
12		75	38.1	12.7	454.492	0.939285	Ö.K.H.
13		0	30.27	12.7	336.365	0.874973	K.H.
14		15	29.43	12.7	570.261	1.525737	Ö.K.H.
15		30	28.57	12.7	481.132	1.326021	Ö.K.H.
16		45	27.64	12.7	427.557	1.218014	Ö.K.H.
17		60	26.60	12.7	425.154	1.258522	Ö.K.H.
18		75	25.40	12.7	408.129	1.265202	Ö.K.H.
19	SikaForce 7710	0	25.4	12.7	311.819	0.966641	K.H.
20		15	25.4	12.7	338.91	1.050623	Ö.K.H.
21		30	25.4	12.7	614.821	1.905949	Ö.K.H.
22		45	25.4	12.7	604.341	1.873461	Ö.K.H.
23		60	25.4	12.7	588.949	1.825746	Ö.K.H.
24		75	25.4	12.7	528.533	1.638456	K.H.
25		0	38.1**	12.7	364.155	0.752589	K.H.
26		15	38.1	12.7	823.571	1.70205	Ö.K.H.
27		30	38.1	12.7	719.564	1.487102	Ö.K.H.
28		45	38.1	12.7	718.022	1.483915	Ö.K.H.
29		60	38.1	12.7	667.143	1.378765	Ö.K.H.
30		75	38.1	12.7	619.142	1.279563	Ö.K.H.
31		0	30.27	12.7	298.426	0.776284	K.H.
32		15	29.43	12.7	579.554	1.550601	Ö.K.H.
33		30	28.57	12.7	574.319	1.582848	Ö.K.H.
34		45	27.64	12.7	649.128	1.84922	Ö.K.H.
35		60	26.60	12.7	599.156	1.773595	Ö.K.H.
36		75	25.40	12.7	535.158	1.658993	K.H.

SikaForce 7710 ile yapıştırılan numunelerde Neoxil CE92 N8 ile yapıştırılan numunelerdeki sonuçlara benzer olarak tüm bindirme mesafeleri için soyulma etkisi azda olsa oluşmuş ve herhangi bir başlangıç hasarı gözlenmeden kopma anlık olarak gerçekleşmiştir. Serbest uç açısı 0° olan numunelerde yapıştırmanın gerçekleştirildiği bindirme bölgesinde oluşan hasar incelendiğinde “Kohosiv Hasar (KH)” tipinin meydana geldiği ve yapıştırılan her iki malzemede de eşit miktarda yapıştırıcı tabakası kaldığı gözlenmiştir. Serbest uç açısı 15, 30, 45, 60 ve 75° olan numunelerde ise “Özel Kohosiv Hasarı (ÖKH)” meydana gelmiş ve yapıştırılan malzemelerden birinde diğerine oranla daha fazla yapıştırıcı tabakası kaldığı görülmüştür.

Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 yapıştırıcıları için deneysel olarak elde edilen hasar kuvvetlerinin değişimi, serbest uç açısına ve bindirme mesafesi değişimine bağlı olarak Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.’de görülmektedir.

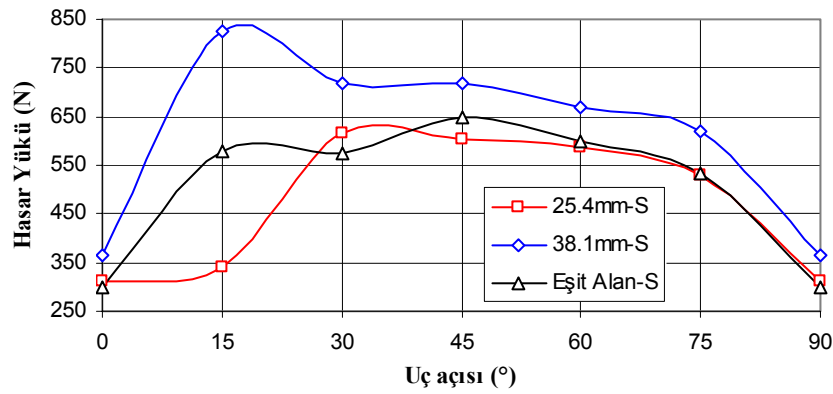
Şekil 6.1 de görüleceği üzere Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş numunelerde en düşük hasar kuvveti tüm bindirme mesafeleri için 0° de kaydedilirken en yüksek hasar kuvveti ise yine tüm bindirme mesafeleri için 15° de kaydedilmiştir. 15° den sonra hasar kuvveti düşmeye başlamış fakat tüm bindirme mesafeleri için de 0° deki değerlerden yüksek olarak tespit edilmiştir. Aynı açı değerlerinde bindirme mesafesi arttıkça hasarı meydana getiren kuvvetler artış göstermiştir. Örneğin 0° de 25.4 mm bindirme mesafesinde yaklaşık 279 N’luk bir kuvvet söz konusu iken bindirme mesafesi 38.1 mm ye çıkarıldığında hasar kuvveti yaklaşık olarak 1.35 kat artarak 376 N’a yükselmiştir.



Şekil 6.1. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafelerine bağlı olarak deneysel hasar kuvvetleri (N: Neoxil CE92 N8).

Şekil 6.2. de ise SikaForce 7710 ile birleştirilmiş numunelerin deney neticesinde elde edilen hasar kuvvetlerinin uç açlarına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Burada da Şekil 6.1

dekine benzer olarak hasar kuvvetlerinin maksimum değerleri 15° de gözlenirken 0° de en düşük hasar kuvvetleri tespit edilmiştir. SikaForce 7710 ile birleştirilen numunelerde bindirme mesafesi arttıkça uç açısının değişimine bağlı olarak meydana gelen bu artış daha net bir şekilde gözlenmektedir. Aynı açı değerlerinde bindirme mesafesi arttıkça hasarı meydana getiren kuvvetler SikaForce 7710 kullanılarak yapıştırılmış numunelerde de artış göstermiştir. Bu yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılarda bindirme mesafesi değişimine bağlı olarak hasar kuvvetinde ki en büyük değişim 15° de gerçekleşmiş ve 25.4mm bindirme mesafesinde hasar yükü yaklaşık 339N iken 38.1mm bindirme mesafesinde 824N çıkararak yaklaşık 2.43 kat artmıştır.

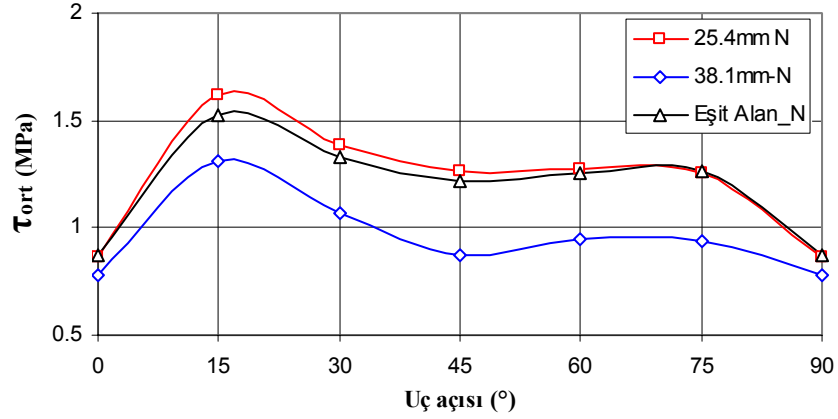


Şekil 6.2. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafesine bağlı olarak deneysel hasar kuvvetleri (S: SikaForce 7710).

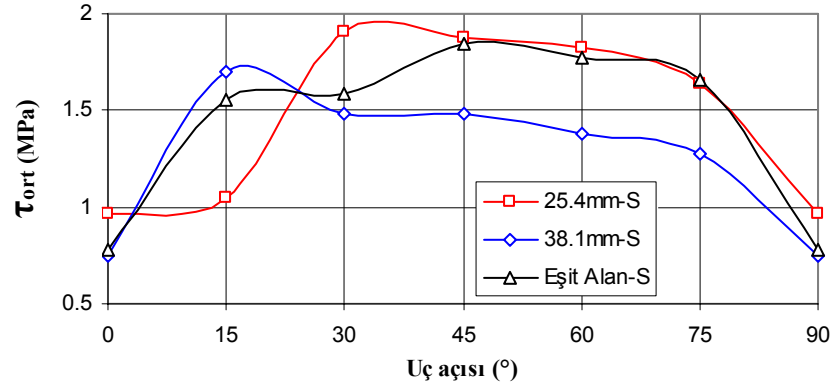
Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 yapıştırıcıları için deneysel olarak elde edilen hasar kuvvetlerinin bindirme mesafesi ve numune genişliğinin çarpımından elde edilen alana bölünmesinden (denklem 5.4) elde edilen ortalama kayma gerilmelerinin, serbest uç açısı ve bindirme mesafesi değişimine bağlı olarak değişimleri ise Şekil 6.3. ve Şekil 6.4.'de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde ortalama kayma gerilmelerinin uç açısına bağlı olarak değişimlerinin Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 dekine benzer bir değişim gösterdiği hemen fark edilmektedir. Burada hasar yükündeki grafiklerden farklı olarak göze çarpan durum ise bindirme mesafesinin artmasıyla ortalama kayma gerilmelerinin azalmasıdır.

Aynı açı değerlerinde bindirme mesafesi arttıkça ortalama kayma gerilmesi değerleri düşüş göstermiştir. Örneğin Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda, 0° de 25.4mm bindirme mesafesinde yaklaşık 0.87 MPa'lık bir gerilme söz konusu iken bindirme mesafesi 38.1mm ye çıkarıldığında ortalama kayma gerilmesi yaklaşık olarak 0.899 kat azalarak 0.78 MPa'a düşmüştür. Ortalama kayma gerilmesi, serbest uç açısının arttırılması ile bindirme mesafesine bağlı olarak daha fazla etkilenmiştir (Şekil 6.3).

SikaForce 7710 ile birleştirilmiş bağlantılarda ise 0° de 25.4mm bindirme mesafesinde yaklaşık olarak 0.97MPa'lık bir gerilme meydana gelirken bindirme mesafesi 38.1mm arttırıldığında ortalama kayma gerilmesi yaklaşık olarak 0.78 kat azalarak 0.75MPa'a düşmüştür(Şekil 6.4).



Şekil 6.3. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafesine bağlı olarak ortalama kayma gerilmesi değişimi(N: Neoxil CE92 N8).



Şekil 6.4. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantıların uç açısı ve bindirme mesafesine bağlı olarak ortalama kayma gerilmesi değişimi(S: SikaForce 7710).

Çalışmada kullanılan yapıştırıcılara ait tek eksenli çekme yükü altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenirse Neoxil CE92 N8'in çekme dayanımı SikaForce 7710'un çekme dayanımından 4.165 kat büyüktür(Şekil 5.11 ve Şekil 5.13). Bununla birlikte, SikaForce 7710'un şekil değiştirebilme kabiliyeti Neoxil CE92 N8'ye nazaran oldukça yüksektir.

6.3. Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Eleman Sonuçlarının Karşılaştırılması

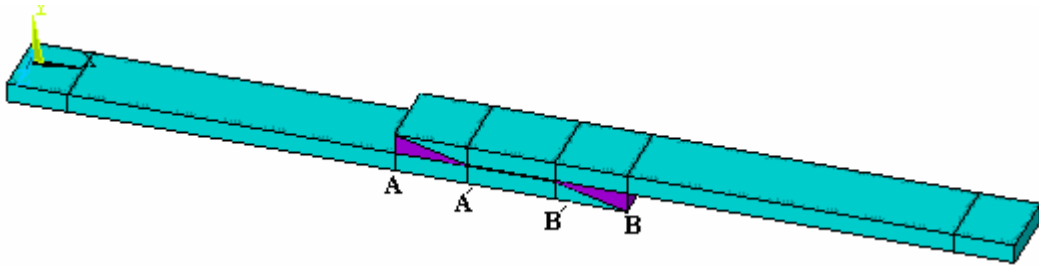
Çalışmamızda iki farklı yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş bindirme bağlantılarında, yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınarak, farklı serbest uç açıları ve farklı bindirme mesafeleri için lineer elastik sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde hasar yükü tahmin edilirken, yapıştırıcıların aşağıda verilen çekme dayanımları dikkate alınmış ve grafiklerde σ^* olarak ifade edilmiştir.

$$\sigma_{Neoxil} = 24.7MPa$$

$$\sigma_{Sika} = 5.93MPa$$

Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantı yüklendiğinde yapıştırıcı tabakasında üç eksenli gerilme durumu söz konusu olur. Bu yüzden eş değer gerilmeler ($\sigma_{eş}$), von Mises akma kriterine göre hesaplanmış ve bu eş değer gerilmeler yapıştırıcı tabakanın her hangi bir noktasında yapıştırıcının çekme dayanımına ulaştığında hasarın meydana geldiği kabul edilmiştir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında kritik bölge yapıştırıcı-yapıştırılan malzemenin ara yüzeyleridir. Bundan dolayı, yapıştırıcı tabakasındaki gerilme analizlerinde Şekil 6.5.'de gösterilen **A-B** hattı dikkate alınmıştır. Yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için, A-B hattı boyunca yapıştırıcı tabakası üzerinden alınan gerilme dağılımları her bir yapıştırıcının kendi bulk numunesinin tek eksenli çekilmesi sonucu elde edilen çekme dayanımına ($\sigma_{Neoxil} \cdot \sigma_{Sika}$) bölünerek normalleştirilmiştir. Benzer şekilde farklı bindirme uzunluklarında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için de, gerilme dağılımı hesaplanan noktanın yatay eksen üzerindeki koordinat değeri (**x**), kendi bindirme uzunluğuna (**a**) bölünerek normalleştirilmiştir.



Şekil 6.5. Farklı uç açılarına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için kritik bölge (A-B hattı).

Şekil 5.8'deki ölçülere göre hazırlanmış bulk numunelerin deneylerinden elde edilen maksimum gerilmeler ile sonlu elemanlar analizi ile bulunan yapıştırıcı arayüzeyindeki maksimum von Mises gerilmeleri Tablo 6.2 de karşılaştırılmıştır. Tablo 6.2 deki gerilme oranlarına dikkat edilirse yaklaşım oranının tüm numuneler için yaklaşık 1 olduğu görülmektedir. Bu durumda sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçların çok yakın çıkması gerilme dağılımı olarak sayısal sonuçlardan elde edilen verilerden oluşturulacak grafiklerin kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca Tablo 6.2 deki sayısal gerilme değerleri numunelerin sayısal olarak kuvvet uygulanan alanı ile çarpılarak her numunenin sayısal hasar yükü tespit edilmiş ve deneysel hasar yükleriyle yaklaşım oranları belirlenmiştir (Tablo 6.3). Genellikle 1'e yakın değerler elde edilmiş dolayısı ile deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların uyum içerisinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.2. Yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan gerilmelerin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

Num. No	Yapıştırıcı Malzeme	Açı (°)	Bindir. Mesafesi (mm)	Yapıştırma Alanı (mm ²)	Deneysel Max.Ger (N/mm ²)	ANYS σ_{eqv} (N/mm ²)	Yaklaşım Oranı (Den.Ger/Ansys σ_{eqv})
1	Neoxil CE 92 N8	0	25.4*	322.5800	24.7	24.7	1.0000
2		15	25.4	333.1971	24.7	24.7	1.0000
3		30	25.4	344.1888	24.7	24.7	1.0000
4		45	25.4	355.9842	24.7	24.701	0.9999
5		60	25.4	369.1404	24.7	24.7	1.0000
6		75	25.4	384.4611	24.7	24.704	0.9998
7		0	38.1**	483.8700	24.7	24.7	1.0000
8		15	38.1	494.4871	24.7	24.7	1.0000
9		30	38.1	505.4787	24.7	24.7	1.0000
10		45	38.1	517.2742	24.7	24.699	1.0000
11		60	38.1	530.4304	24.7	24.7	1.0000
12		75	38.1	545.7510	24.7	24.7	1.0000
13		0	30.27	384.4611	24.7	24.7	1.0000
14		15	29.43	384.4611	24.7	24.7	1.0000
15		30	28.57	384.4611	24.7	24.699	1.0000
16		45	27.64	384.4611	24.7	24.701	0.9998
17		60	26.60	384.4611	24.7	24.7	1.0000
18		75	25.40	384.4611	24.7	24.704	0.9998
19	SikaForce 7710	0	25.4	322.5800	5.93	5.93	1.0000
20		15	25.4	333.1971	5.93	5.931	0.9998
21		30	25.4	344.1888	5.93	5.93	1.0000
22		45	25.4	355.9842	5.93	5.93	1.0000
23		60	25.4	369.1404	5.93	5.93	1.0000
24		75	25.4	384.4611	5.93	5.93	1.0000
25		0	38.1**	483.8700	5.93	5.93	1.0000
26		15	38.1	494.4871	5.93	5.93	1.0000
27		30	38.1	505.4787	5.93	5.93	1.0000
28		45	38.1	517.2742	5.93	5.93	1.0000
29		60	38.1	530.4304	5.93	5.93	1.0000
30		75	38.1	545.7510	5.93	5.931	0.9998
31		0	30.27	384.4611	5.93	5.93	1.0000
32		15	29.43	384.4611	5.93	5.93	1.0000
33		30	28.57	384.4611	5.93	5.93	1.0000
34		45	27.6	384.4611	5.93	5.93	1.0000
35		60	26.60	384.4611	5.93	5.929	1.0001
36		75	25.40	384.4611	5.93	5.93	1.0000

Tablo 6.3. Yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan hasar yüklerinin deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılması.

Num No	Yapıştırıcı Malzeme	Açı (°)	Bindir. Mesafesi (mm)	Yapıştırma Alanı (mm ²)	Deneysel Hasar Yükü (N)	ANSYS Hasar Yükü (N)	Yaklaşım Oranı (Deneysel HY. / Ansys HY.)
1	Neoxil CE 92 N8	0	25.4*	322.5800	279.186	290.7897	0.960096
2		15	25.4	333.1971	522.695	506.4344	1.032108
3		30	25.4	344.1888	447.931	414.4830	1.080698
4		45	25.4	355.9842	408.579	386.6605	1.056687
5		60	25.4	369.1404	411.937	386.8016	1.064983
6		75	25.4	384.4611	404.529	368.7533	1.097018
7		0	38.1**	483.8700	376.606	344.5880	1.092917
8		15	38.1	494.4871	632.54	584.3939	1.082386
9		30	38.1	505.4787	519.137	471.9869	1.099897
10		45	38.1	517.2742	420.978	435.7007	0.966209
11		60	38.1	530.4304	458.148	432.6805	1.058860
12		75	38.1	545.7510	454.492	419.1927	1.084208
13		0	30.27	384.4611	336.365	308.9348	1.088790
14		15	29.43	384.4611	570.261	526.0755	1.083991
15		30	28.57	384.4611	481.132	430.6443	1.117238
16		45	27.64	384.4611	427.557	391.2290	1.092856
17		60	26.60	384.4611	425.154	390.3540	1.089150
18		75	25.40	384.4611	408.129	368.7533	1.106781
19	SikaForce 7710	0	25.4	322.5800	311.819	286.4752	1.088468
20		15	25.4	333.1971	338.91	358.6162	0.945049
21		30	25.4	344.1888	614.821	564.0956	1.089923
22		45	25.4	355.9842	604.341	575.5149	1.050087
23		60	25.4	369.1404	588.949	539.6037	1.091447
24		75	25.4	384.4611	528.533	496.4022	1.064727
25		0	38.1**	483.8700	364.155	331.3904	1.098870
26		15	38.1	494.4871	823.571	791.6314	1.040347
27		30	38.1	505.4787	719.564	658.3454	1.092989
28		45	38.1	517.2742	718.022	653.5632	1.098627
29		60	38.1	530.4304	667.143	611.3979	1.091176
30		75	38.1	545.7510	619.142	567.4988	1.091001
31		0	30.27	384.4611	298.426	302.1042	0.987825
32		15	29.43	384.4611	579.554	586.2206	0.988628
33		30	28.57	384.4611	574.319	599.8012	0.957516
34		45	27.64	384.4611	649.128	597.5431	1.086328
35		60	26.60	384.4611	599.156	547.1561	1.095037
36		75	25.40	384.4611	535.158	496.4022	1.078073

6.4. Sonlu Eleman Analizlerinden Elde Edilen Sonuçlar

6.4.1. Bindirme uzunluğunun bağlantı dayanımı üzerine etkisi

Şekil 6.6, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 0° uç açısına sahip 25.4, 30.2 ve 38.1 mm bindirme uzunluğunda birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Bu grafikler incelenirse, tüm gerilme dağılımlarının genel olarak $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında maksimum değerler aldığı görülür.

Şekil 6.6.a, her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan normal gerilme dağılımını göstermektedir. Normal gerilme dağılımı $0.1 \leq x/a \leq 0.9$ aralığında her iki yapıştırıcı içinde paralel bir değişim sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.1$ ve $0.9 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış eğilimi göstermiş $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de pik değerlerine ulaşmıştır. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen normal gerilmenin maksimum değerleri SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılardan yaklaşık olarak 2 kat daha yüksek olarak oluşmuştur.

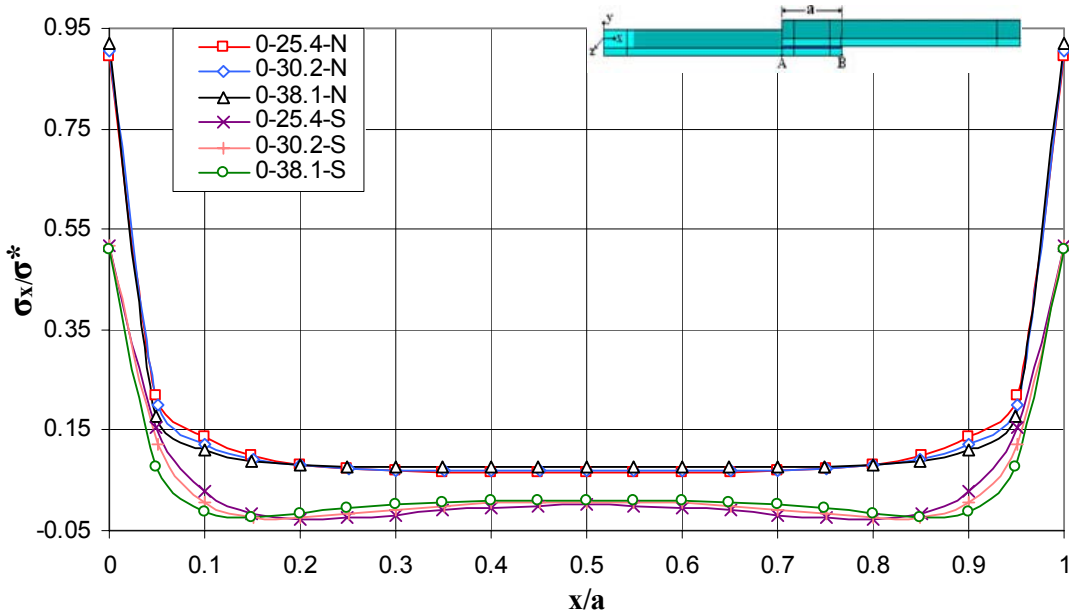
Şekil 6.6.b, her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan soyulma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Soyulma gerilmesi dağılımı Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda $0.05 \leq x/a \leq 0.95$ aralığında tüm bindirme uzunlukları için x-eksenine paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.05$ ve $0.95 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında pik değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise soyulma gerilmesi dağılımları $0 \leq x/a \leq 0.1$ ve $0.9 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış eğilimi göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de pik değerlerine ulaşmıştır. Her iki yapıştırıcı için soyulma gerilmelerinin maksimum değerleri yaklaşık olarak eşittir.

Şekil 6.6.c, 0° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan z-ekseni yönündeki gerilme dağılımını göstermektedir. Gerilme dağılımı olarak Şekil 6.6.b, deki soyulma gerilmeleri ile hemen hemen aynı karakteristiği sergilerken gerilmelerin maksimum değerleri soyulma gerilmelerinin yaklaşık olarak yarısı kadardır.

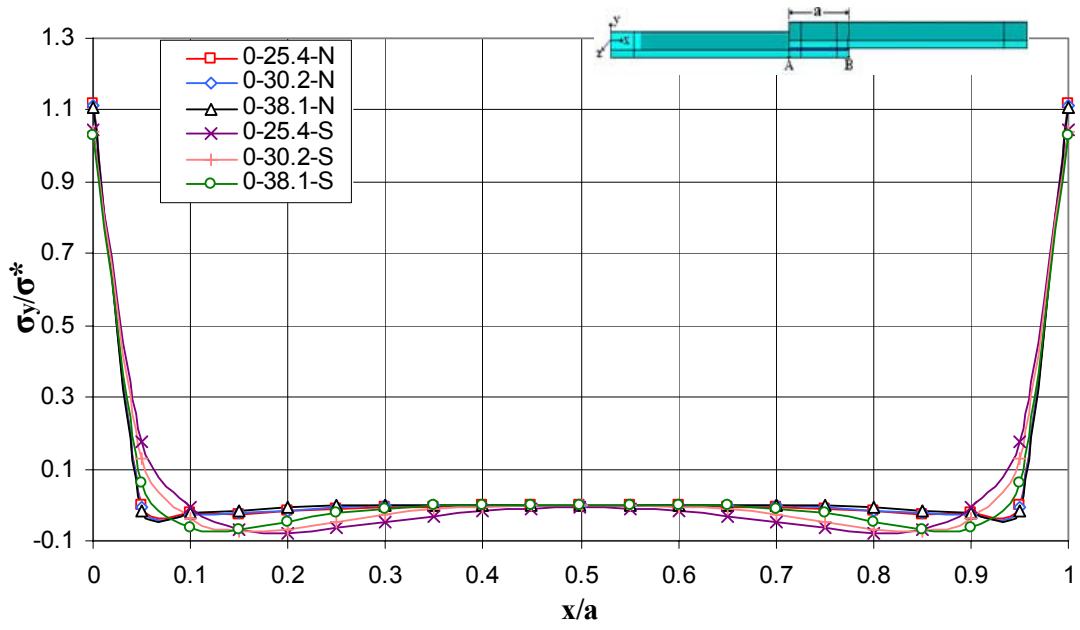
Şekil 6.6.d, 0° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan kayma gerilmelerinin üç bindirme uzunluğu için dağılımlarını göstermektedir. Kayma gerilmesi dağılımı Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda $0.1 \leq x/a \leq 0.9$ aralığında tüm bindirme uzunlukları için x-eksenine paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.1$ ve $0.9 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında pik değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen kayma gerilmesi dağılımları ise Neoxil CE92 N8 ile

birleştirilen bağlantılardan farklı olarak $0 \leq x/a \leq 0.4$ ve $0.6 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış eğilimi göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de pik değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçtan hareketle Neoxil CE92 N8 den daha yüksek şekil değiştirme kabiliyetine sahip olan SikaForce 7710'un bindirme bölgesinde meydana gelen kayma gerilmelerini bindirmenin uç kısımlarından orta kısımlarına transfer ettiği söylenebilir. Dolayısı ile bindirmenin orta bölgelerinde oluşan kayma gerilmeleri SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılardan yüksek iken bindirmenin uç kısımlarında ise her iki yapıştırıcı için değerler birbirine yakın olmakla birlikte bu durumun tersi söz konusudur.

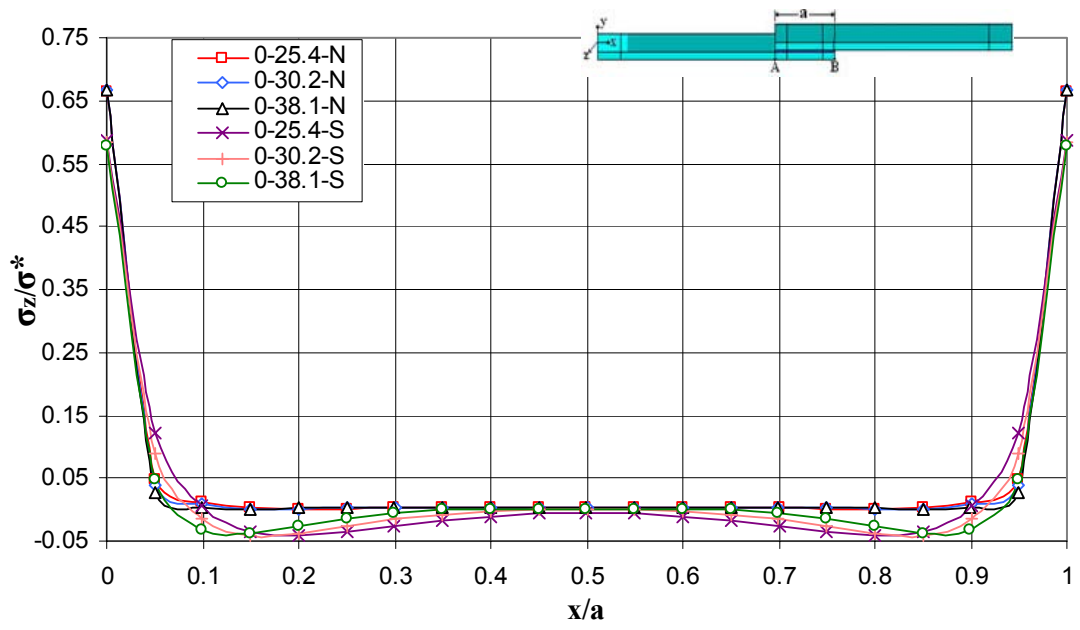
Şekil 6.6.e, 0° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan eşdeğer gerilmelerinin üç bindirme uzunluğu için dağılımlarını göstermektedir. Eşdeğer gerilme dağılımı, kayma gerilmesi dağılımına benzer şekilde Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda $0.2 \leq x/a \leq 0.8$ aralığında tüm bindirme uzunlukları için x-eksenine paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.2$ ve $0.8 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında pik değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen eşdeğer gerilme dağılımları ise Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılardan farklı olarak $0 \leq x/a \leq 0.4$ ve $0.6 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış eğilimi göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de pik değerlerine ulaşmıştır. Eşdeğer gerilmeler de kayma gerilmeleri gibi şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan SikaForce 7710 tarafından bindirmenin orta kısımlarına Neoxil CE92 N8 den daha fazla transfer edilmiştir. Her iki yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılarda oluşan eşdeğer gerilmelerin maksimum değerleri yaklaşık olarak eşittir.



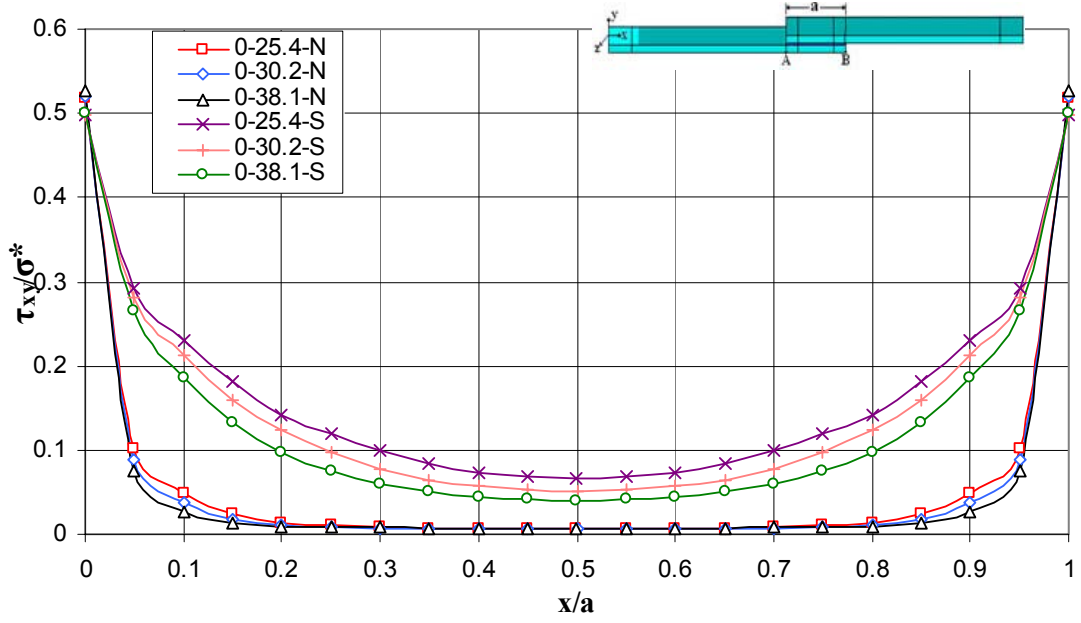
Şekil 6.6.a



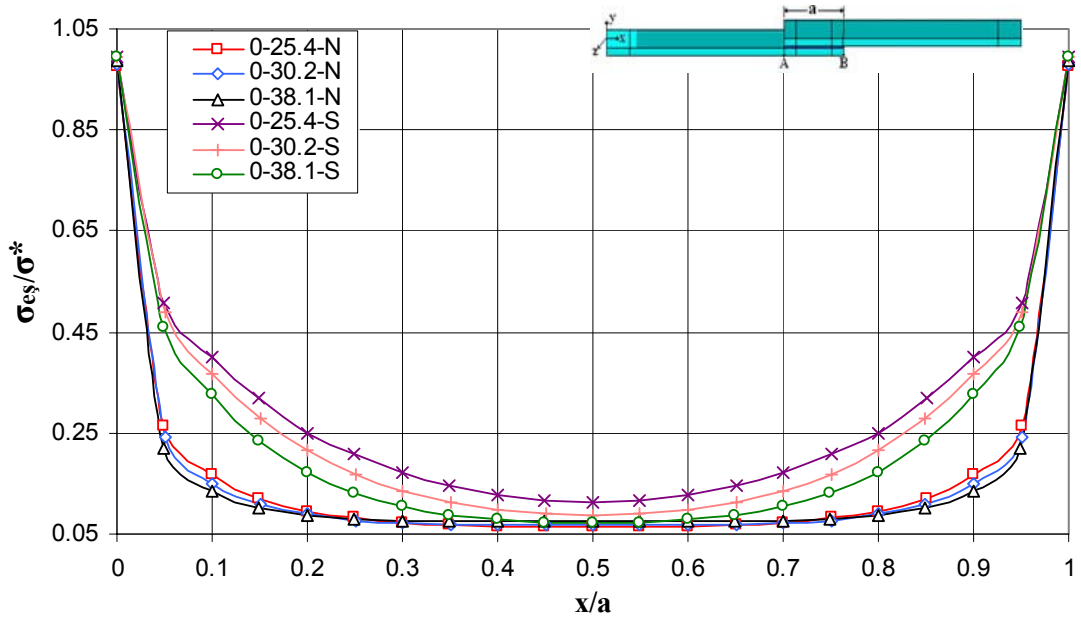
Şekil 6.6.b



Şekil 6.6.c



Şekil 6.6.d



Şekil 6.6.e

Şekil 6.6. 0° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları (N:Neoxil CE92 N8, S: SikaForce 7710).

Şekil 6.7, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 15° uç açısına sahip 25.4, 30.2 ve 38.1 mm bindirme uzunluğunda birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Bu grafikler incelenirse, Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda tüm gerilme dağılımlarının genel olarak $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında maksimum değerler aldığı, SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise gerilmelerin bindirme hattının orta kısımlarına doğru transfer edildiği görülmektedir.

Şekil 6.7.a, 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan normal gerilme dağılımını göstermektedir. Normal gerilme dağılımı Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda üç bindirme mesafesi içinde $0.2 \leq x/a \leq 0.8$ aralığında x-eksenine yaklaşık olarak paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.2$ ve $0.8 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710'ın kullanıldığı birleştirmelerde ise normal gerilmelerin pik değerleri neoxil ile birleştirilenlerde olduğu gibi $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerlerine ulaşmış fakat neoxil ile birleştirilenlerden farklı olarak $A' - B'$ hattı boyunca A' ve B' noktalarından başlayarak $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de oluşan gerilmelerin tersi yönde bir dağılım meydana gelmiştir. Tüm bindirme mesafesi için bindirme hattının tamamında Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda oluşan normal gerilme değerleri SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarından daha yüksektir. Örneğin 25.4mm bindirme mesafesi için Neoxil ile birleştirilmiş bağlantıda meydana gelen normal gerilme oranı 0.55 iken SikaForce ile birleştirilmiş bağlantıda aynı bindirme mesafesi için normal gerilme oranı 0.2'dir. Oranlar karşılaştırıldığında 25.4 mm bindirme mesafesi için normal gerilme oranları arasında 2.75 katlık bir farkın olduğu ortaya çıkmaktadır. Fakat bu fark bindirme mesafelerinin artmasıyla azalmakta 29.4 mm ve 38.1 mm bindirme mesafeleri için sırasıyla 1.8 ve 1.65 katlık bir farka düşmektedir.

Şekil 6.7.b, 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan soyulma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Soyulma gerilmesi dağılımı Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda $0.05 \leq x/a \leq 0.95$ aralığında tüm bindirme uzunlukları için x-eksenine paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.05$ ve $0.95 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında maksimum değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise soyulma gerilmesi dağılımları $0 \leq x/a \leq 0.1$ ve $0.9 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış eğilimi göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de pik değerlerine ulaşmıştır. $x/a = 0$ ve

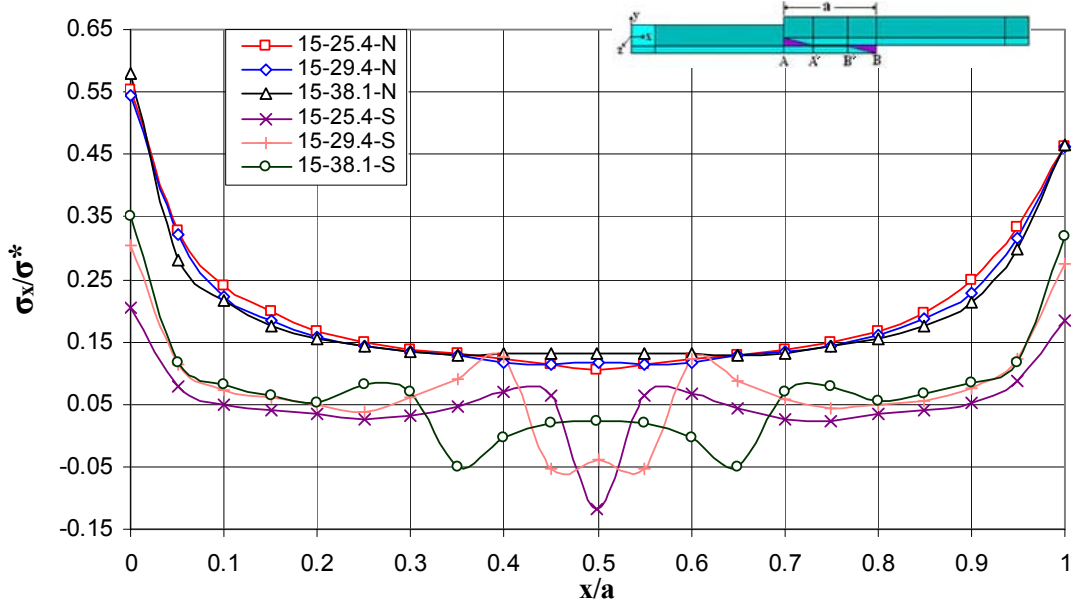
$x/a = 1$ 'de oluşan maksimum gerilme değerleri SikaForce 7710 ile birleştirilmiş bağlantılarda Neoxil CE92 N8'e göre daha yüksektir.

Şekil 6.7.c, 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan z-ekseni yönündeki gerilme dağılımını göstermektedir. Gerilme dağılımı olarak Şekil 6.7.b, deki soyulma gerilmeleri ile hemen hemen aynı karakteristiği sergilerken gerilmelerin maksimum değerleri soyulma gerilmelerinin yaklaşık olarak yarısı kadardır.

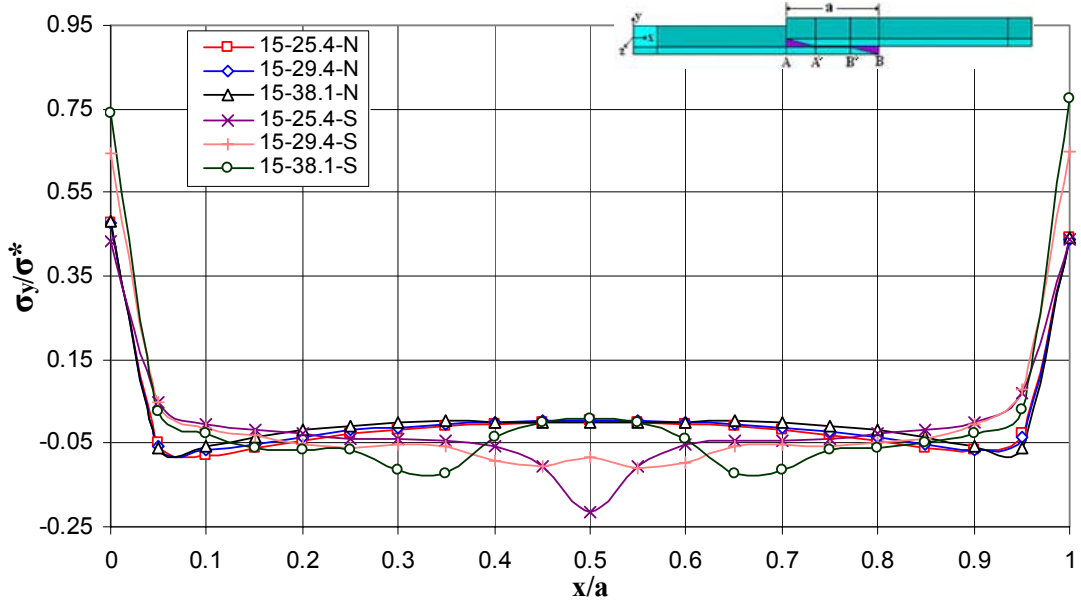
Şekil 6.7.d, 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan kayma gerilmelerinin üç bindirme uzunluğu için dağılımlarını göstermektedir. Kayma gerilmesi dağılımı Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda $0.2 \leq x/a \leq 0.8$ aralığında tüm bindirme uzunlukları için x-eksenine yaklaşık olarak paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.2$ ve $0.8 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerlerine ulaşmıştır. $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'deki değerler incelendiğinde gerilme değerleri birbirine yakın olmasına rağmen $x/a = 1$ 'de meydana gelen kayma gerilmesi değerleri her üç bindirme mesafesi içinde $x/a = 0$ 'da meydana gelen kayma gerilmelerinden daha yüksektir. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen kayma gerilmesi dağılımları ise Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen gerilme dağılımından tamamen farklı bir karakteristik göstermektedir. Bu yapıştırıcı tipi ile birleştirilen bağlantılarda gerilmelerin pik değerleri $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'den bindirme bölgesinin içlerine doğru hafif bir düşüş sergilemiş daha sonra tekrardan yükselerek bağlantıların A' ve B' noktalarında pik değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen kayma gerilmesi oranları her üç bindirme mesafesi içinde Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen gerilme oranlarından daha yüksektir. 25.4 mm bindirme mesafesinde Neoxil ile birleştirilmiş numunede gerilme oranının pik değeri 0.45 iken aynı bindirme mesafesinde SikaForce ile birleştirilmiş numunede oluşan gerilme oranı pik değeri yaklaşık olarak 0.54'tür. Yani 25.4 mm bindirme mesafesinde SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş bağlantıda oluşan kayma gerilmesi oranları Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş numunedekinden yaklaşık olarak 1.2 kat, 29.4 mm ve 38.1 mm bindirme mesafesi için ise sırasıyla 1.1 ve 0.96 kat artmıştır.

Şekil 6.7.e, 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan eşdeğer gerilmelerinin üç bindirme uzunluğu için dağılımlarını göstermektedir. Eşdeğer gerilme dağılımı, kayma gerilmesi dağılımına benzer şekilde Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda $0.4 \leq x/a \leq 0.6$ aralığında tüm bindirme uzunlukları için x-eksenine yaklaşık olarak paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.4$ ve

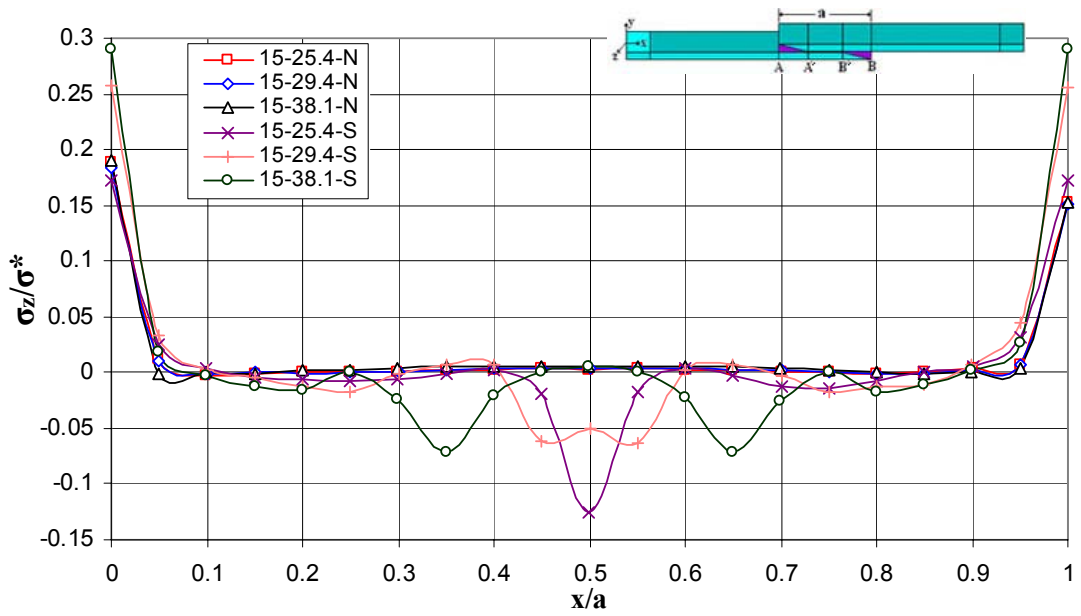
$0.6 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de yani bindirme uçlarında pik değerlerine ulaşmıştır. $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'deki değerler incelendiğinde gerilme değerleri birbirine yakın olmasına rağmen $x/a = 1$ 'de meydana gelen kayma gerilmesi değerleri her üç bindirme mesafesi içinde $x/a = 0$ 'da meydana gelen eşdeğer gerilmelerinden daha yüksektir. SikaForce 7710 ile birleştirilen numunelerde meydana gelen eşdeğer gerilme dağılımları kayma gerilmeleri dağılımına benzer olarak $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'den bindirme bölgesinin içlerine doğru bir düşüş sergilemiş daha sonra tekrardan yükselerek bağlantıların A' ve B' noktalarında maksimum değerlerine çıkmıştır. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen eşdeğer gerilme oranları her üç bindirme mesafesi içinde Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda meydana gelen gerilme oranlarından daha yüksektir. 25.4 mm bindirme mesafesinde Neoxil ile birleştirilmiş numunede gerilme oranının pik değeri 0.84 iken aynı bindirme mesafesinde SikaForce ile birleştirilmiş numunede oluşan gerilme oranı pik değeri yaklaşık olarak 0.93'tür. Yani 25.4 mm bindirme mesafesinde SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş bağlantıda oluşan kayma gerilmesi oranları Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş numunedekinden yaklaşık olarak 1.1 kat, 29.4 mm ve 38.1 mm bindirme mesafesi için ise sırasıyla 1.04 ve 0.83 kat artmıştır.



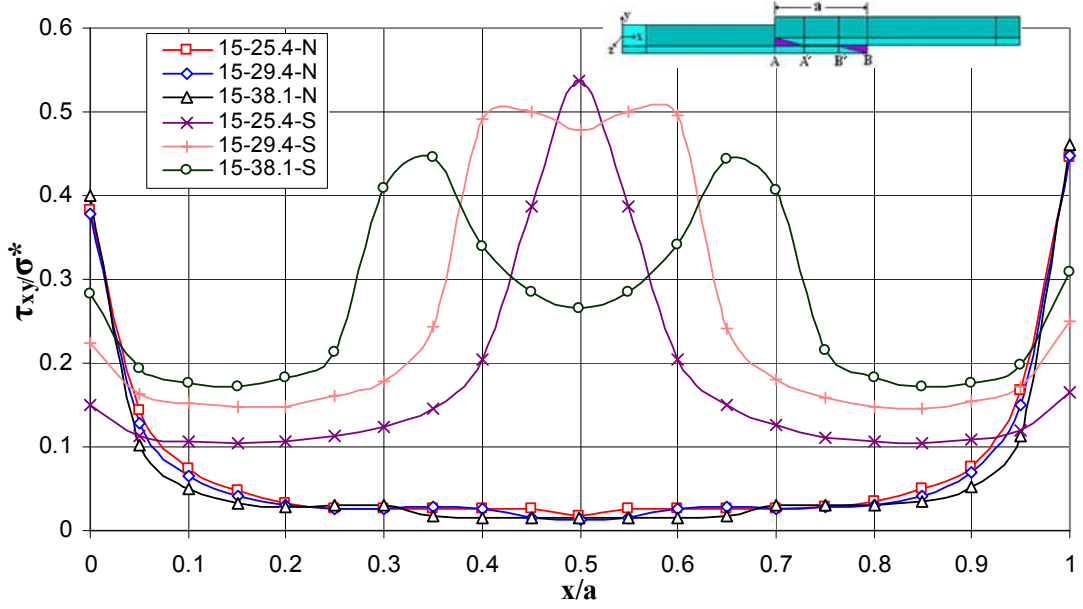
Şekil 6.7.a



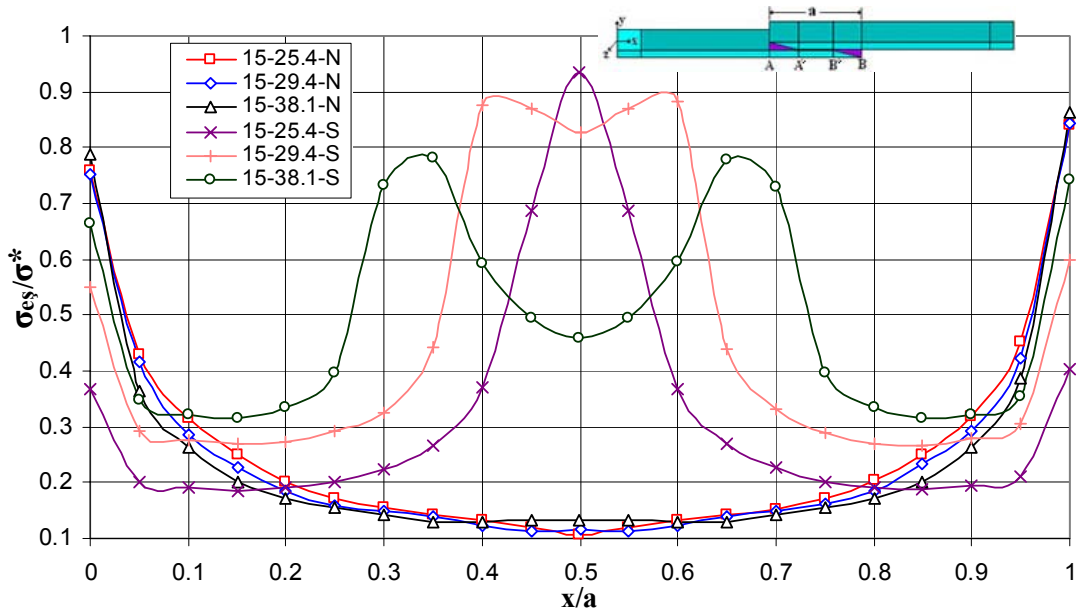
Şekil 6.7.b



Şekil 6.7.c



Şekil 6.7.d



Şekil 6.7.e

Şekil 6.7. 15° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları (N:Neoxil CE92 N8, S: SikaForce 7710).

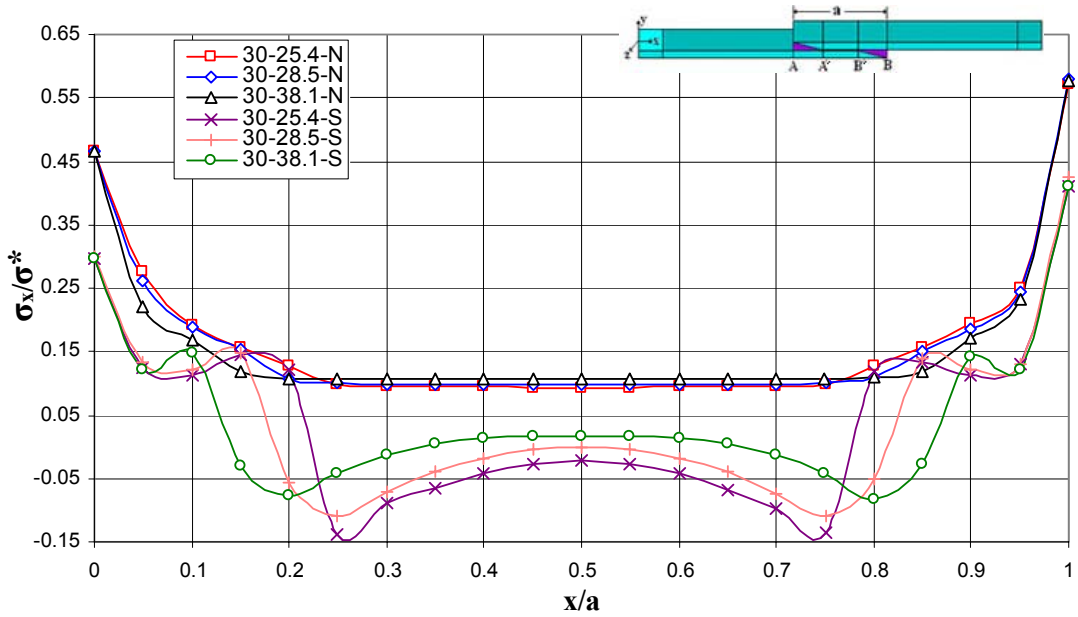
Şekil 6.8, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 30° uç açısına sahip 25.4, 30.2 ve 38.1 mm bindirme uzunluğunda birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. 15° de olduğu gibi, Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda tüm gerilme dağılımlarının $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerler aldığı, SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise gerilmelerin bindirme hattının orta kısımlarına doğru transfer edildiği normal gerilme, soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeninin pik değerlerinin $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de kayma ve eşdeğer gerilmelerin pik değerlerinin ise A' ve B' noktalarında meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 6.8.a, 30° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan normal gerilme dağılımını göstermektedir. Normal gerilme dağılımı Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda üç bindirme mesafesi içinde 15° de olduğu gibi $0.2 \leq x/a \leq 0.8$ aralığında x-eksenine yaklaşık olarak paralel bir karakter sergilerken $0 \leq x/a \leq 0.2$ ve $0.8 \leq x/a \leq 1$ aralığında artış göstermiş ve $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerlerine ulaşmıştır. SikaForce 7710'ın kullanıldığı birleştirmelerde ise normal gerilmelerin pik değerleri neoxil ile birleştirilenlerde olduğu gibi $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerlerine ulaşmış fakat neoxil ile birleştirilenlerden farklı olarak $A' - B'$ hattı boyunca A' ve B' noktalarından başlayarak $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de oluşan gerilmelerin tersi yönde bir dağılım meydana gelmiştir. Tüm bindirme mesafesi için bindirme hattının tamamında Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda oluşan normal gerilme değerleri SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarınkinden daha yüksektir. Örneğin 25.4 mm bindirme mesafesi için Neoxil ile birleştirilmiş bağlantıda meydana gelen normal gerilme oranı 0.57 iken SikaForce ile birleştirilmiş bağlantıda aynı bindirme mesafesi için normal gerilme oranı 0.41'dir. Oranlar karşılaştırıldığında 25.4 mm bindirme mesafesi için normal gerilme oranları arasında 1.39 katlık bir farkın olduğu ortaya çıkmaktadır. Fakat bu fark 28.5 mm ve 38.1 mm bindirme mesafeleri için ise sırasıyla 1.367 ve 1.398 katlık bir artış olarak ortaya çıkmıştır.

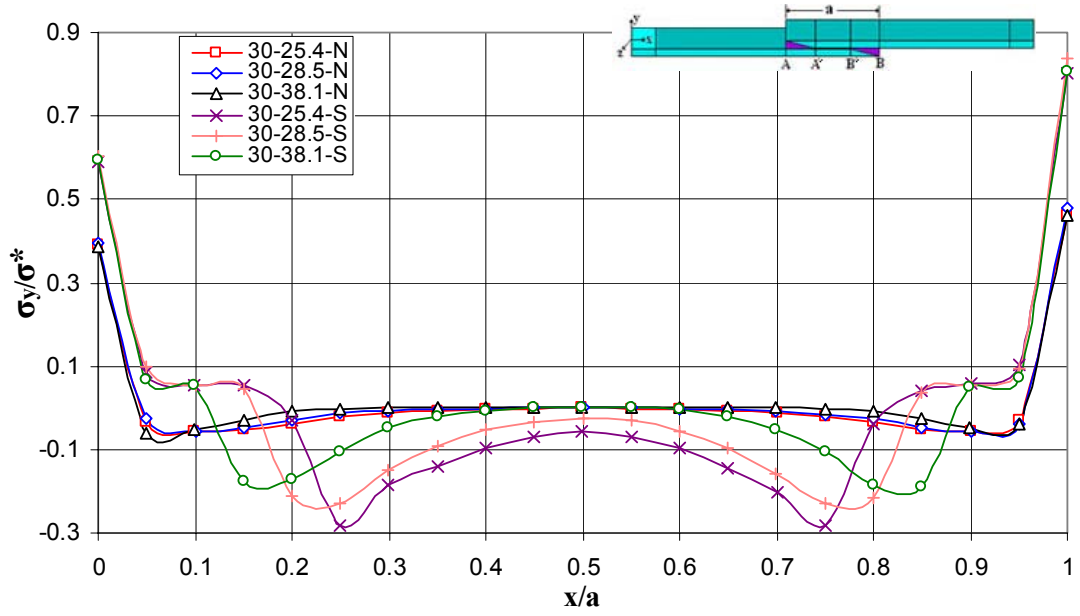
Şekil 6.8.b ve Şekil 6.8.c sırasıyla, 30° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan soyulma gerilmesi ve z-ekseni yönündeki gerilme dağılımını göstermektedir. Soyulma gerilmesi ve z-ekseni yönündeki gerilme dağılımları 15° uç açısına sahip numunelerde meydana gelen gerilme dağılımına (Şekil 6.7.b ve Şekil 6.7.c) benzer şekildedir. SikaForce 7710 ile birleştirilen numunelerde meydana gelen gerilme oranları Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarınkinden soyulma gerilmesi için yaklaşık 1.75, z-ekseni boyunca meydana gelen gerilmelerde ise yaklaşık 1.42 kat daha yüksektir. Bindirme mesafesinin değişimiyle soyulma ve z-ekseni boyunca oluşan gerilmelerin maksimum değerleri, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce

7710 ile birleştirilen numunelerde hemen hemen eşit iken A' ve B' hattındaki gerilme dağılımları ise Neoxil CE92 N8 için değişmezken, SikaForce 7710 ile birleştirilen numunelerde bindirme mesafesi arttıkça azalmaktadır.

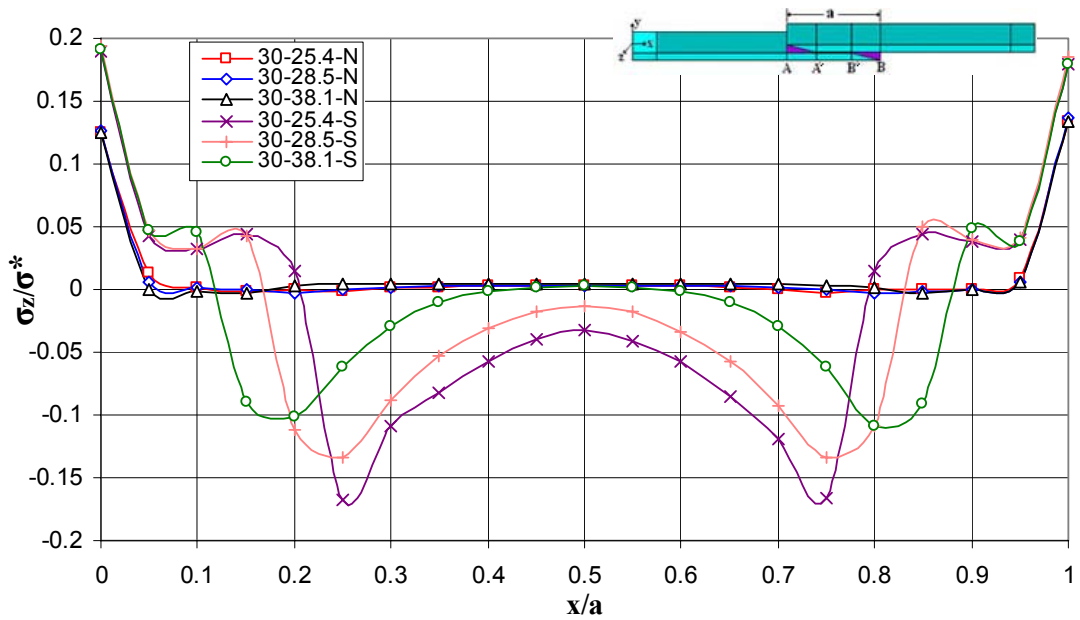
Şekil 6.8.d. ve Şekil 6.8.e. sırasıyla 30° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısında her iki yapıştırıcı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan kayma gerilmesi ve eşdeğer gerilme dağılımını göstermektedir. Kayma gerilmesi ve eşdeğer gerilme dağılımı incelendiğinde Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda gerilme oranlarını pik değerleri her üç bindirme mesafesi için de genel olarak $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de meydana gelirken bindirmenin orta kısımlarında bu değerler sıfıra yaklaşmış ve x-eksenine paralel bir karakter göstermiştir. B noktasında ($x/a = 1$) ortaya çıkan gerilme oranı A noktasına göre ($x/a = 0$) daha yüksektir. SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise gerilme oranlarının (τ_{xy}/σ ve $\sigma_{eş}/\sigma$) pik değerleri bağlantının A' ve B' noktalarında meydana gelmiştir.



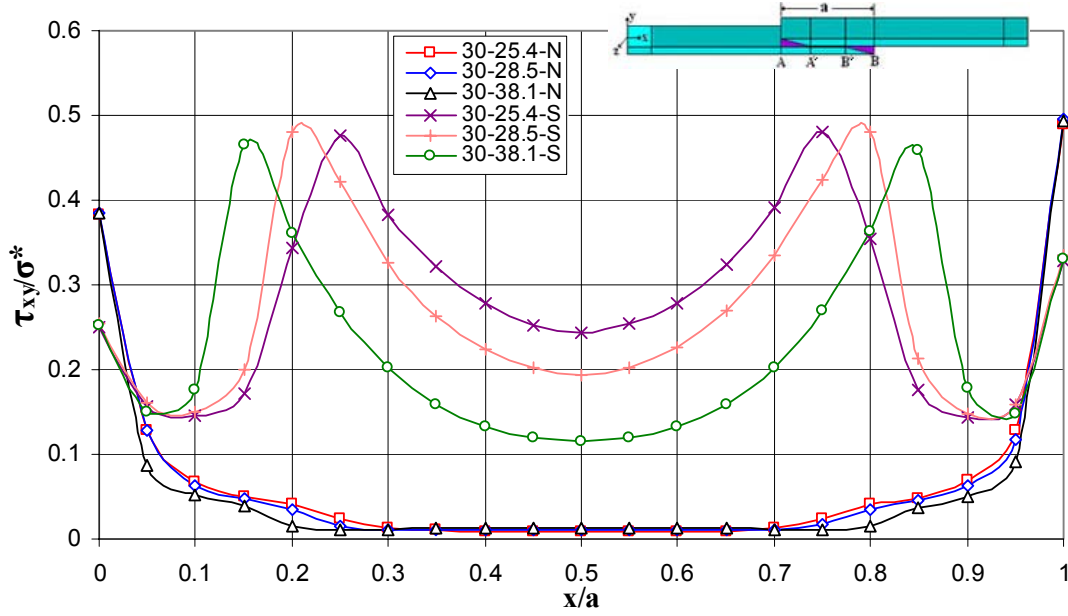
Şekil 6.8.a



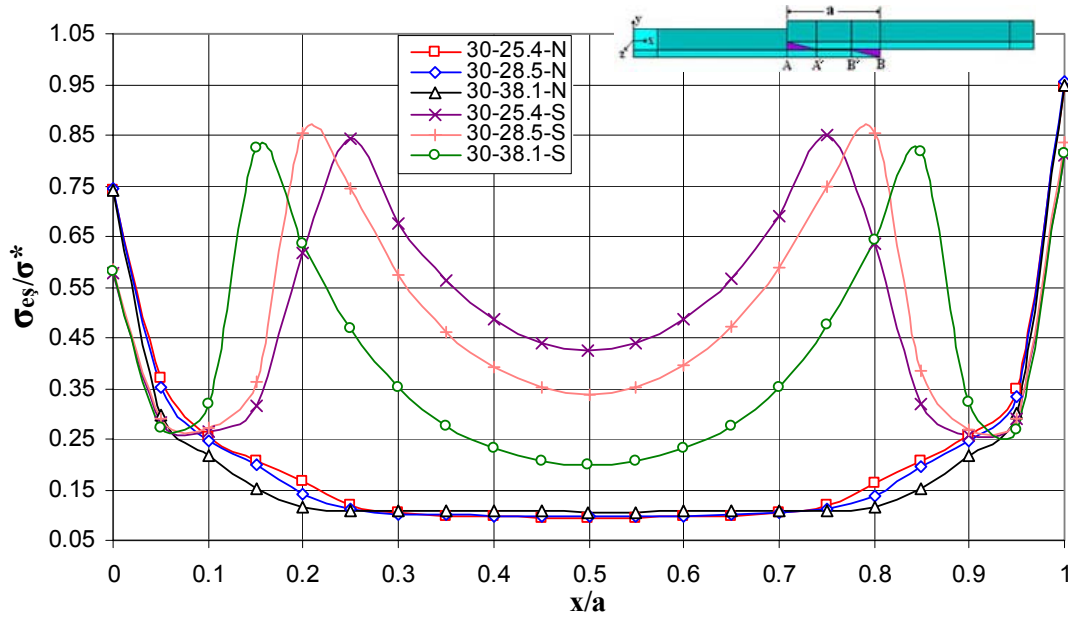
Şekil 6.8.b



Şekil 6.8.c



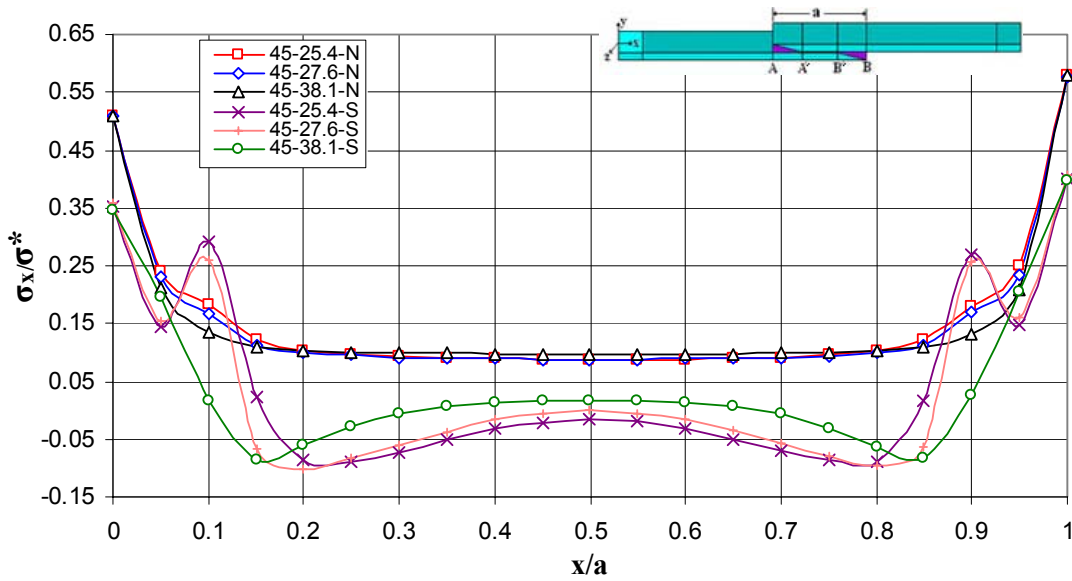
Şekil 6.8.d



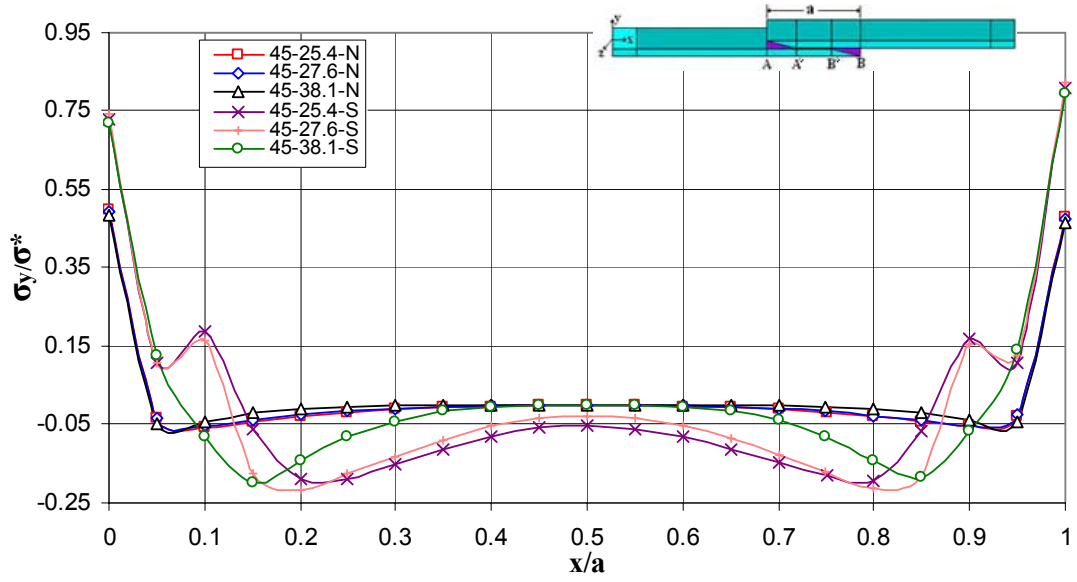
Şekil 6.8.e

Şekil 6.8. 30° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları (N:Neoxil CE92 N8, S: SikaForce 7710).

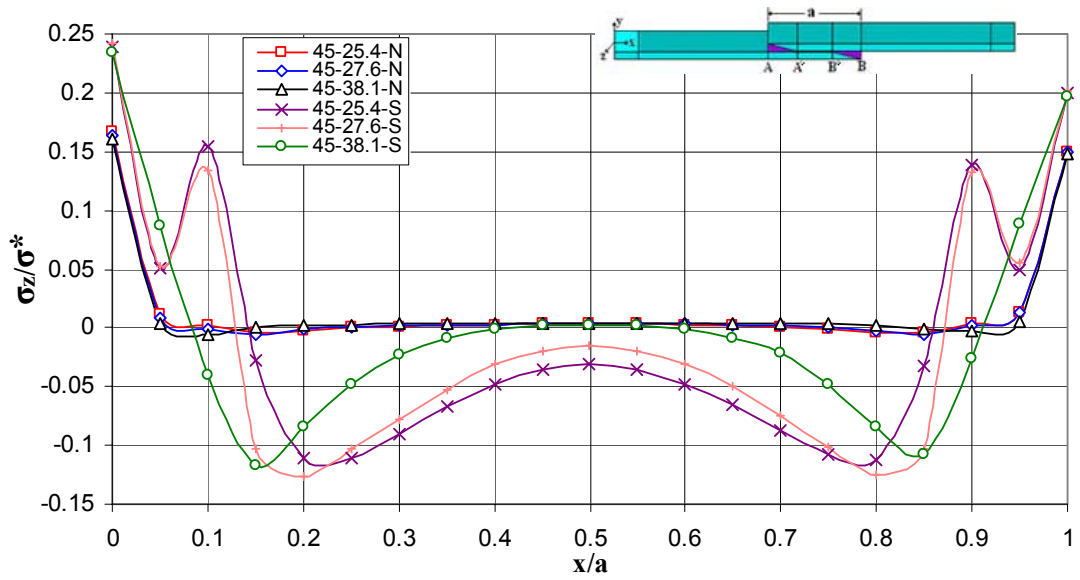
Şekil 6.9, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 45° uç açısına sahip 25.4, 27.6 ve 38.1 mm bindirme uzunluğunda birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda tüm gerilme dağılımlarının (σ_x/σ , σ_y/σ , σ_z/σ , τ_{xy}/σ ve $\sigma_{eş}/\sigma$) $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerler aldığı, SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise gerilmelerin bindirme hattının orta kısımlarına doğru transfer edildiği normal gerilme, soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeninin (σ_x/σ , σ_y/σ , σ_z/σ) pik değerlerinin $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de kayma ve eşdeğer gerilmelerin (τ_{xy}/σ ve $\sigma_{eş}/\sigma$) pik değerlerinin ise A' ve B' noktalarında meydana geldiği görülmektedir. Bindirme mesafesi değişimiyle Neoxil ve SikaForce ile birleştirilmiş bağlantıların her ikisi için de gerilme oranları bileşenlerinin maksimum değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



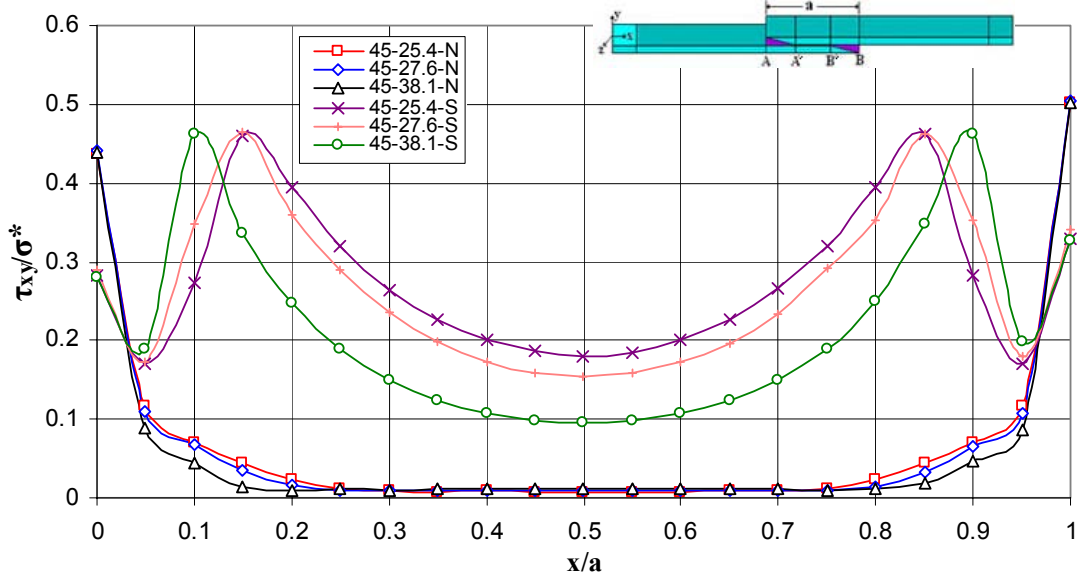
Şekil 6.9.a



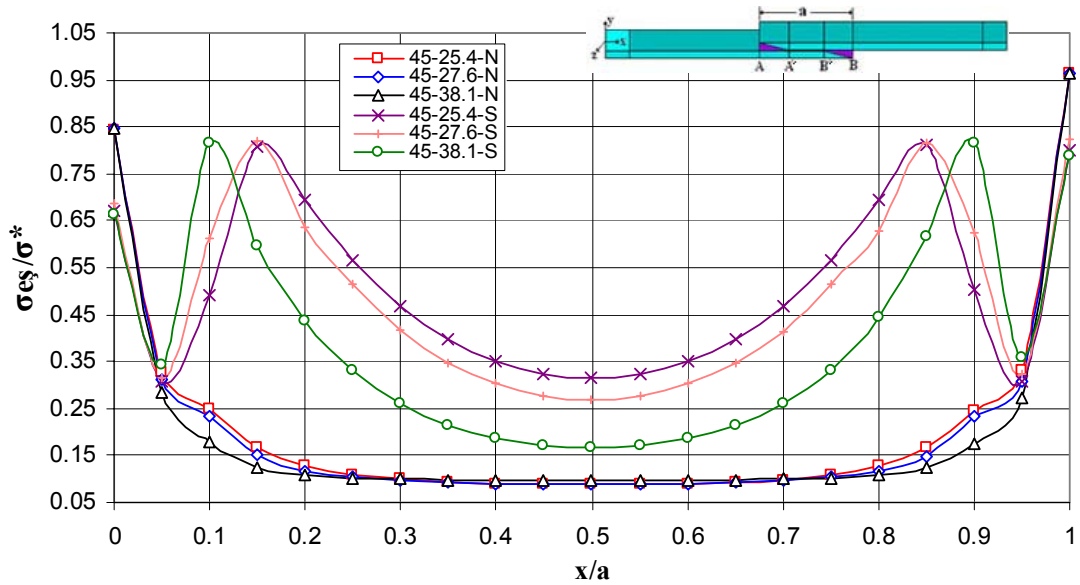
Şekil 6.9.b



Şekil 6.9.c



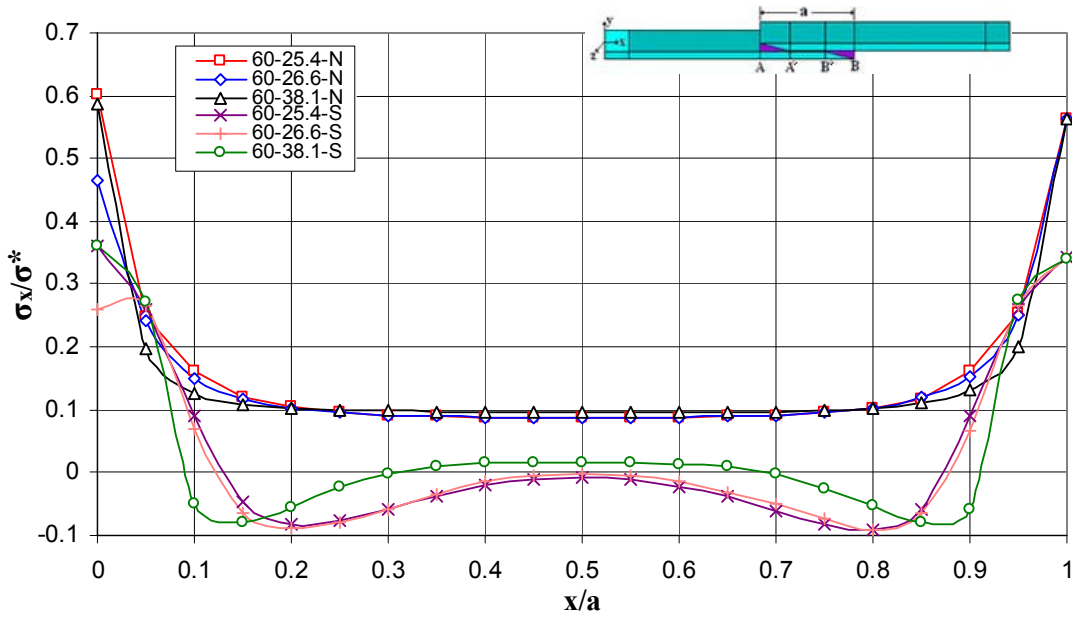
Şekil 6.9.d



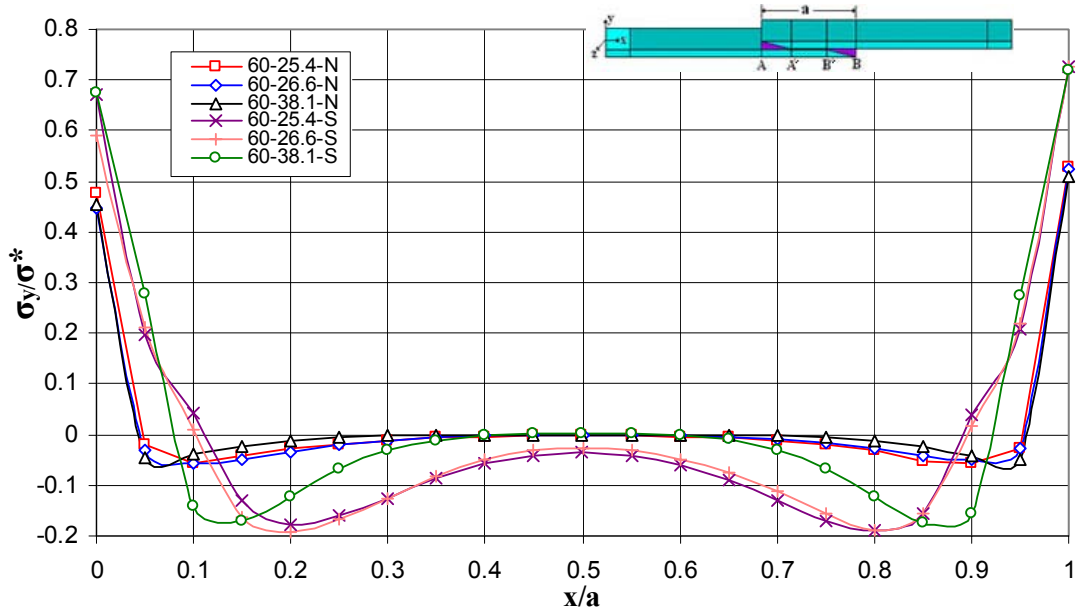
Şekil 6.9.e

Şekil 6.9. 45° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları (N: Neoxil CE92 N8, S: SikaForce 7710).

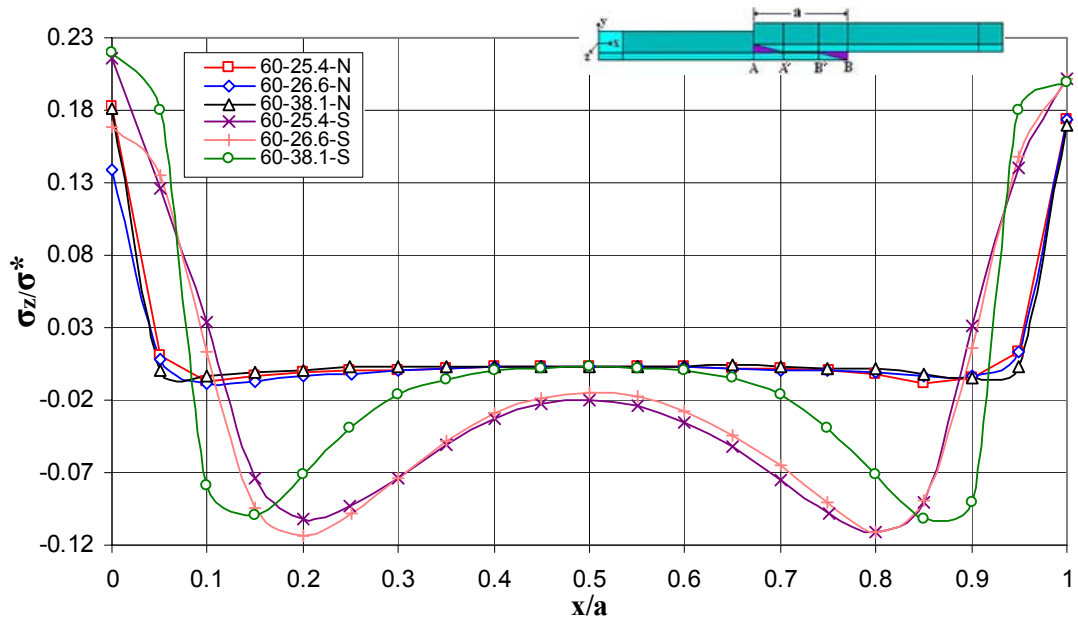
Şekil 6.10, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 60° uç açısına sahip 25.4, 26.6 ve 38.1 mm bindirme uzunluğunda birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda tüm gerilme dağılımlarının 15° , 30° ve 45° de olduğu gibi $(\sigma_x/\sigma, \sigma_y/\sigma, \sigma_z/\sigma, \tau_{xy}/\sigma$ ve $\sigma_{\phi}/\sigma)$ $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerler aldığı ve çeki gerilmesi şeklinde olduğu, SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise gerilmelerin bindirme hattının orta kısımlarına doğru transfer edildiği normal gerilme, soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeninin $(\sigma_x/\sigma, \sigma_y/\sigma, \sigma_z/\sigma)$ pik değerlerinin $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de ve çeki gerilmesi şeklinde, A' ve B' noktalarında meydana gelen gerilmelerin ise bası gerilmesi şeklinde olduğu görülmüştür. Kayma ve eşdeğer gerilmelerin $(\tau_{xy}/\sigma$ ve $\sigma_{\phi}/\sigma)$ pik değerlerinin ise A' ve B' noktalarında meydana geldiği ve tüm bindirme uzunluğu boyunca çeki gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir. Bindirme mesafesi değişimiyle Neoxil ve SikaForce ile birleştirilmiş bağlantıların her ikisi için de gerilme oranları bileşenlerinin maksimum değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



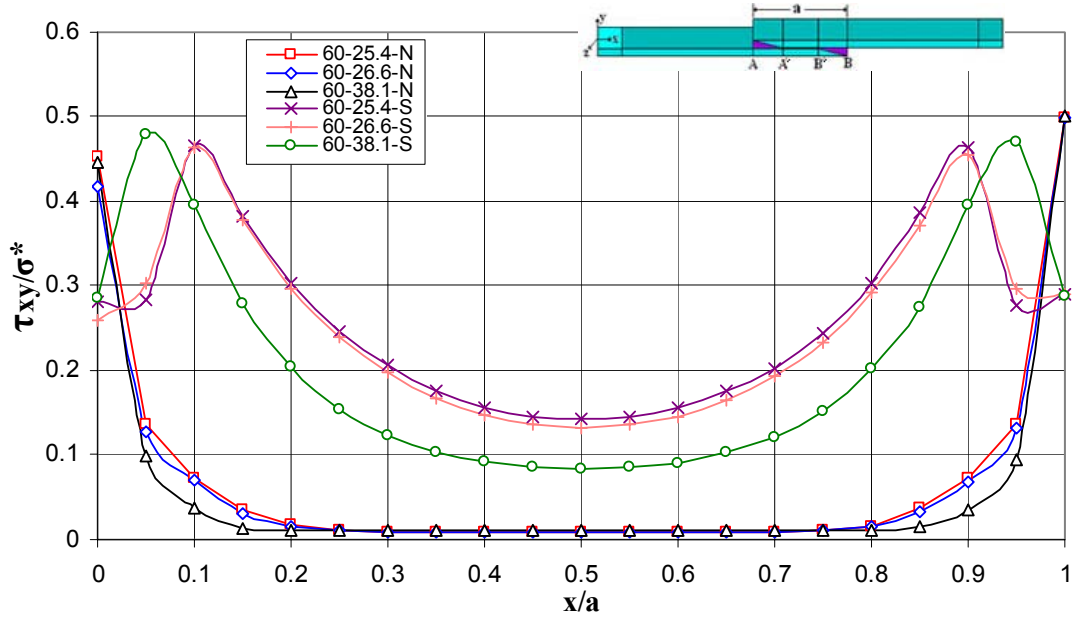
Şekil 6.10.a



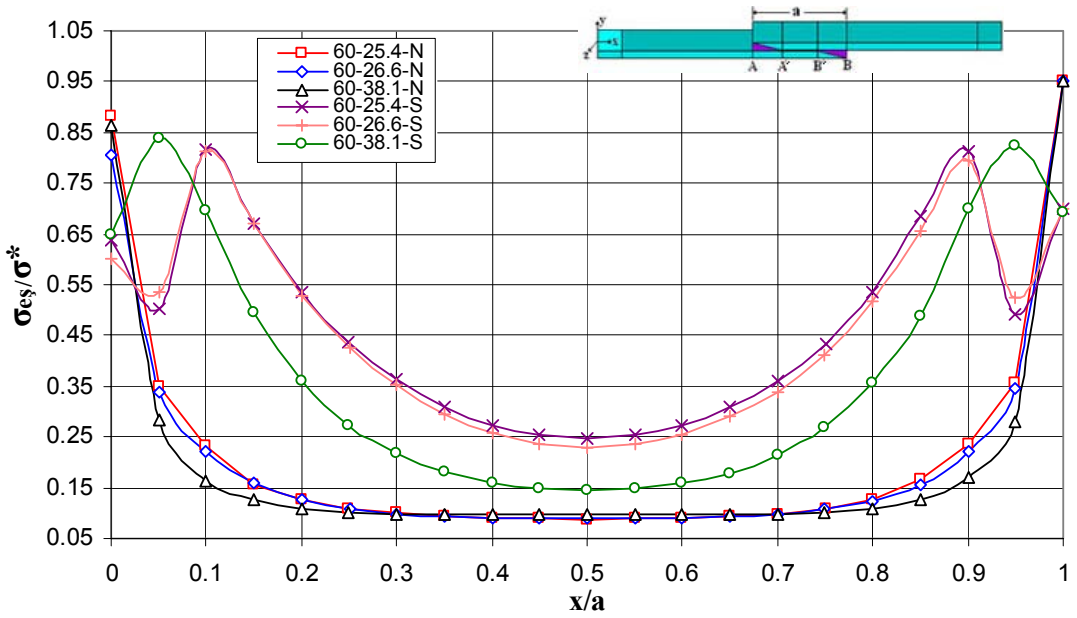
Şekil 6.10.b



Şekil 6.10.c



Şekil 6.10.d

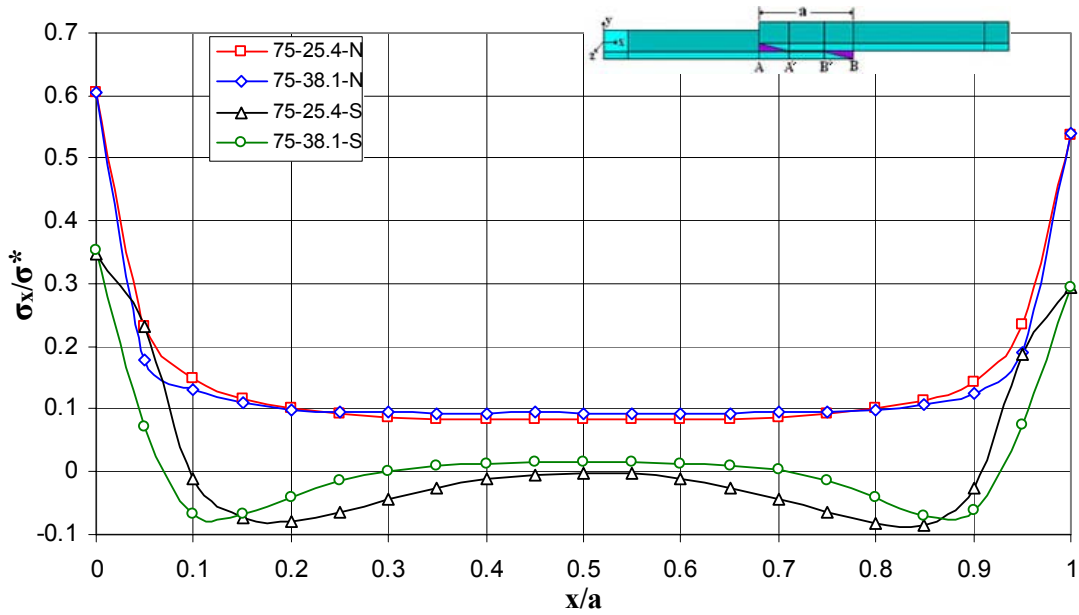


Şekil 6.10.e

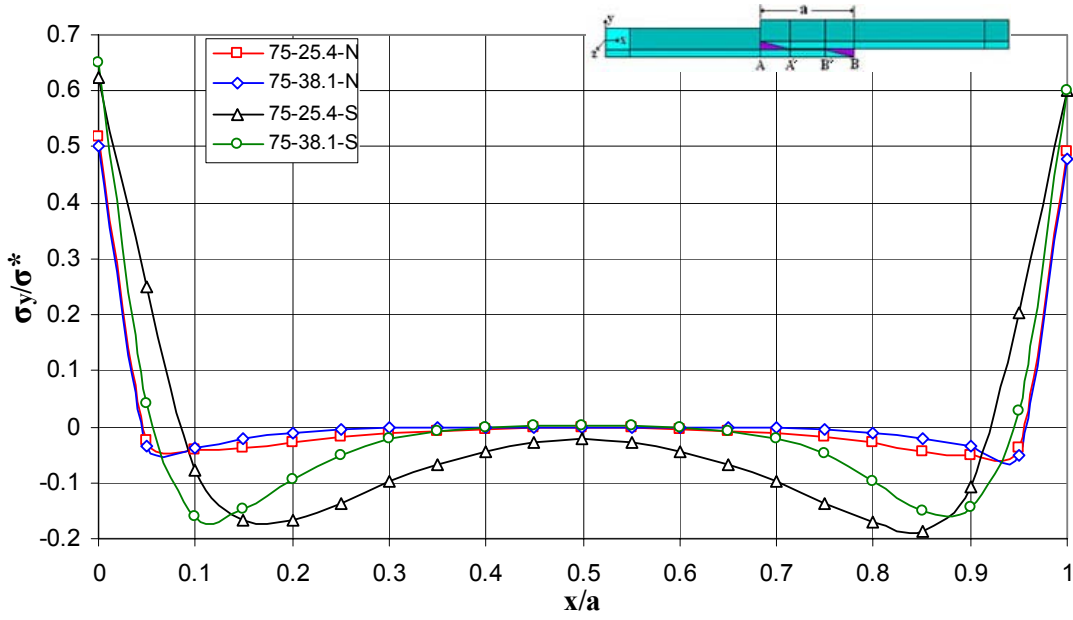
Şekil 6.10. 60° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları (N:Neoxil CE92 N8, S: SikaForce 7710).

Şekil 6.11, Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 75° uç açısına sahip 25.4, ve 38.1 mm bindirme uzunluğunda birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılarda tüm gerilme dağılımlarının 15° , 30° , 45° ve 60° de olduğu gibi $(\sigma_x/\sigma, \sigma_y/\sigma, \sigma_z/\sigma, \tau_{xy}/\sigma$ ve $\sigma_{\phi}/\sigma)$ $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de maksimum değerler aldığı ve çeki gerilmesi şeklinde meydana geldiği, SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantılarda ise gerilmelerin bindirme hattının orta kısımlarına doğru transfer edildiği normal gerilme, soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeninin $(\sigma_x/\sigma, \sigma_y/\sigma, \sigma_z/\sigma)$ pik değerlerinin $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de ve çeki gerilmesi şeklinde, A' ve B' noktalarında meydana gelen gerilmelerin ise bası gerilmesi şeklinde olduğu görülmüştür. Kayma ve eşdeğer gerilmelerin $(\tau_{xy}/\sigma$ ve $\sigma_{\phi}/\sigma)$ pik değerlerinin ise A' ve B' noktalarında meydana geldiği ve tüm bindirme uzunluğu boyunca çeki gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir. Bindirme mesafesi değişimiyle gerilme oranlarındaki değişimin, Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş bağlantılar için birbirine çok yakın çıkmakla birlikte düşük bindirme mesafesine sahip olan numunede meydana gelen soyulma gerilmesinin, yüksek bindirme mesafesine sahip olan numuneden yüksek olduğu görülmüştür. Kayma ve eşdeğer gerilme oranları için ise tersi durum söz konusudur (Şekil 6.11.b, Şekil 6.11.d ve Şekil 6.11.e).

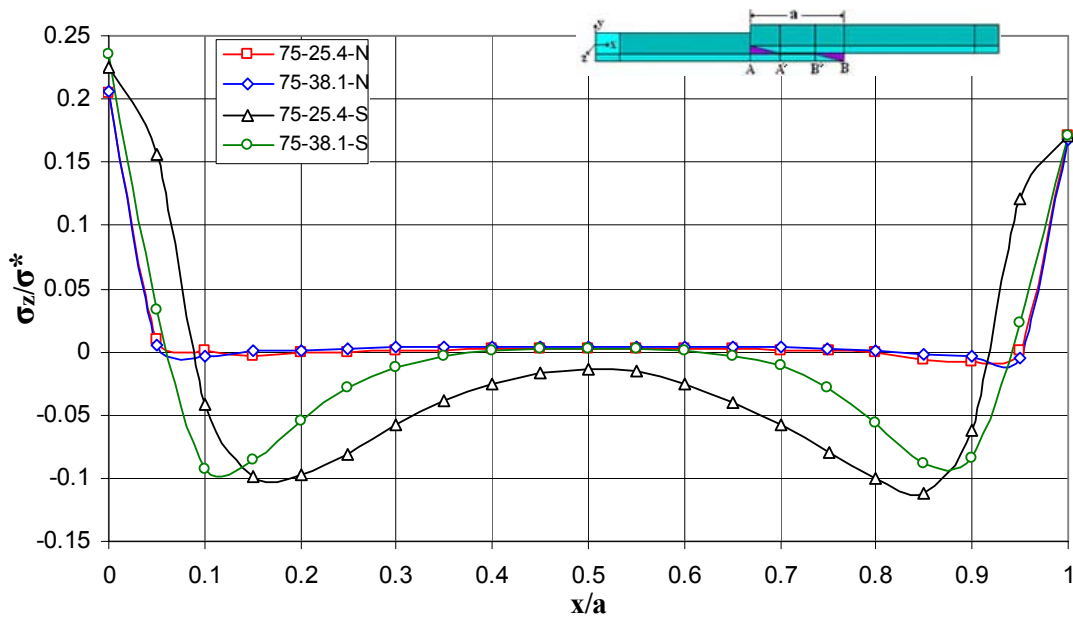
SikaForce ile birleştirilen numunelerde ise 38.1 mm de oluşan soyulma gerilmesi 25.4 mm oluşan soyulma gerilmesinden yüksek kayma ve eşdeğer gerilme oranlarında ise 38.1 mm de oluşan oranlar 25.4 mm de oluşan gerilme oranlarından daha düşüktür.



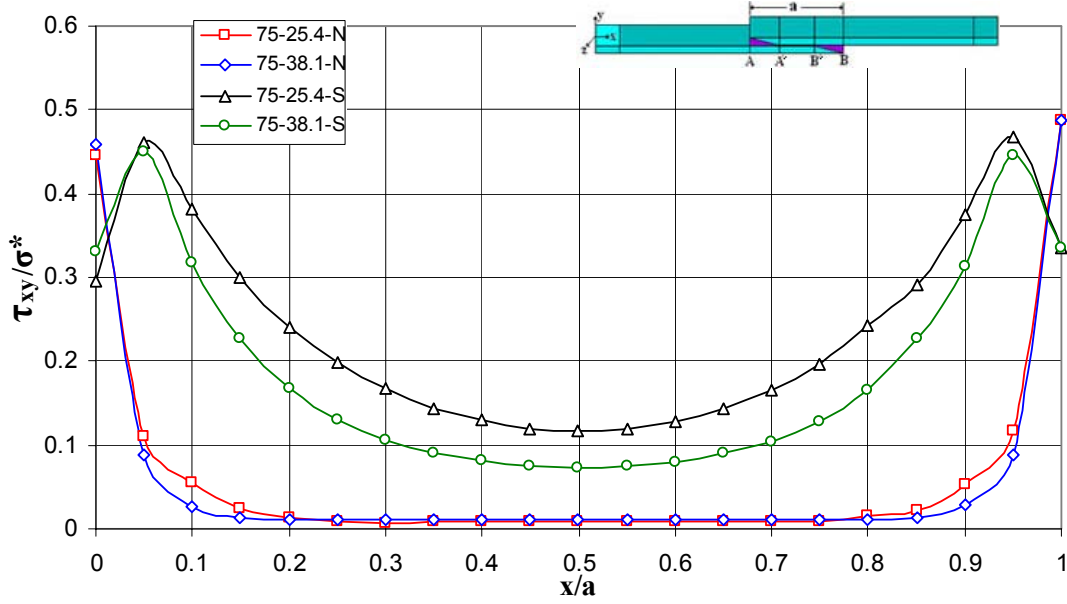
Şekil 6.11.a



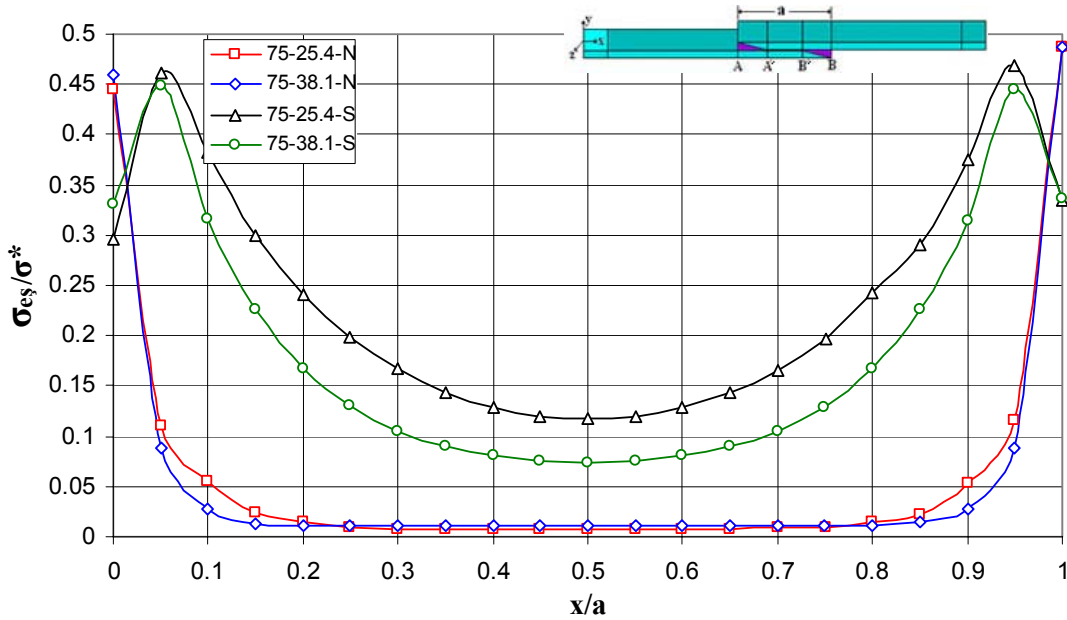
Şekil 6.11.b



Şekil 6.11.c



Şekil 6.11.d



Şekil 6.11.e

Şekil 6.11. 75° uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları (N:Neoxil CE92 N8, S: SikaForce 7710).

6.4.2. Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

6.4.2.1. Neoxil CE92 N8 ile Birleştirilmiş 25.4 mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

Şekil 6.12, 25.4 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° olmak üzere toplam 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Sadece uç açısının etkisini gözlemleyebilmek için, açı dışında kalan tüm değişkenler sabit alınmıştır. Şekil 6.12'nin tamamı genel olarak incelendiğinde bindirme mesafesinin değişken olarak alındığı çalışmalarda da olduğu gibi tüm açı değerlerinde gerilme oranlarının maksimum değerlerinin $x/a = 0$ ve $x/a = 1$ 'de meydana geldiği görülmektedir.

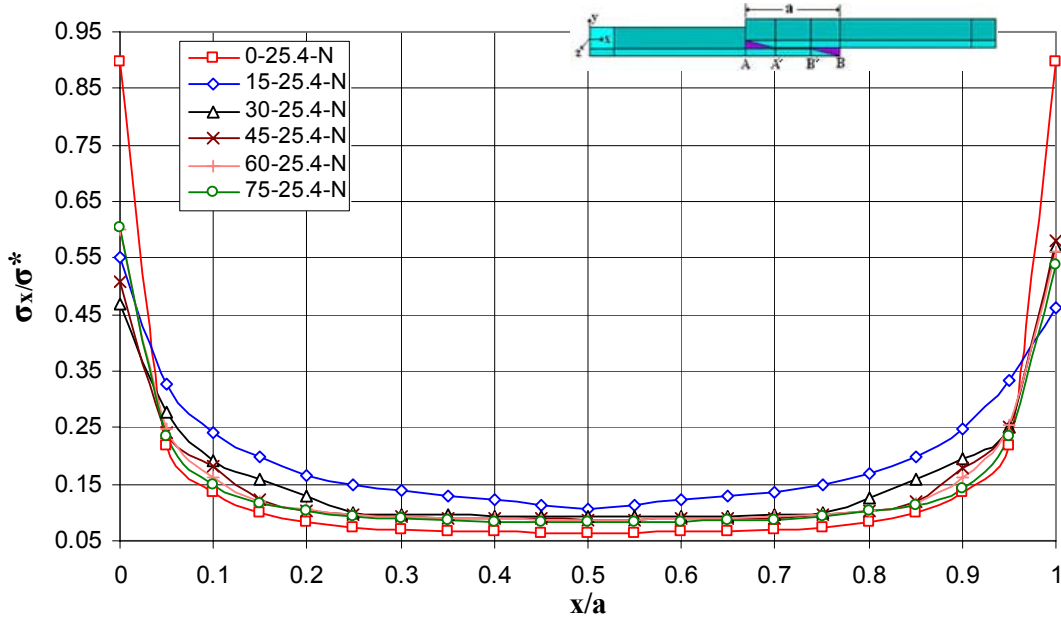
Şekil 6.12.a, 25.4 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan normal gerilme dağılımlarını göstermektedir. Normal gerilme değerinin maksimum değeri 0° meydana gelirken normal gerilmenin minimum değeri 15° den meydana gelmiştir. 15° den 90° (0°) ye kadar ise normal gerilme değerlerinde artış olmuştur. Bunun yanında bindirme bölgesinin iç kısımları dikkate alındığında özellikle $0.1 \leq x/a \leq 0.9$ aralığında gerilme değerlerinin 15° de diğer açı değerlerine göre daha yüksek olduğu dikkati çekmektedir.

Şekil 6.12.b, aynı bağlantı tipi için A-B hattı boyunca meydana gelen soyulma gerilmesi dağılımını Şekil 6.12.c. ise z-eksenine paralel olarak alınan gerilme bileşeni dağılımını göstermektedir. Bindirme mesafesi boyunca her iki gerilme bileşeninin dağılımı aynı karakteristiği göstermektedir. Soyulma gerilmesinin maksimum değeri 0° de meydana gelmekte ve kendisine en yakın gerilme değerini veren 75° deki değerden yaklaşık olarak 2.153 kat daha yüksek olarak ortaya çıkmaktadır. Bindirme bölgesinin $0.2 \leq x/a \leq 0.8$ aralığında uç açısının etkisi olmamış ve gerilme değerleri birbiriyle tamamen aynı çıkmıştır. Serbest uç açısı 15° den 90° (0°) ye doğru gittikçe soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeninin değerleri artmaktadır.

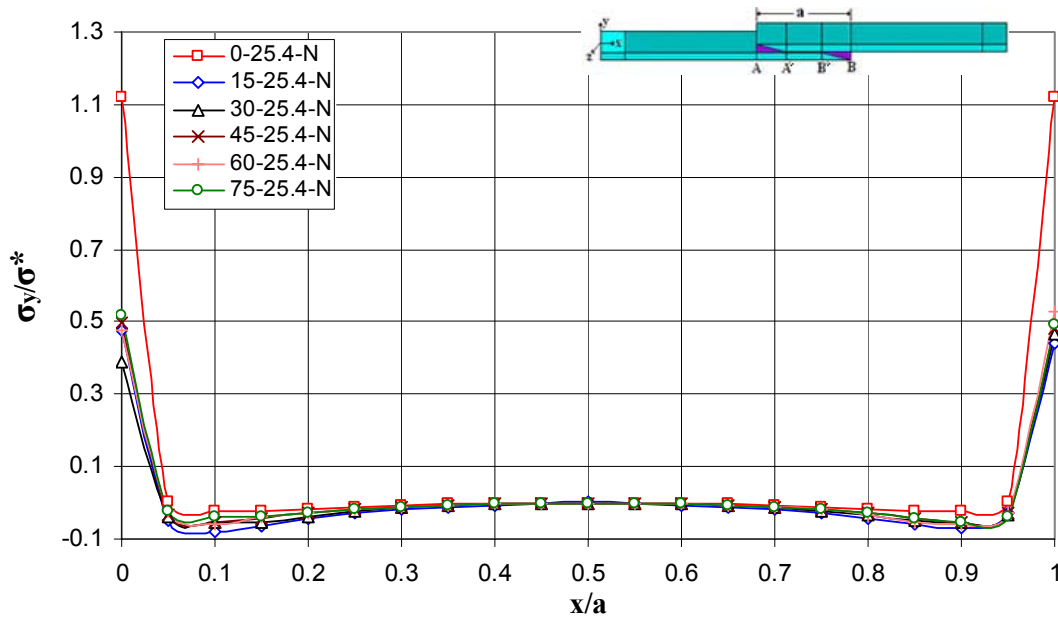
Şekil 6.12.d, 25.4 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan kayma gerilmesi dağılımlarını göstermektedir. Kayma gerilmelerinin maksimum değeri 0° de meydana gelirken en düşük değeri 15° de meydana gelmiş ve açı 15° den 90° (0°) ye giderken kayma gerilmesi değerlerinde yükselme olmuştur.

Şekil 6.12.e ise 25.4 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca

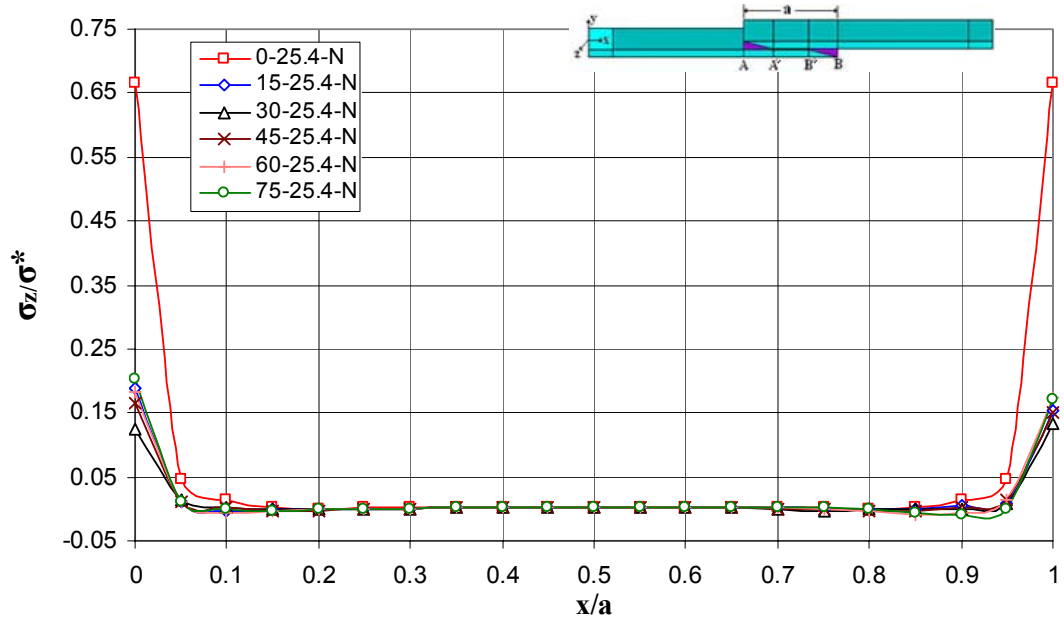
oluşan eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir. Grafikten görüleceği üzere normal, soyulma, z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeni ve kayma gerilmesinde olduğu gibi maksimum eşdeğer gerilme oranı 0° de maksimum 15° de ise minimum değerini almıştır. Bindirme bölgesinin orta kısımlarında ise A ve B noktalarında oluşanın tam tersi bir durum söz konusu olmuş ve 0° de minimum, 15° ise maksimum gerilmeler oluşmuştur.



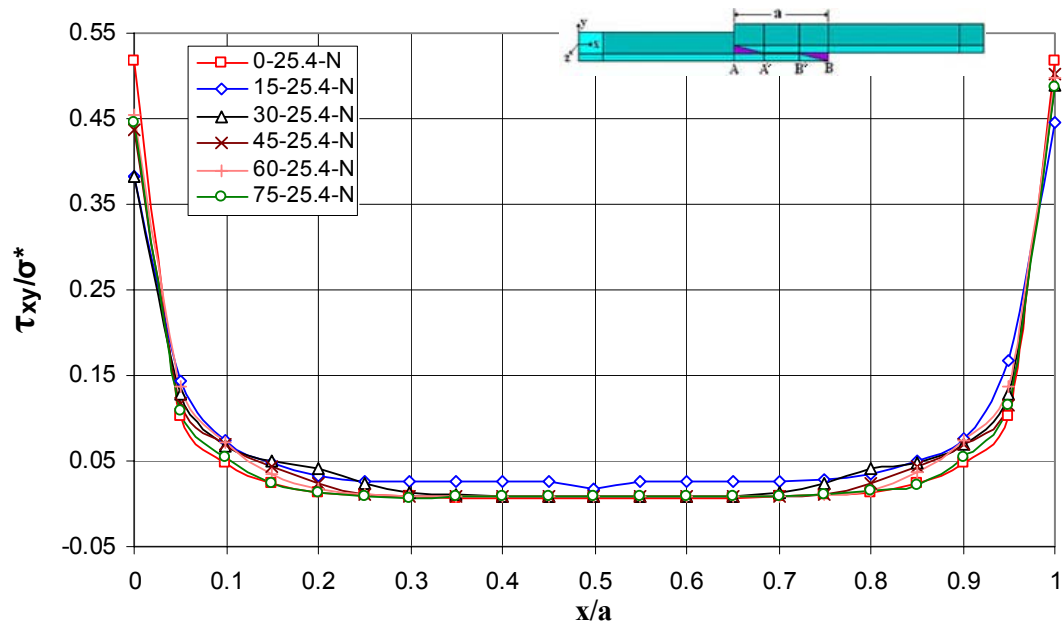
Şekil 6.12.a



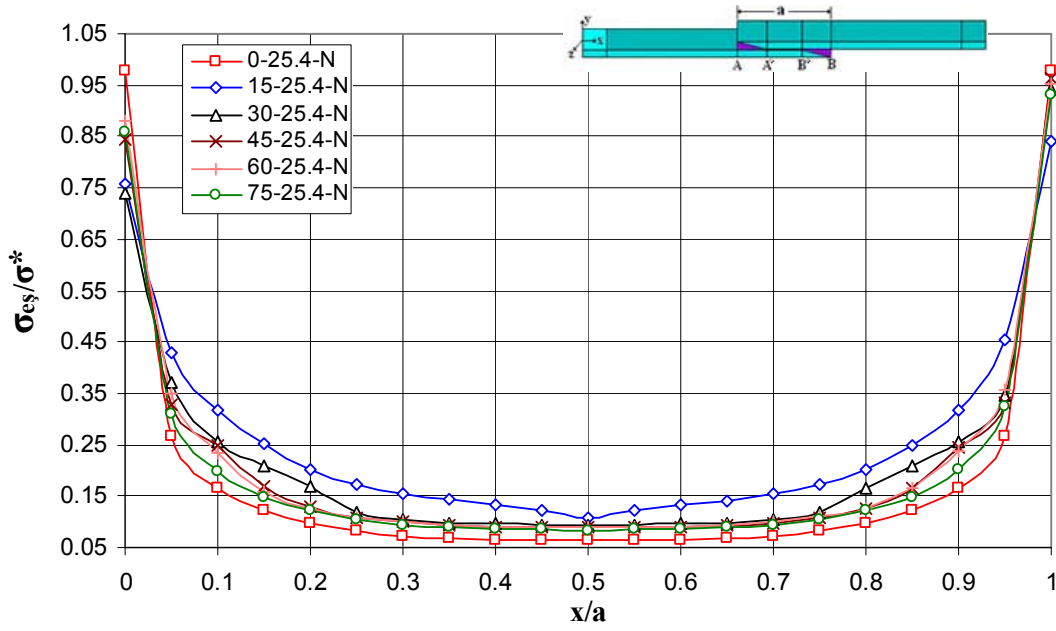
Şekil 6.12.b



Şekil 6.12.c



Şekil 6.12.d



Şekil 6.12.e

Şekil 6.12. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş 25.4mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapııştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi (N:Neoxil CE92 N8).

6.4.2.2. Neoxil CE92 N8 ile Birleştirilmiş 38.1 mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

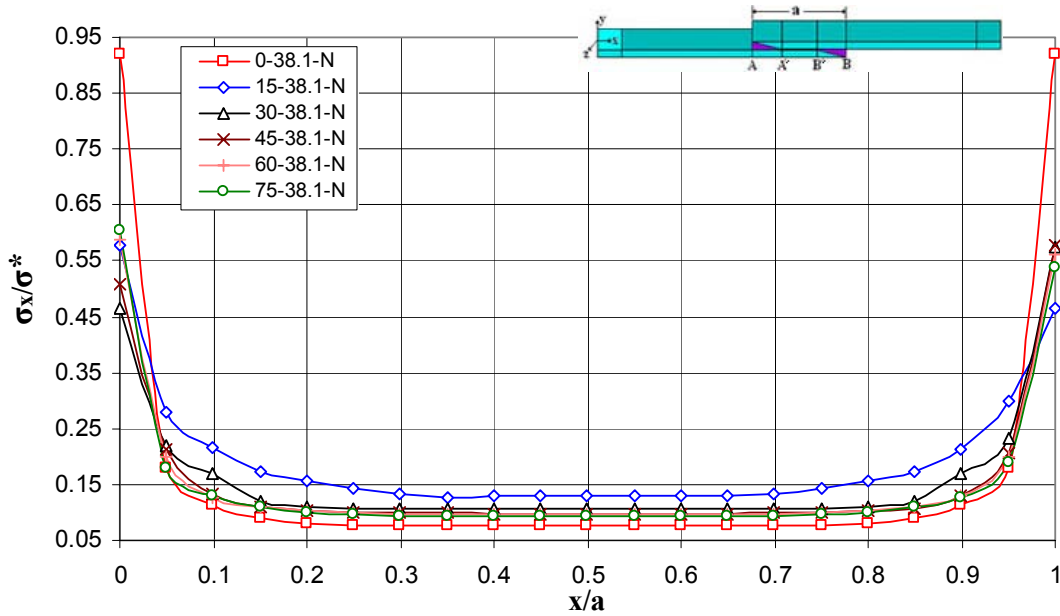
Şekil 6.13, 38.1 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° olmak üzere toplam 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.13'nin tamamı genel olarak incelendiğinde tüm açı değerlerinde gerilme oranlarının maksimum değerlerinin A ve B noktalarında ($x/a = 0$ ve $x/a = 1$) meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 6.13.a, 38.1 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan normal gerilme dağılımlarını göstermektedir. Normal gerilme değerinin maksimum değeri 0° de B noktasında meydana gelirken normal gerilmenin minimum değeri ise yine B noktasında 15° de meydana gelmiştir. 15° den 90° (0°) ye kadar normal gerilme değerlerinde artış olmuştur. Bindirme bölgesinin iç kısımlarında özellikle $0.05 \leq x/a \leq 0.95$ aralığında A ve B noktalarının tersi şekilde, soyulma gerilmesi değerleri 0° de diğer açı değerlerine göre düşük iken 15° ise en yüksek değerler dikkati çekmektedir.

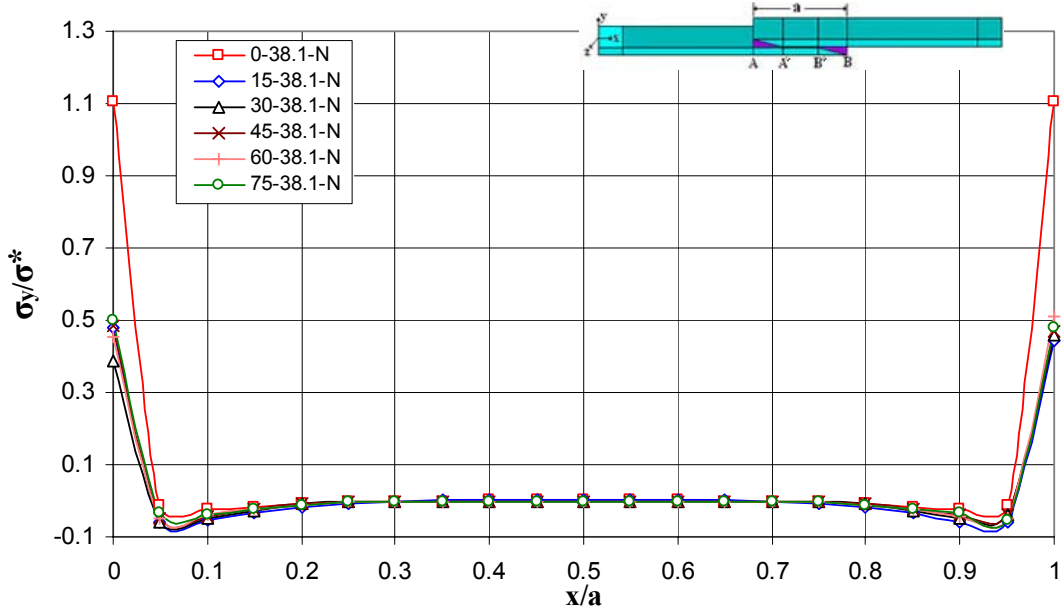
Şekil 6.13.b, aynı bağlantı tipi için A-B hattı boyunca meydana gelen soyulma gerilmesi dağılımını Şekil 6.12.c. ise z-eksenine paralel olarak alınan gerilme bileşeni dağılımını göstermektedir. Bindirme mesafesi boyunca her iki gerilme bileşeninin dağılımı aynı karakteristiği göstermektedir. Soyulma gerilmesinin maksimum değeri 0° de meydana gelmekte ve kendisine en yakın gerilme değerini veren 60° deki değerden yaklaşık olarak 2.4 kat daha yüksek olarak ortaya çıkmaktadır. Bindirme bölgesinin $0.2 \leq x/a \leq 0.8$ aralığında uç açısının etkisi olmamış ve gerilme değerleri birbiriyle tamamen aynı çıkmıştır. Serbest uç açısı 15° den 90° (0°) ye doğru arttıkça hem soyulma gerilmesi hem de z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeninin değerleri artmaktadır.

Şekil 6.13.d, 38.1 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan kayma gerilmesi dağılımlarını göstermektedir. Kayma gerilmelerinin maksimum değeri 0° de meydana gelirken en düşük değeri 15° de meydana gelmiş ve açı 15° den 90° (0°) ye giderken kayma gerilmesi değerlerinde yükselme olmuştur.

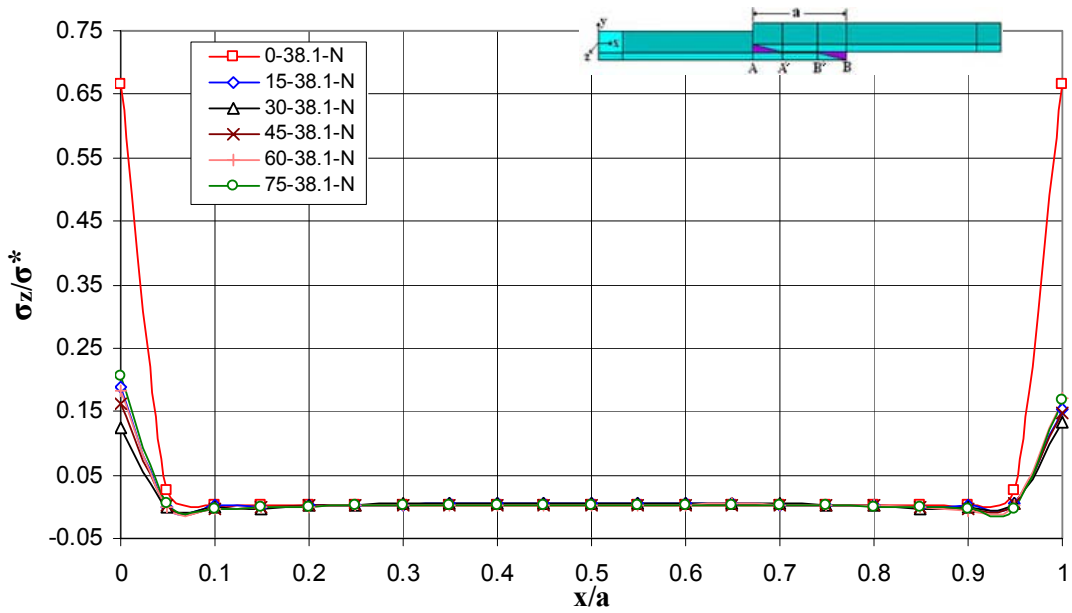
Şekil 6.13.e ise 38.1 mm bindirme uzunluğunda Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir. Grafikten görüleceği üzere maksimum eşdeğer gerilme oranı 0° de maksimum 15° de ise minimum değerini almıştır. Bindirme bölgesinin orta kısımlarında ise A ve B noktalarında ortaya çıkan durumun tam tersi bir durum söz konusu olmuş ve 0° de minimum 15° ise maksimum gerilmeler oluşmuştur.



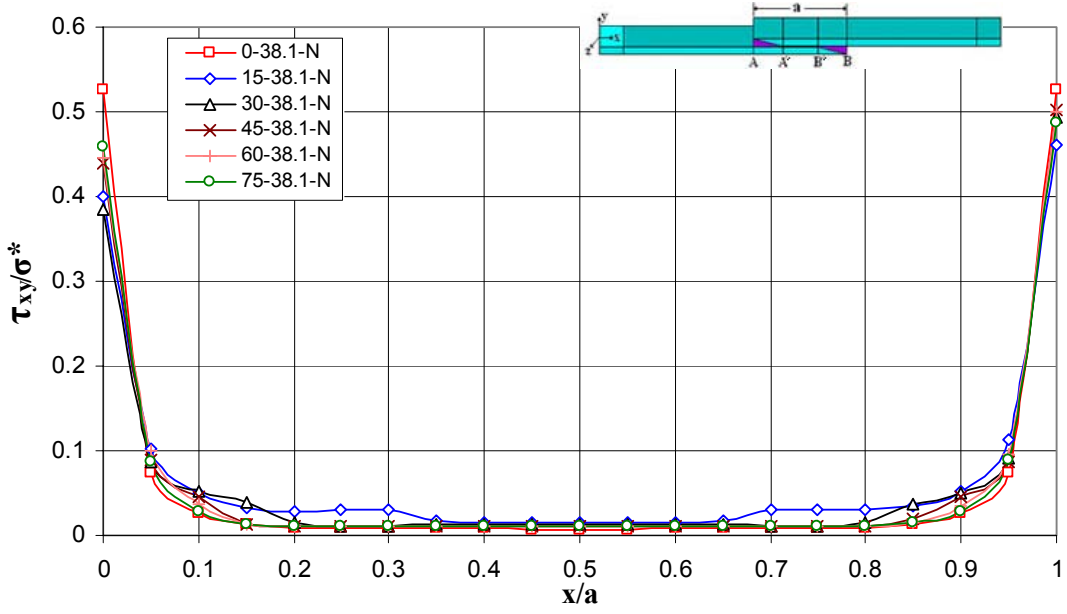
Şekil 6.13.a



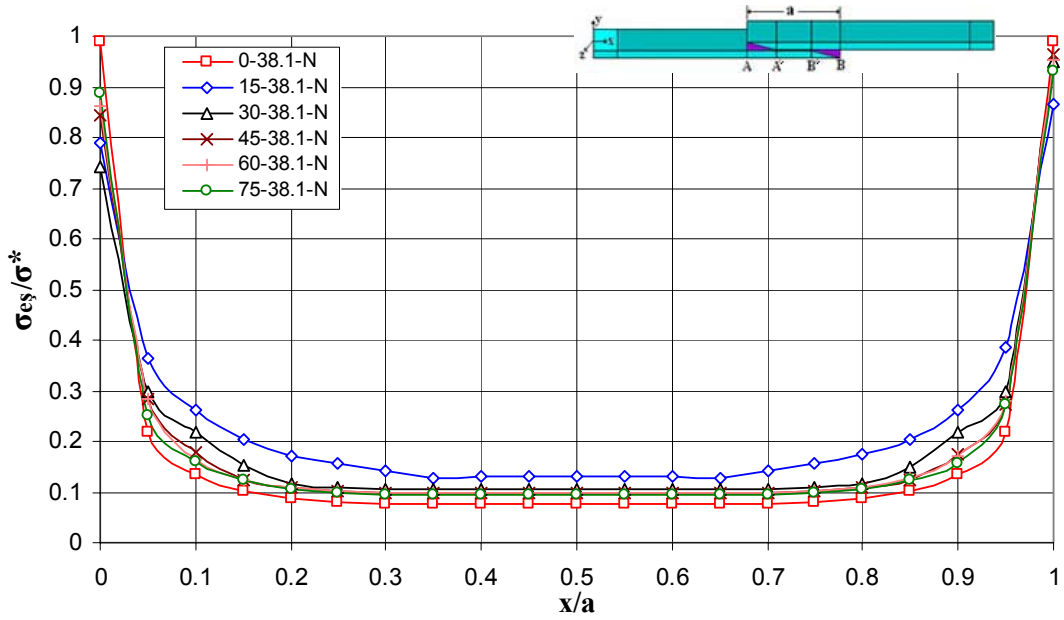
Şekil 6.13.b



Şekil 6.13.c



Şekil 6.13.d



Şekil 6.13.e

Şekil 6.13. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilmiş 38.1 mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b)

soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi (N:Neoxil CE92 N8).

6.4.2.3. SikaForce 7710 ile Birleştirilmiş 25.4 mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

Şekil 6.14, 25.4 mm bindirme uzunluğunda SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° olmak üzere toplam 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.14'ün tamamı genel olarak incelendiğinde Neoxil ile birleştirilen bağlantılardan farklı olarak gerilmelerin bindirme bölgesinin iç kısımlarına doğru transfer edildiği görülmektedir. Tüm açı değerlerinde σ_x/σ , σ_y/σ ve σ_z/σ gerilme oranlarının maksimum değerlerini A ve B ($x/a = 0$ ve $x/a = 1$) noktalarında aldığı ve bu noktalarda gerilmelerin çeki gerilmesi şeklinde olduğu, bindirmenin orta kısımlarına transfer edilen gerilmelerin ise A' ve B' noktalarında bası gerilmesi şeklinde pik değerler verdiği görülmektedir. τ_{xy}/σ ve σ_{ϕ}/σ gerilme oranlarının ise 0° de A ve B noktalarında 0° nin dışında kalan tüm açı değerleri için ise maksimum değerlerini A' ve B' noktalarında aldığı ve bu değerlerin bindirme bölgesinin tamamında çeki gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir.

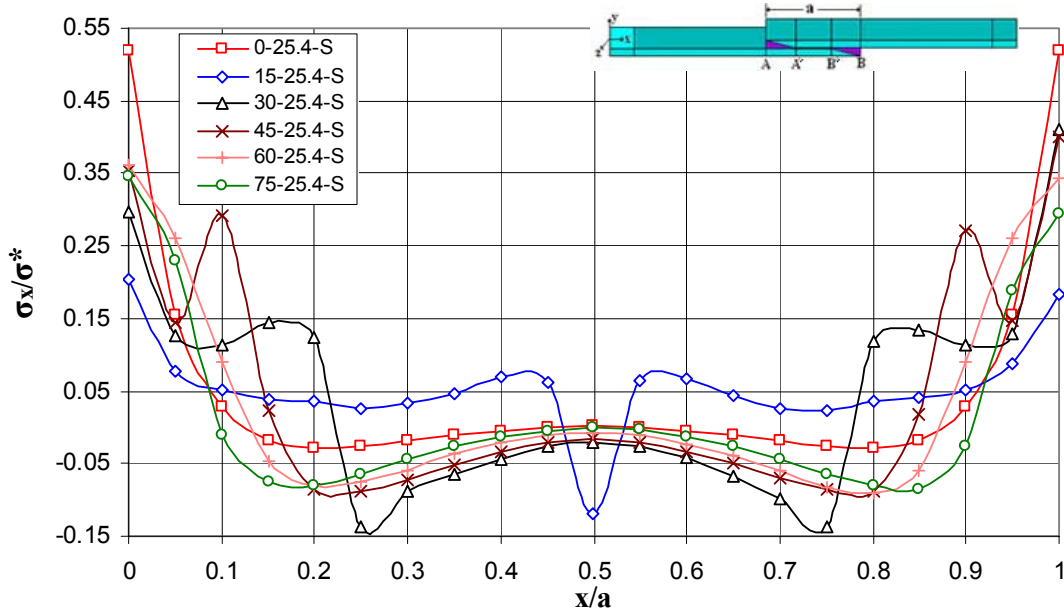
Şekil 6.14.a, 25.4 mm bindirme uzunluğu için SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip numunelerde A-B hattı boyunca meydana gelen normal gerilme dağılımını göstermektedir. Normal gerilmelerin maksimum değeri 0° de meydana gelirken minimum değeri ise 15° de meydana gelmiştir. Bu durum bağlantının maksimum dayanıma 15° de sahip olduğu sonucunu doğurmaktadır.

Şekil 6.14.b ve Şekil 6.14.c ise sırasıyla 25.4 mm bindirme uzunluğu için SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip bağlantılarda A-B hattı boyunca meydana gelen soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca oluşan gerilme dağılımını göstermektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere her iki gerilme bileşeninin dağılımı yaklaşık olarak birbirinin aynısıdır. Maksimum soyulma gerilmesi 0° de, en düşük soyulma gerilmesi ise yine 15° de meydana gelmiştir. 0° de meydana gelen gerilme oranı 1.044 iken bu değere en yakın gerilme değeri 45° de 0.809 olarak tespit edilmiştir. 0° de oluşan gerilme oranı değeriyle kendisine en yakın gerilme değeri arasında 1.3 katlık, 0° ile 15° derece arasında ise yaklaşık 2.4 katlık bir fark söz konusudur.

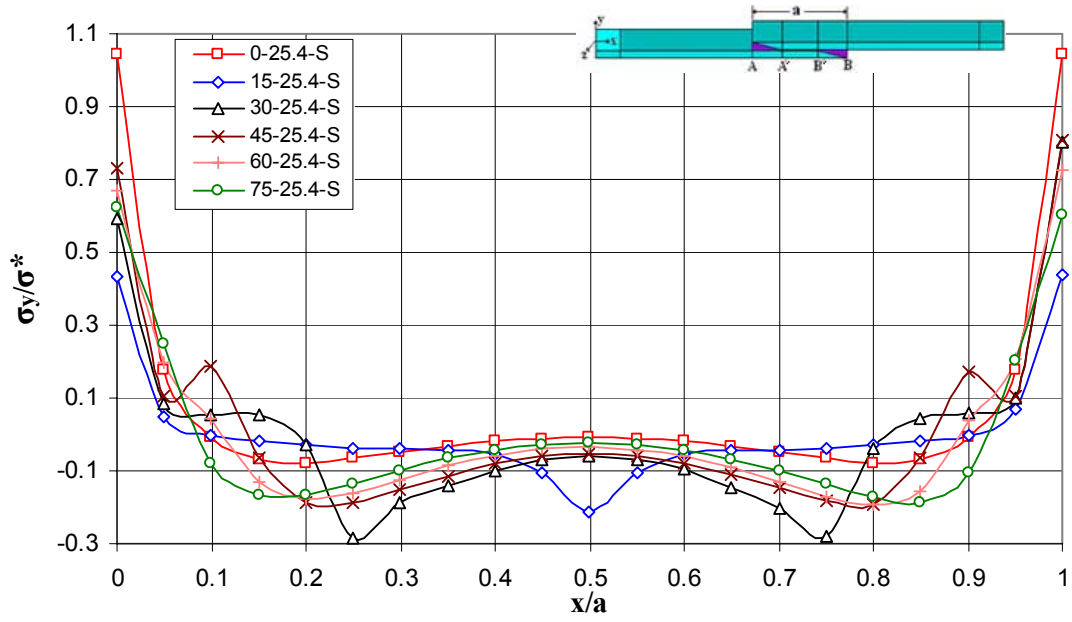
Şekil 6.14.d, 25.4mm bindirme mesafesinde SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip bağlantılarda A-B hattı boyunca meydana gelen kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Maksimum kayma gerilmesi 0° için A ve B ($x/a = 0$ ve $x/a = 1$) noktalarında meydana gelirken 0° nin dışındaki açı değerlerinde ise A' ve B' noktalarında

meydana gelmiş ve tüm bindirme uzunluğu boyunca çeki gerilmesi şeklinde dağılmıştır. Maksimum kayma gerilmesinin meydana geldiği açı değeri 15° iken minimum kayma gerilmesi 45° derecelik uç açısına sahip bağlantıda gözlenmiştir. 15° de kayma gerilmesi oranı 0.537 iken bu değere en yakın gerilme oranı değeri arasında 1.04 kat, 45° de meydana gelen gerilme oranı değeri ile ise 1.076 katlık bir fark söz konusudur.

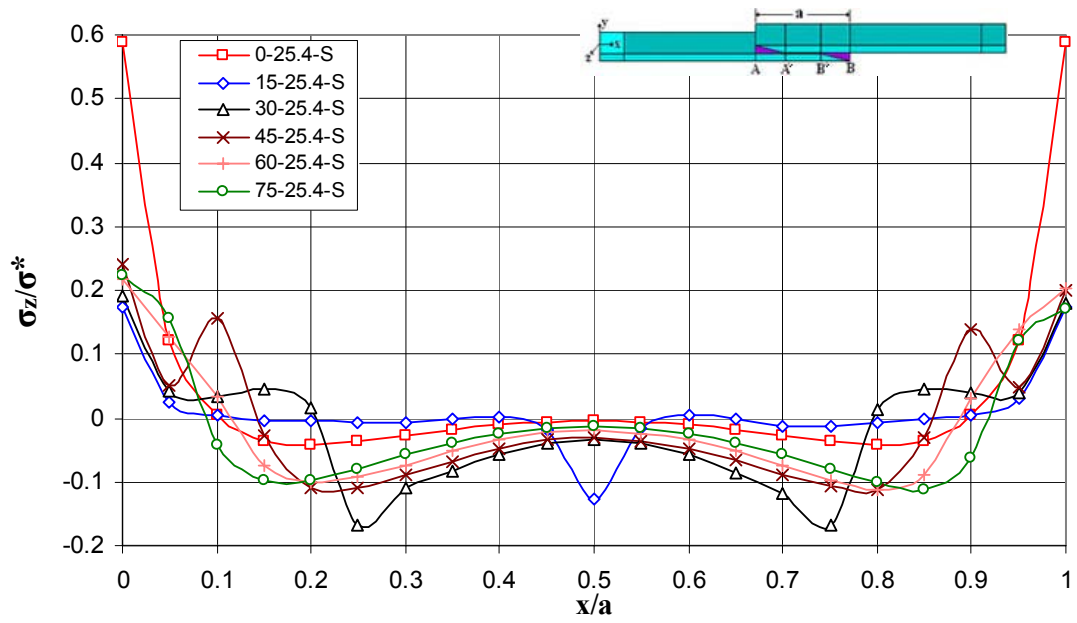
Şekil 6.14.e, 25.4 mm bindirme mesafesi için SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş bağlantılarda A-B hattı boyunca meydana eşdeğer gerilme dağılımı üzerine farklı uç açılarının etkisini göstermektedir. Gerilme dağılımı Şekil 6.14.d de görülen kayma gerilmesi dağılımına benzer bir şekilde meydana gelmiş ve maksimum eş değer gerilme değeri 0° de minimum gerilme değeri ise 45° de ortaya çıkmıştır. Maksimum ve minimum gerilmeler arasında 1.225 katlık fark var iken maksimum gerilme değerine en yakın gerilme değerini veren 15° de oluşan gerilme değeri ile yaklaşık olarak 1.065 katlık bir fark söz konusudur.



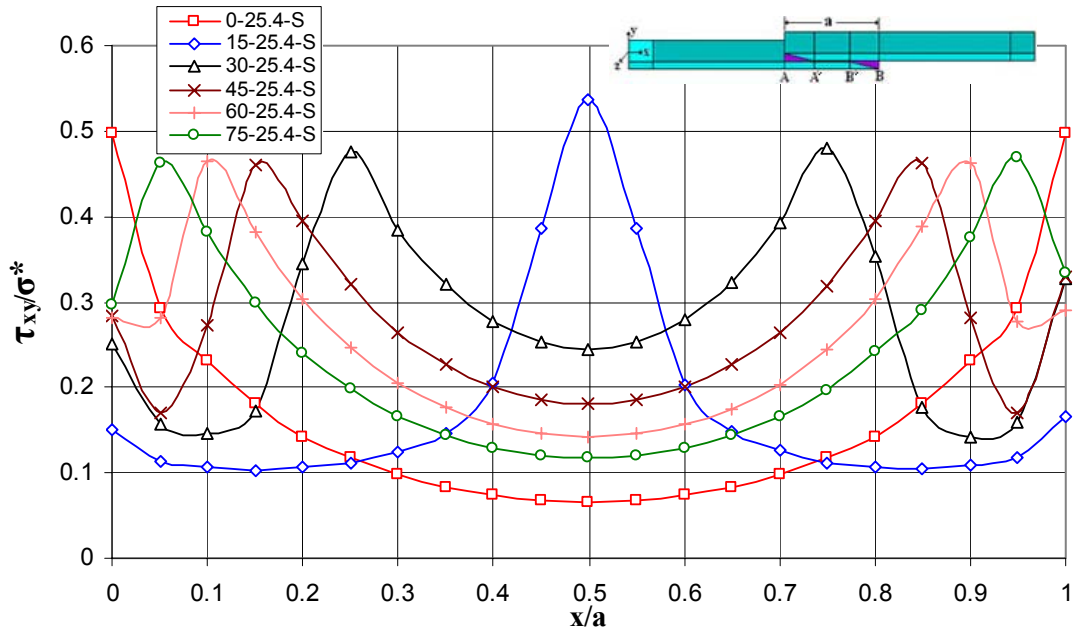
Şekil 6.14.a



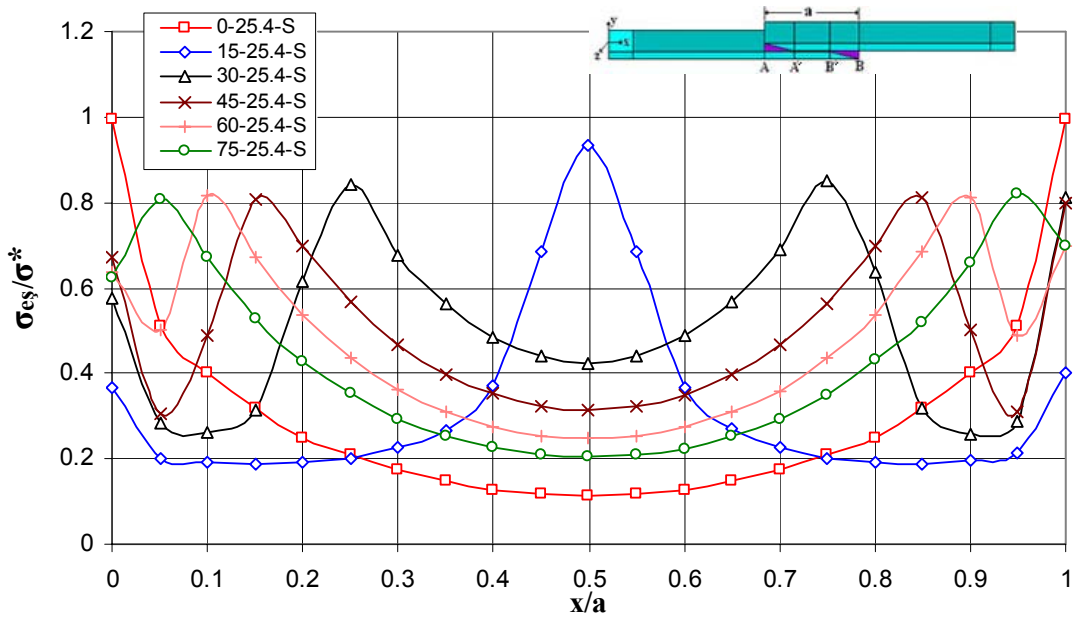
Şekil 6.14.b



Şekil 6.14.c



Şekil 6.14.d



Şekil 6.14.e

Şekil 6.14. SikaForce 7710 ile birleştirilmiş 25.4 mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi (S: SikaForce 7710).

6.4.2.4. SikaForce 7710 ile Birleştirilmiş 38.1 mm Bindirme Mesafesine Sahip Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı Değişiminin Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

Şekil 6.15, 38.1mm bindirme uzunluğunda SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.15'ün tamamı incelendiğinde, gerilmelerin bindirme bölgesinin iç kısımlarına doğru transfer edildiği ve tüm açı değerlerinde σ_x/σ , σ_y/σ ve σ_z/σ gerilme oranlarının maksimum değerlerini A ve B ($x/a = 0$ ve $x/a = 1$) noktalarında aldığı ve bu noktalarda σ_x/σ , σ_y/σ ve σ_z/σ gerilmelerinin çeki gerilmesi şeklinde olduğu, bindirmenin orta kısımlarına transfer edilen gerilmelerin ise A' ve B' noktalarında pik değerler verdiği ve bası gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir. τ_{xy}/σ ve $\sigma_{eş}/\sigma$ gerilme oranlarının ise 25.4 mm bindirme mesafesine sahip numunelerde olduğu gibi 0° de A ve B noktalarında 0° nin dışındaki tüm açı değerleri için ise maksimum değerlerini A' ve B' noktalarında aldığı ve bu değerlerin bindirme bölgesinin tamamında çeki gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir.

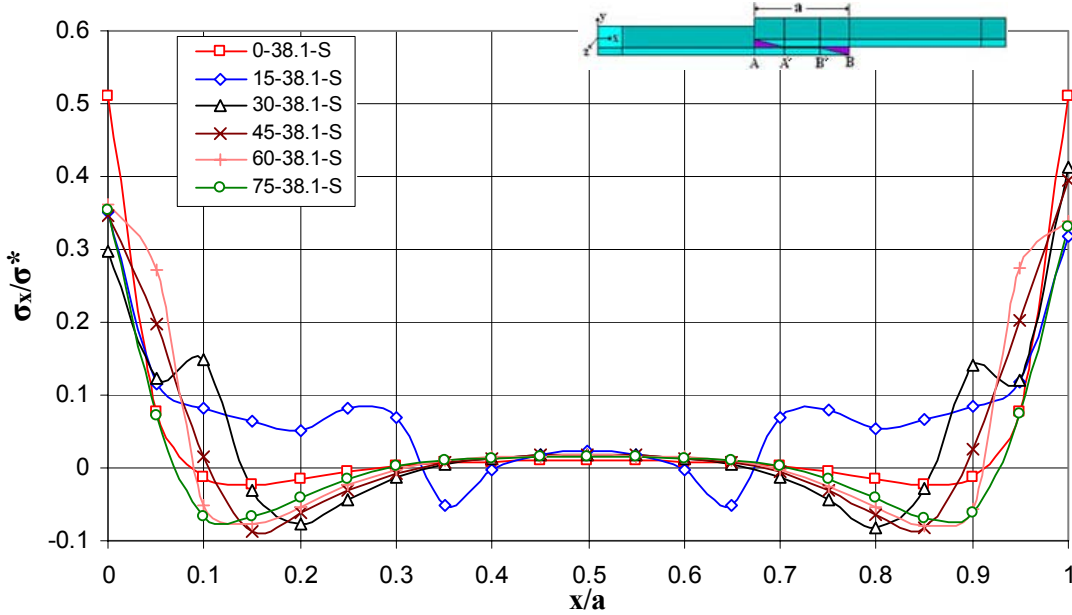
Şekil 6.15.a, 38.1 mm bindirme uzunluğu için SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip numunelerde A-B hattı boyunca meydana gelen normal gerilme dağılımını göstermektedir. Maksimum normal gerilme oranı değeri 0.510 ile 0° de meydana gelirken minimum gerilme oranı değeri ise 0.3509 ile 15° de meydana gelmiştir. Maksimum ile minimum normal gerilme oranı arasında yaklaşık olarak 1.45 kat fark mevcuttur. Bu durum bağlantının maksimum dayanıma 15° de minimum dayanıma ise 0° (90°) de sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.15.b ve Şekil 6.15.c ise sırasıyla 38.1 mm bindirme uzunluğu için SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip bağlantılarda A-B hattı boyunca meydana gelen soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca oluşan gerilme dağılımını göstermektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere her iki gerilme bileşeninin dağılımı yaklaşık olarak birbirinin aynısıdır. Maksimum soyulma gerilmesi 0° de, en düşük soyulma gerilmesi ise 15° de meydana gelmiştir. 0° de meydana gelen gerilme oranı 1.0285 iken bu değere en yakın gerilme değeri 75° de 0.8375 olarak tespit edilmiştir. 0° de oluşan gerilme oranı değeriyle kendisine en yakın gerilme değeri arasında yaklaşık 1.23 katlık, 0° ile 15° derece arasında ise 1.33 katlık bir fark söz konusudur.

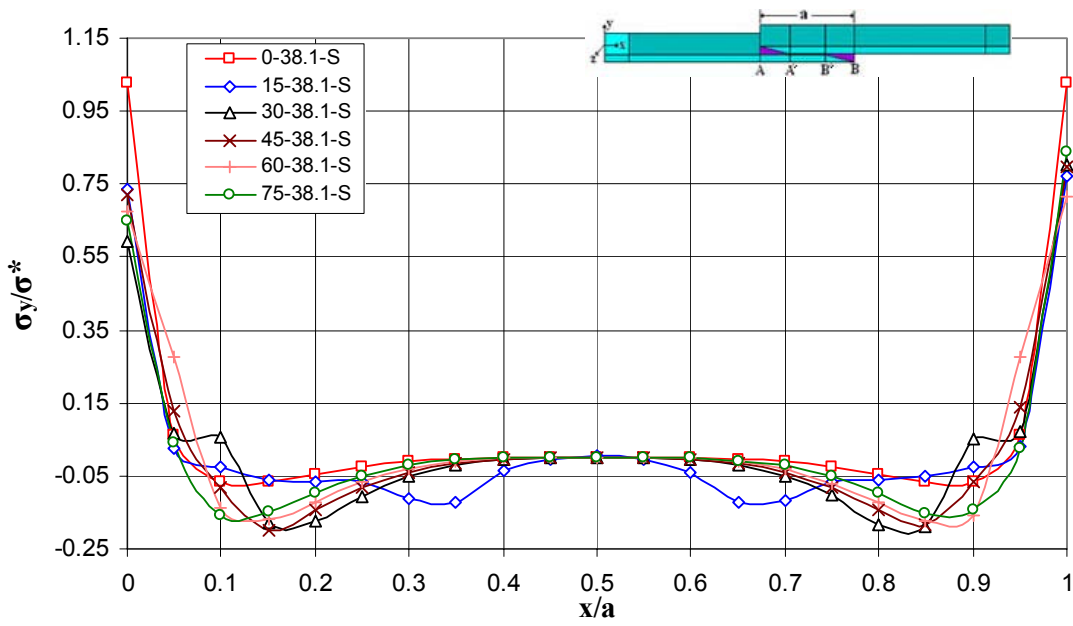
Şekil 6.15.d, 38.1 mm bindirme mesafesinde SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş 6 farklı uç açısına sahip bağlantılarda A-B hattı boyunca meydana gelen kayma gerilmesi

dağılımını göstermektedir. Maksimum kayma gerilmesi 0° de B ($x/a = 0$ ve $x/a = 1$) noktasında meydana gelirken 0° nin dışındaki açı değerlerinde ise A' ve B' noktalarında meydana gelmiş ve tüm bindirme uzunluğu boyunca çeki gerilmesi şeklinde dağılmıştır. Maksimum kayma gerilmesinin meydana geldiği açı değeri 0° iken minimum kayma gerilmesi 15° derecelik uç açısına sahip bağlantıda gözlenmiştir. 0° de kayma gerilmesi oranı 0.50 iken 15° de 0.4455'dir. İki gerilme oranı arasında yaklaşık olarak 1.12 katlık bir fark söz konusu iken maksimum değer en yakın gerilme oranı olan 60° arasında ise 1.04 katlık bir fark söz konusudur.

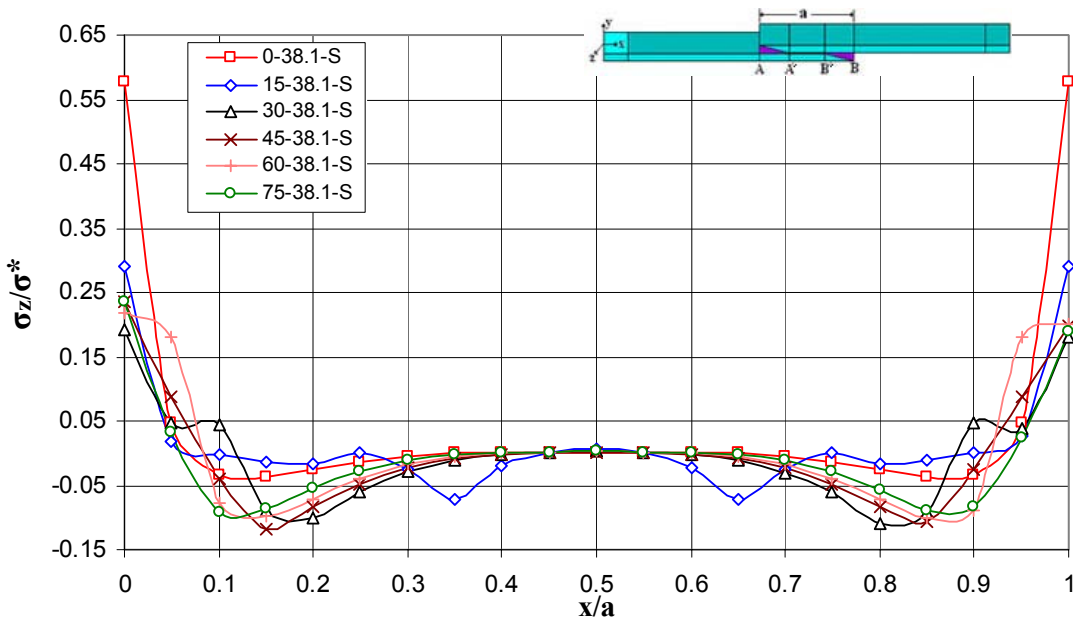
Şekil 6.15.e, 38.1mm bindirme mesafesi için SikaForce 7710 kullanılarak birleştirilmiş bağlantılarda A-B hattı boyunca meydana eşdeğer gerilme dağılımı üzerine farklı uç açılarının etkisini göstermektedir. Maksimum eş değer gerilme değeri 0° de minimum gerilme değeri ise 15° de ortaya çıkmıştır. Maksimum ve minimum gerilmeler arasında 1.275 katlık fark var iken maksimum gerilme değerine en yakın gerilme değerini veren 60° de oluşan gerilme değeri ile yaklaşık olarak 1.19 katlık bir fark vardır.



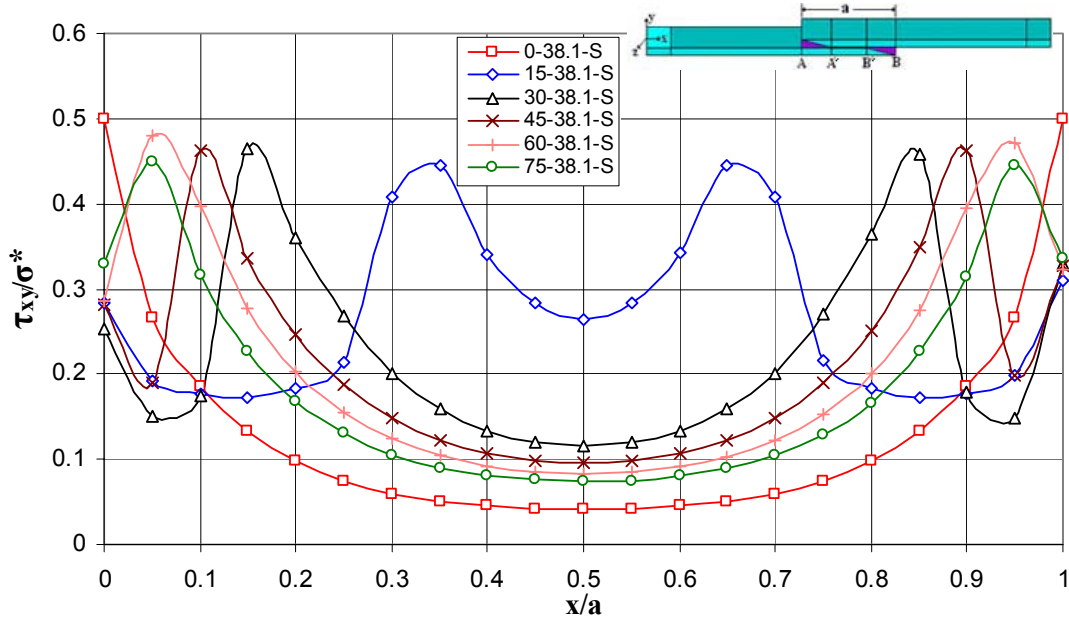
Şekil 6.15.a



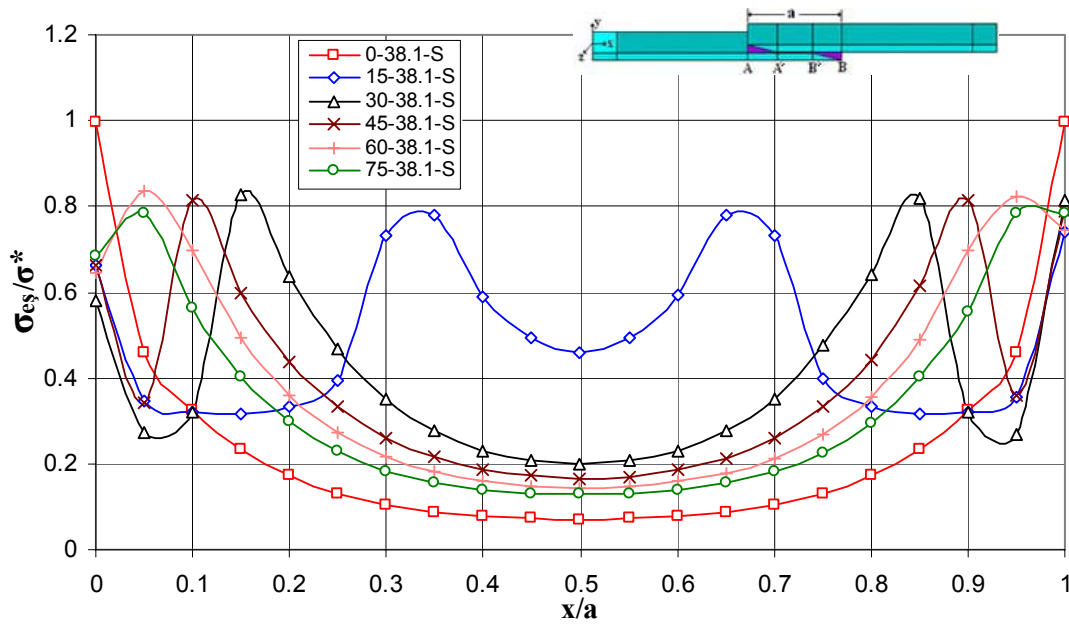
Şekil 6.15.b



Şekil 6.15.c



Şekil 6.15.d

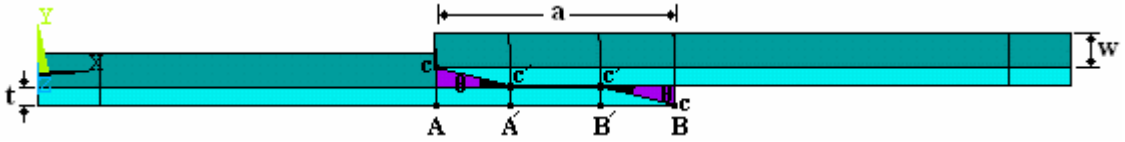


Şekil 6.15.e

Şekil 6.15. SikaForce 7710 ile birleştirilmiş 38.1 mm bindirme mesafesine sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında A-B hattı boyunca farklı uç açısının yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi (S: SikaForce 7710).

6.4.3. Toplam Yapışma Alanı Eşit Numunelerde Serbest Uç Açısının Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

Toplam yapışma alanı, uç açısı olmayan numuneler için bindirme mesafesi ile numune genişliğinin çarpılması ($a \times w$) sonucunda elde edilir. Çalışmada kullanılan numunelerde; 0° (90° yada açısız), 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° olmak üzere 6 farklı açı (θ), 30.27, 29.43, 28.57, 27.64, 26.60 ve 25.4 mm olmak üzere 6 farklı bindirme mesafesi (a) ve iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu durumda toplam yapışma alanı, hem θ açısının hem de bindirme mesafesinin değişiminden etkilenmektedir.



Şekil 6.16. Toplam yapışma alanı

Bindirme mesafesi a sabit kalsa bile uç açısının sıfırdan farklı olması durumunda numunelerin toplam yapışma alanı değişmektedir. Bindirme mesafesi a ve yapıştırılan malzemelerin kalınlığı t sabit kalırken θ 'nın artırılması cc' uzunluğunun azalmasına $A'B'$ uzunluğunun artmasına θ 'nın azaltılması ise tersi duruma neden olmaktadır. Tablo 5.1 incelenecek olursa 25.4 mm bindirme mesafesinde tüm geometrik değişkenler sabit kalmasına rağmen sadece uç açısının artması ile yapışma alanı artmaktadır. Bundan dolayı sadece uç açısı θ 'nın etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için her açı değerinde meydana gelen yapışma alanının eşit olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için her açı değerinde aynı yapışma alanını (384.4611 mm^2) sağlayacak bindirme mesafesi (a) tespit edilmiş ve numuneler tespit edilen bu bindirme mesafesinde yapıştırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde bindirme mesafesinden, dolayısıyla toplam yapıştırma alanından bağımsız olarak sadece uç açısının etkisi tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda tartışılmıştır.

6.4.3.1. Neoxil CE92 N8 ile Birleştirilmiş Toplam Yapıştırma Alanı Eşit Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısının Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

Şekil 6.17, Neoxil CE82 N8 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.17'nin tamamı incelendiğinde tüm açı değerleri için maksimum gerilmelerin bağlantının uç kısımlarında (A ve B noktalarında) meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 6.17.a, Neoxil CE82 N8 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında 6 farklı uç açısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında meydana gelen normal gerilme dağılımlarını göstermektedir. Normal gerilmelerin en yüksek değeri 0° de A ve B noktalarında eşit olarak meydana gelmiştir. En düşük normal gerilme değerinin ise 15° uç açısında birleştirilmiş bağlantıda B noktasında yani çekme gerilmesinin uygulandığı tarafta meydana geldiği görülmektedir. 0° de meydana gelen gerilme oranı ile (0.9044) 15° de meydana gelen gerilme oranı (0.5437) arasında yaklaşık olarak 1.66 katlık bir fark söz konusudur. 0° deki gerilme oranı değerine en yakın gerilme oranı değeri 75° de 0.6037 olarak meydana gelmiş ve bu iki değer arasında ise yaklaşık olarak 1.49 katlık bir fark söz konusu olmuştur. Normal gerilme dağılımında dikkati çeken önemli bir noktada bindirme bölgesinin uç kısımlarında en küçük gerilme değerlerine sahip olan 15° deki gerilme oranlarının $0.05 \leq x/a \leq 0.95$ aralığında diğer tüm açı değerlerinde meydana gelen değerlerden daha yüksek değerler sergilemesi 0° de meydana gelen durumun ifade edilenin tam tersi olmasıdır.

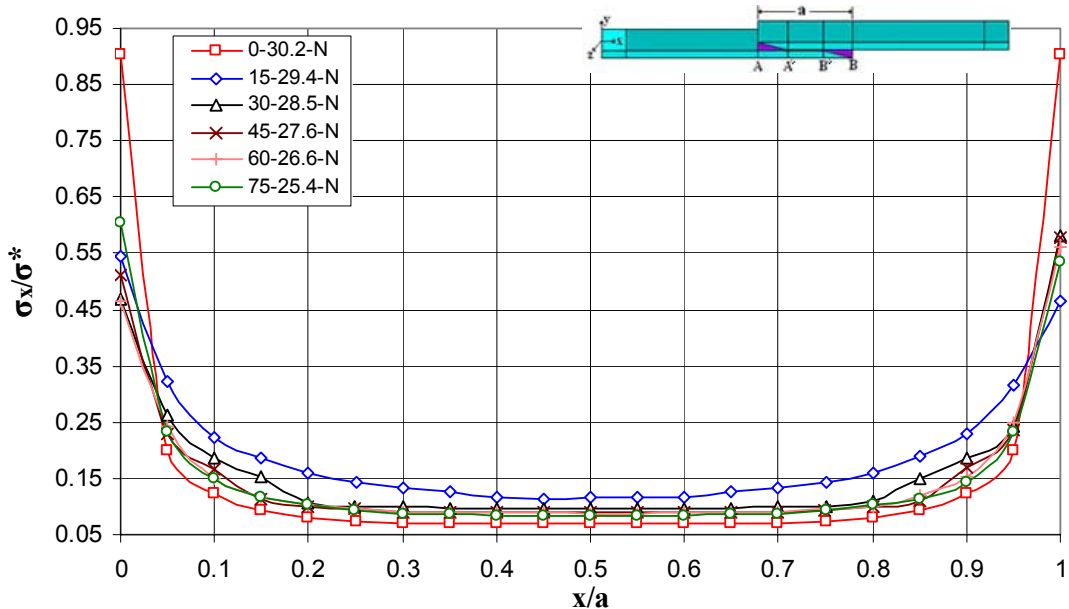
Şekil 6.17.b. ve Şekil 6.17.c. ise sırasıyla Neoxil CE82 N8 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında 6 farklı uç açısı için A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında meydana gelen soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeni dağılımlarını göstermektedir. Her iki grafikteki gerilme dağılımları birbirine çok yakın bir karakteristik göstermiştir. Tüm açı değerleri için soyulma ve z-ekseni bileşeninin maksimum değerlerinin Neoxil ile birleştirilmiş tüm bağlantılarda olduğu gibi A ve B noktalarında meydana geldiği görülmektedir. Bu noktadaki en yüksek soyulma gerilmesi oranı 0° de 1.1138 en düşük gerilme oranı ise 15° de 0.4783'dir. İki açı değeri arasında yaklaşık olarak 2.33 katlık bir fark mevcuttur. 0° deki maksimum gerilme oranına en yakın gerilme oranı değeri 75° de 0.5189'dır ve bu iki uç açısı ile birleştirilmiş bağlantılar arasındaki soyulma gerilmeleri arasında da yaklaşık olarak 2.15 kat bir fark oluşmuştur. Şekil 6.17.b'deki sonuçlardan da görüleceği üzere maksimum gerilme 0° de minimum gerilme ise 15° de

meydana gelmekte ve açı değeri 15° den 90° (0°) ye doğru arttıkça soyulma gerilmesi değerleri de artmaktadır.

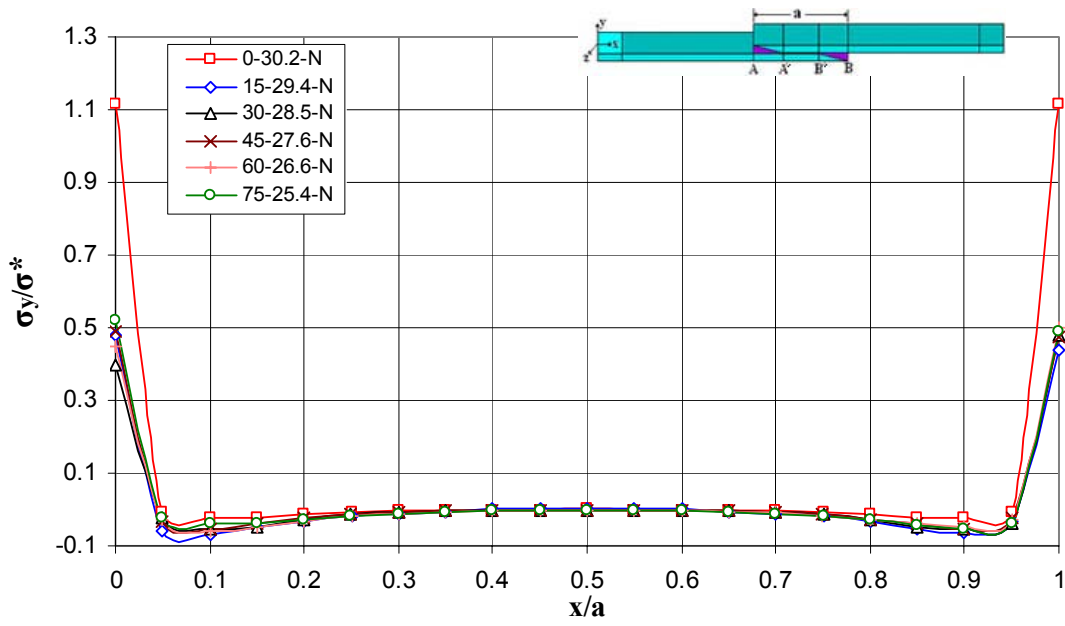
Şekil 6.17.d., aynı birleştirme bağlantısında meydana gelen kayma gerilmesi dağılımını göstermektedir. Kayma gerilmesi dağılımı da soyulma gerilmesi dağılımı gibi 0° de en yüksek (0.5201), 15° de en düşük (0.4468) kayma gerilmesi değerlerine sahiptir. Burada kayma maksimum ve minimum oranları arasındaki fark yaklaşık olarak 1.164 olarak gerçekleşmiş maksimum gerilmeye en yakın gerilme değeri 75° de (0.5110) ortaya çıkmış ve 1.02 olarak gerçekleşmiştir.

A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında meydana gelen eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 6.17.e de verilmiştir. Kayma gerilmesi dağılımına benzer olarak 0° (0.9810) de maksimum 15° (0.8425) de minimum gerilme meydana gelmiş ve iki açı değeri arasında meydana gelen maksimum gerilme oranı 1.164 olarak gerçekleşmiştir. 75° de meydana gelen gerilme oranı ile arasındaki fark ise yaklaşık olarak 1.055'dir.

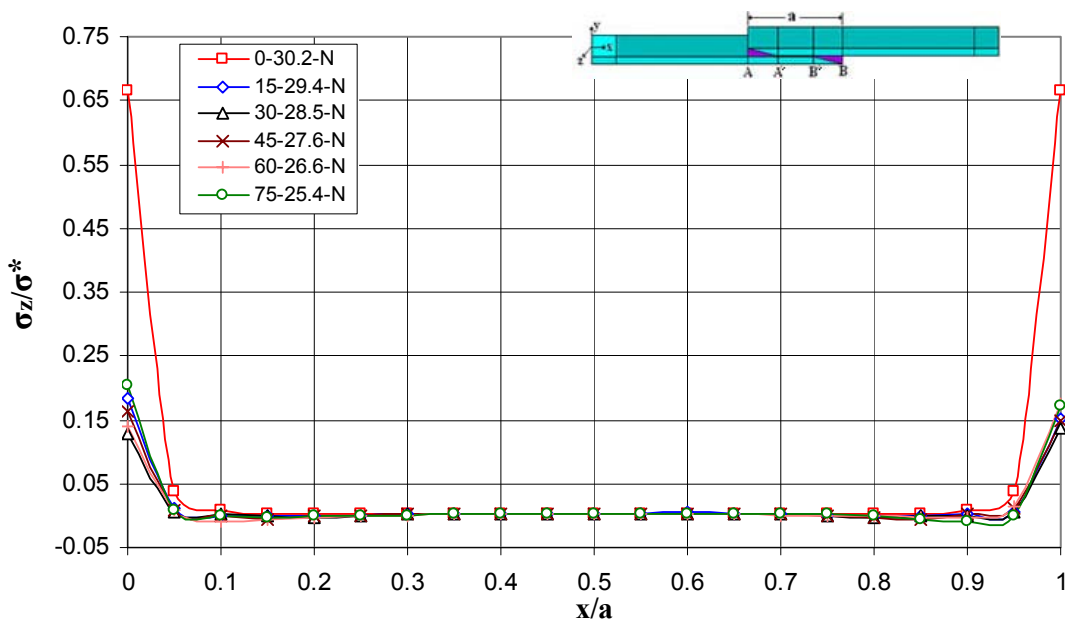
Sonuçlardan görüleceği üzere uç açısı değeri 15° den yukarıya doğru arttırıldıkça bağlantılarda meydana gelen özellikle soyulma gerilmesi ve eşdeğer gerilme değerlerinde önemli bir artış söz konusu olmaktadır. Bu durumda bağlantı mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır.



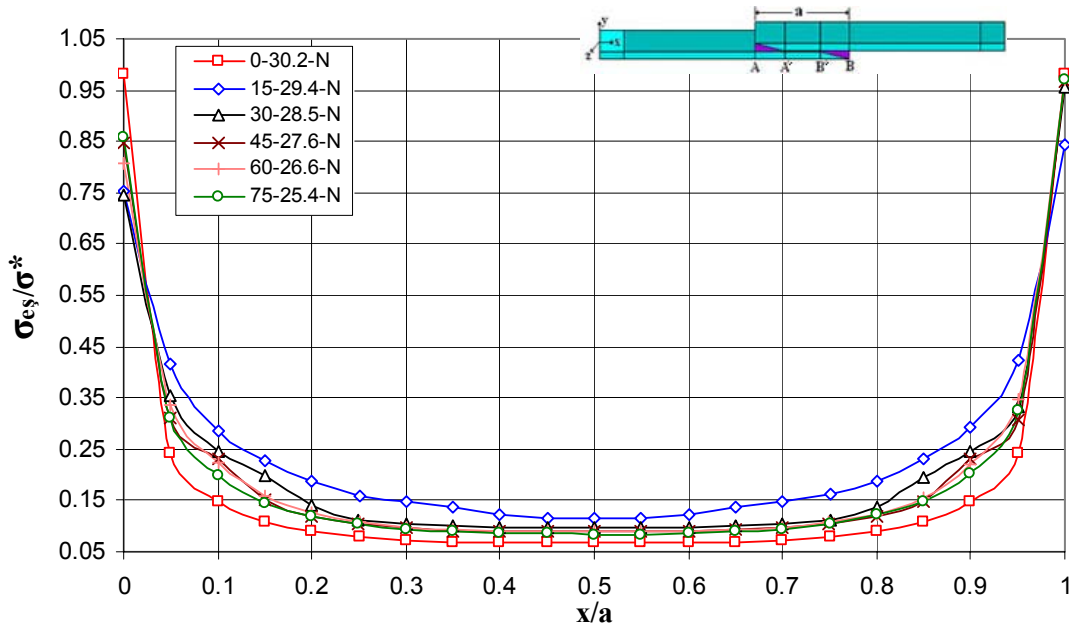
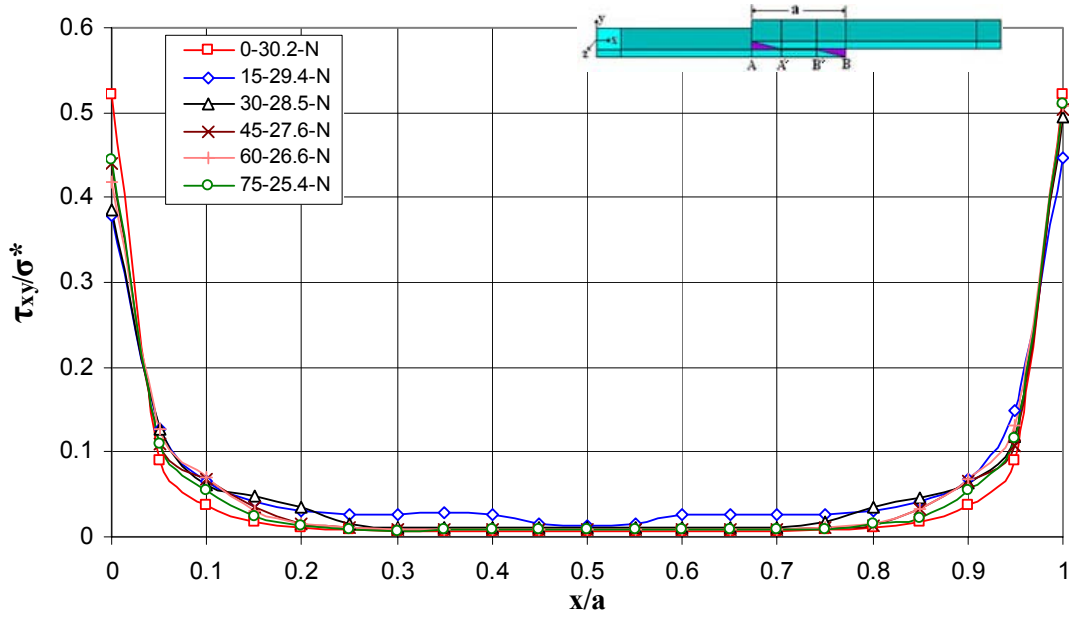
Şekil 6.17.a



Şekil 6.17.b



Şekil 6.17.c



Şekil 6.17. Neoxil CE82 N8 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi (N:Neoxil CE92 N8).

6.4.3.2. SikaForce 7710 ile Birleştirilmiş Toplam Yapıştırma Alanı Eşit Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısının Bağlantı Dayanımı Üzerine Etkisi

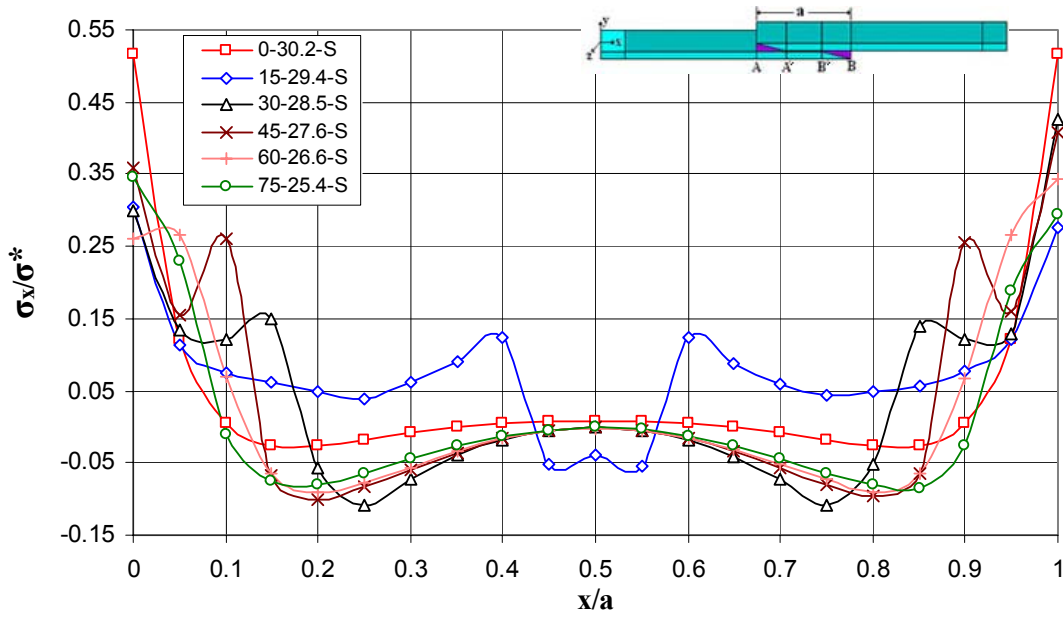
Şekil 6.18, SikaForce 7710 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Şekil 6.18 incelendiğinde, gerilmelerin bindirme bölgesinin iç kısımlarına doğru transfer edildiği ve tüm açı değerlerinde σ_x/σ , σ_y/σ ve σ_z/σ gerilme oranlarının maksimum değerlerini A ve B ($x/a = 0$ ve $x/a = 1$) noktalarında aldığı ve bu noktalarda σ_x/σ , σ_y/σ ve σ_z/σ gerilmelerinin çeki gerilmesi şeklinde olduğu, bindirmenin orta kısımlarına transfer edilen gerilmelerin ise A' ve B' noktalarında pik değerler verdiği ve bası gerilmesi şeklinde oluştuğu görülmektedir. τ_{xy}/σ ve σ_{θ}/σ gerilme oranlarının ise 0° de A ve B noktalarında 0° nin dışındaki tüm açı değerleri için ise maksimum değerlerini A' ve B' noktalarında aldığı ve bu değerlerin bindirme bölgesinin tamamında çeki gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir.

Şekil 6.18.a, bağlantıda A-B hattı boyunca meydana gelen normal gerilme dağılımını göstermektedir. En yüksek ve en düşük gerilme oranları sırasıyla 0° ve 15° de yaklaşık olarak 1.7 katlık fark ile meydana gelmiştir. Maksimum normal gerilme oranına en yakın gerilme oranı ise yaklaşık olarak 1.2 katlık bir farkla 30° de meydana gelmiştir.

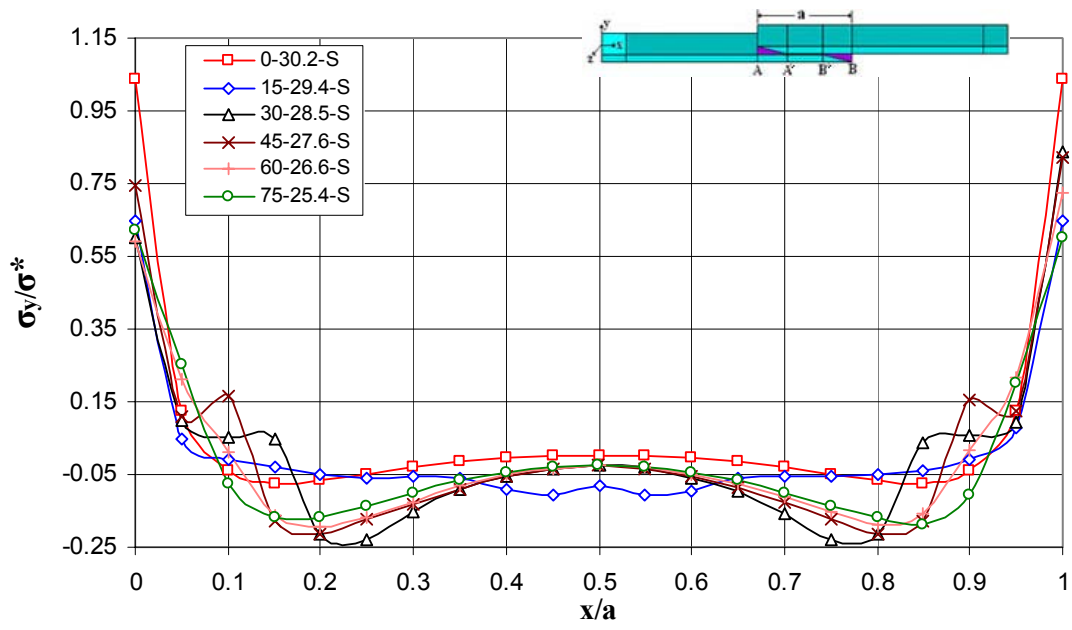
Aynı bağlantı tipinde meydana gelen soyulma gerilmesi ve z-ekseni boyunca alınan gerilme bileşeni sırasıyla Şekil 6.18.b ve Şekil 6.18.c de verilmiştir. Daha önceki analizlerde olduğu gibi iki gerilme dağılımı karakteristiği birbirine çok yakındır. Maksimum soyulma gerilmesi 0° de, minimum soyulma gerilmesi ise 75° de aralarında yaklaşık 1.73 katlık bir farkla meydana gelmiştir.

Şekil 6.18.d, SikaForce 7710 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan kayma gerilmesi dağılımlarını göstermektedir. Gerilme dağılımı 0° de A ve B noktasında eşit değerde meydana gelirken uç açısı sıfırdan farklı olan numunelerde ise A' ve B' noktalarında meydana gelmiştir. A ve B noktasında meydana gelen kayma gerilmelerinin maksimum değeri sıfır derecede, en küçük değeri ise 15° de meydana gelirken bağlantının orta kısmına transfer edilen kayma gerilmelerinin maksimum değeri A' ve B' noktasında 15° de meydana gelmiştir. Bindirme bölgesinin orta kısımlarında meydana gelen en düşük kayma gerilmesi ise uç bölgelerinin tersine 0° de meydana gelmiştir.

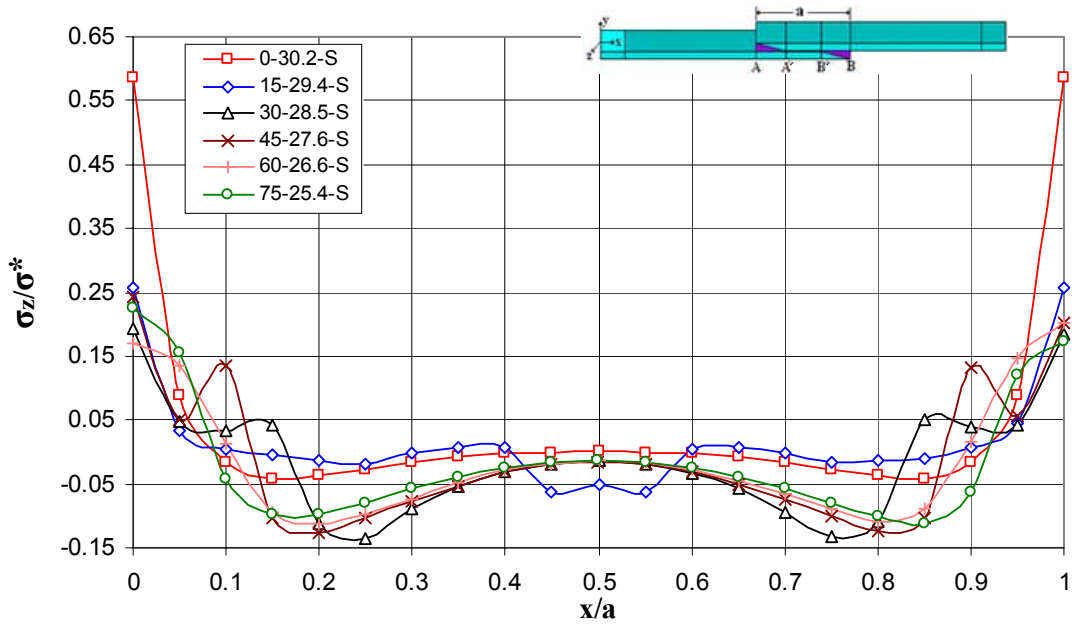
Şekil 6.18.e, eşit yapıştırma alanına sahip SikaForce 7710 ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının eşdeğer gerilme dağılımlarını göstermektedir. Eş değer gerilmelerin dağılımı incelendiğinde kayma gerilmesi dağılımında olduğu gibi bindirme bölgesini, uç bölgesi ve bindirmenin $A' - B'$ bölgesi olmak üzere iki bölgede değerlendirmek mümkündür. Uç bölgeler göz önüne alındığında maksimum gerilmeler 0° de, minimum gerilmeler ise 15° de oluşmuştur. Uç bölgesinde, maksimum ve minimum gerilmeler arasında yaklaşık olarak 1.66 katlık bir fark vardır. $A' - B'$ bölgesinde meydana gelen gerilme oranları içerisinde 15° uç açısına sahip olan bağlantıda meydana gelen gerilme oranı diğer numunelerde meydana gelen gerilme oranlarından daha yüksektir.



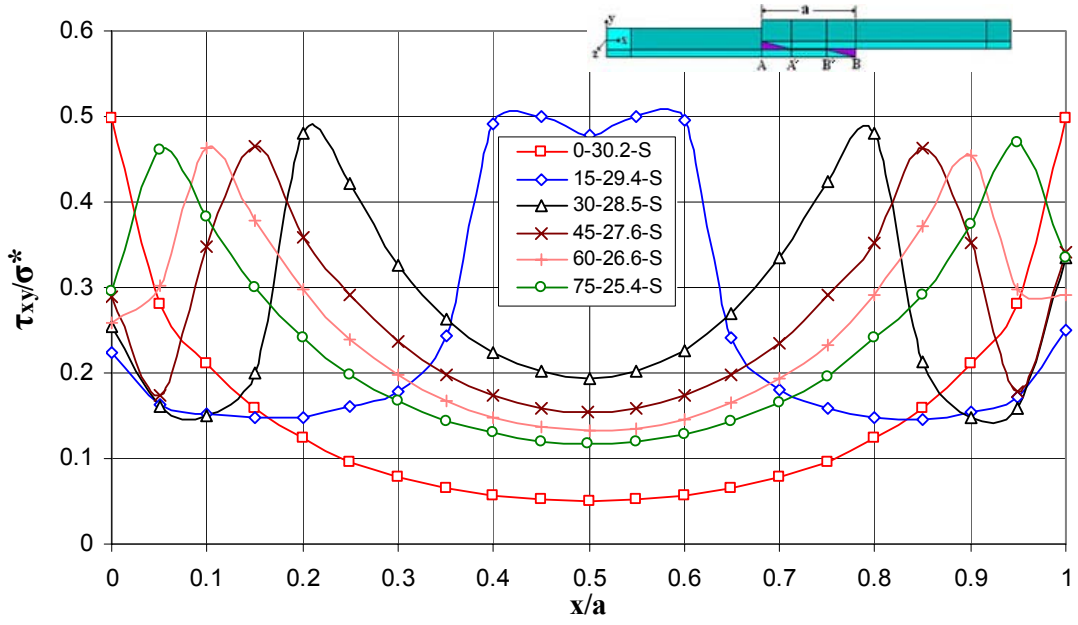
Şekil 6.18.a



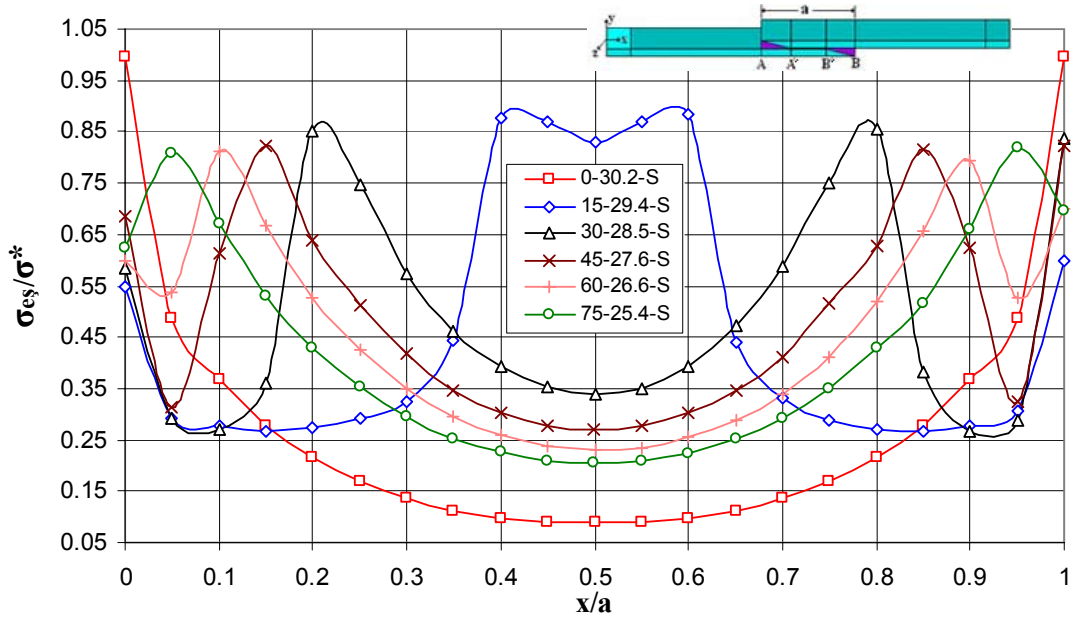
Şekil 6.18.b



Şekil 6.18.c



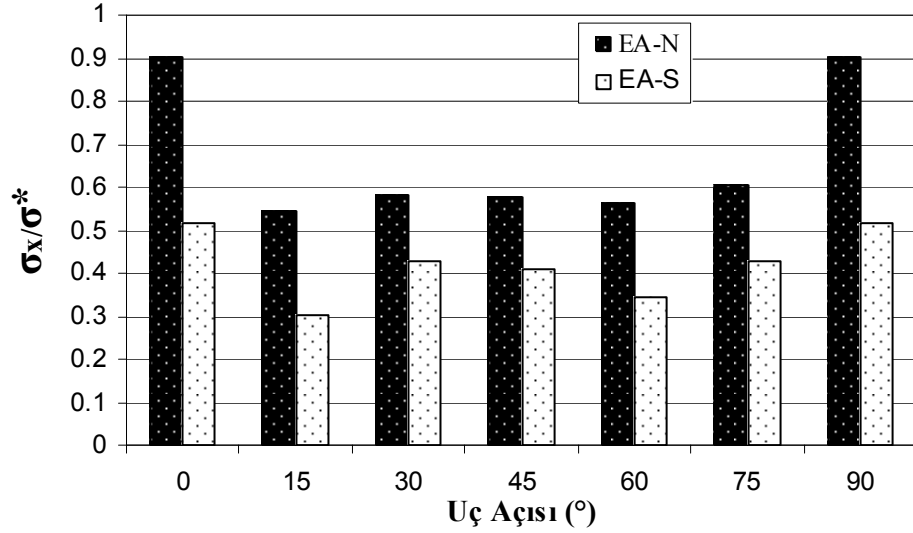
Şekil 6.18.d



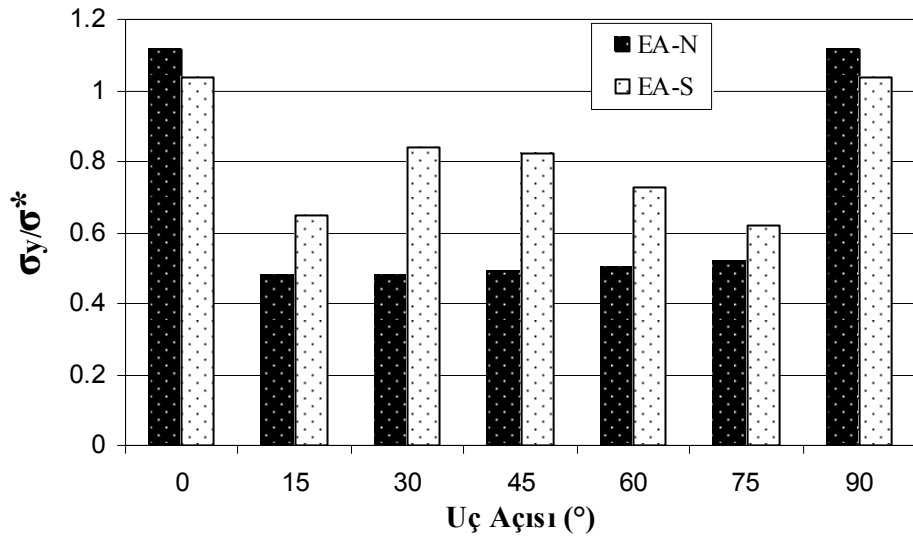
Şekil 6.18.e

Şekil 6.18. SikaForce 7710 ile birleştirilmiş eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı uç açısının A-B hattı boyunca yapıştırıcı tarafında oluşan; (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme dağılımları üzerine etkisi (S: SikaForce 7710).

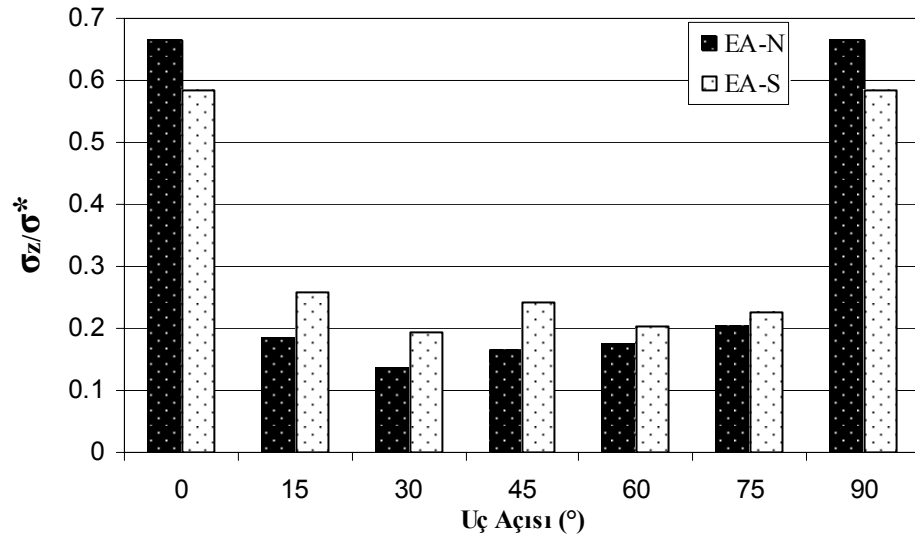
Çekme yüküne maruz eşit yapıştırma alanına sahip tek tesirli bir yapıştırma bağlantısında serbest uç açısının değişiminde meydana gelen artışla Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak hazırlanmış bağlantıların performansında meydana gelen değişiklikler aşağıdaki grafikler ile izah edilmeye çalışılmıştır.



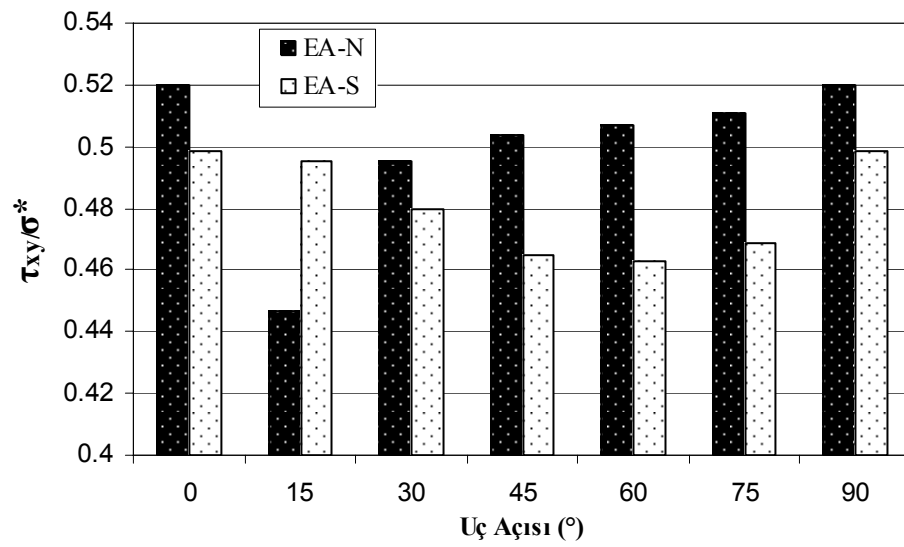
Şekil 6.19.a



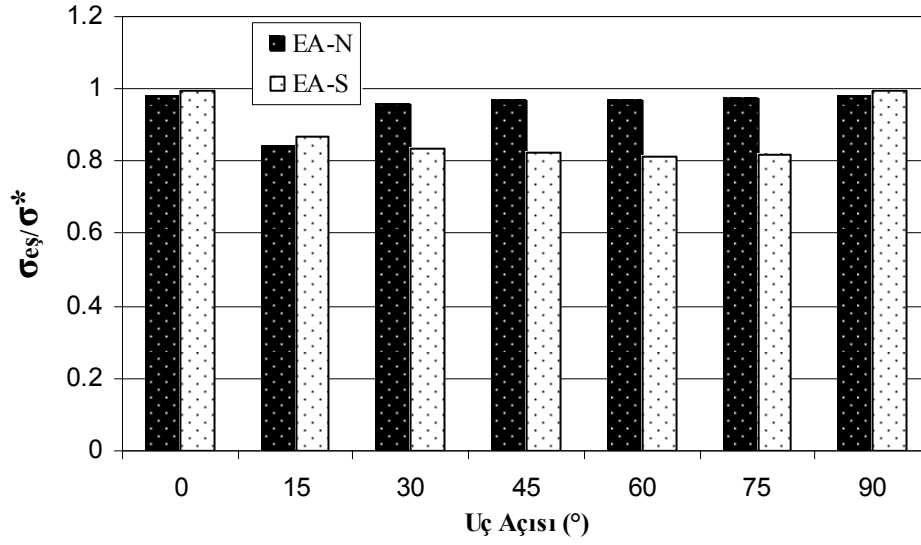
Şekil 6.19.b



Şekil 6.19.c



Şekil 6.19.d



Şekil 6.19.e

Şekil 6.19. İki farklı yapıştırıcı ile yapıştırılmış eşit yapıştırma alanına sahip bağlantılarda serbest uç açısının maksimum (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme oranları açısından karşılaştırılması (EA: Eşit Alan, N: Neoxil, S: SikaForce).

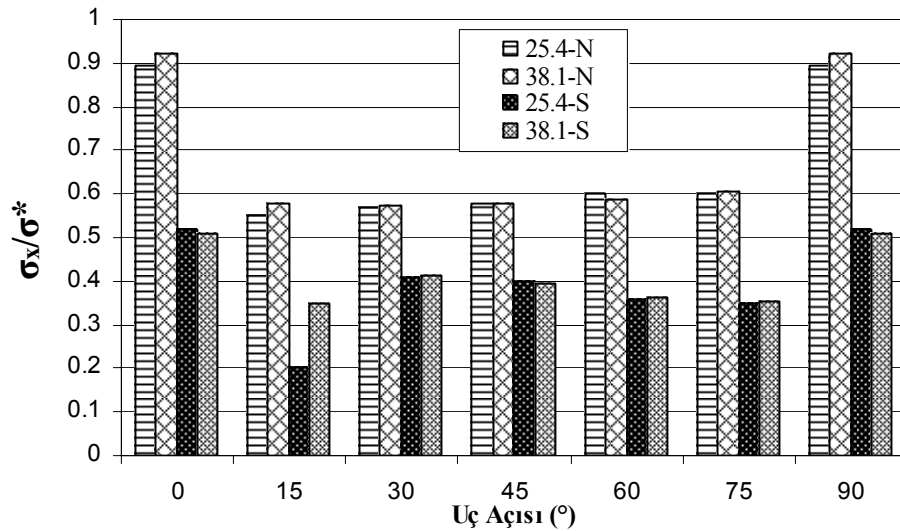
Şekil 6.19.a dan da görüleceği üzere Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 ile birleştirilmiş bağlantılarda analiz edilmek üzere seçilen tüm gerilmelerin maksimum oranları 0° de, minimum gerilme oranları ise 15° de meydana gelmektedir. 15° de, Neoxil ile birleştirilmiş numunelerde meydana gelen maksimum normal gerilme oranı SikaForce ile birleştirilen bağlantıda meydana gelen maksimum normal gerilme oranından yaklaşık olarak 1.79 kat daha yüksektir (Şekil 6.19a).

Yapıştırıcılar soyulma gerilmesi (σ_y) açısından karşılaştırıldığında 0° de meydana gelen soyulma gerilmelerinin her iki yapıştırıcı içinde tüm açı değerleri içerisinde ortaya çıkan en yüksek gerilme oranlarını verdiği ve her iki yapıştırıcı içinde ortaya çıkan sonuçların birbirine yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. En düşük soyulma gerilmesi, normal σ_x gerilmesinde olduğu gibi 15° de meydana gelmektedir. Açı arttırıldığında Neoxil ve SikaForce ile yapıştırılan bağlantılarda oluşan maksimum soyulma gerilmeleri arasındaki fark da artmaktadır (Şekil 6.19.b).

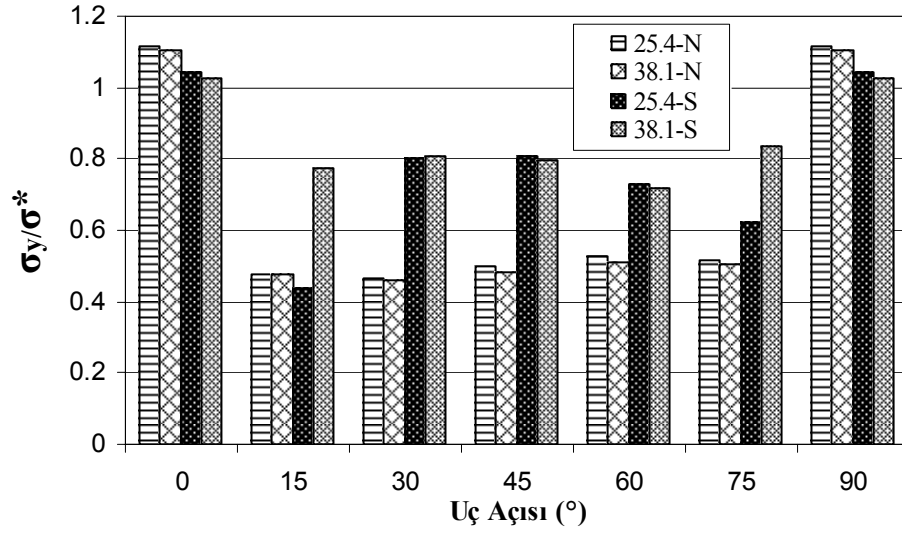
Maksimum normal (σ_z) gerilme değerleri, soyulma gerilmesi değerlerine benzer şekilde 0° de hem Neoxil hem de SikaForce ile birleştirilen bağlantılarda en yüksek değerlerine ulaşmış 30° uç açısına sahip bağlantılarda ise her iki yapıştırıcı için en düşük gerilme değerleri gözlenmiştir (Şekil 6.19.c).

Şekil 6.19.d de uç açısına ve yapıştırıcı tipine bağlı olarak maksimum kayma gerilmeleri görülmektedir. Maksimum kayma gerilmesi değerleri 15°'nin dışında kalan tüm açı değerlerinde Neoxil ile birleştirilmiş bağlantılarda SikaForce ile birleştirilen bağlantılardan daha yüksek meydana gelmiştir. 15° de ise SikaForce ile birleştirilen bağlantıda ortaya çıkan maksimum kayma gerilmesinin değeri Neoxil ile birleştirilen bağlantıdakinden daha yüksektir. Tüm açılar göz önüne alındığında her iki yapıştırıcı içinde kayma gerilmelerinin maksimum değeri 0° de meydana gelmektedir.

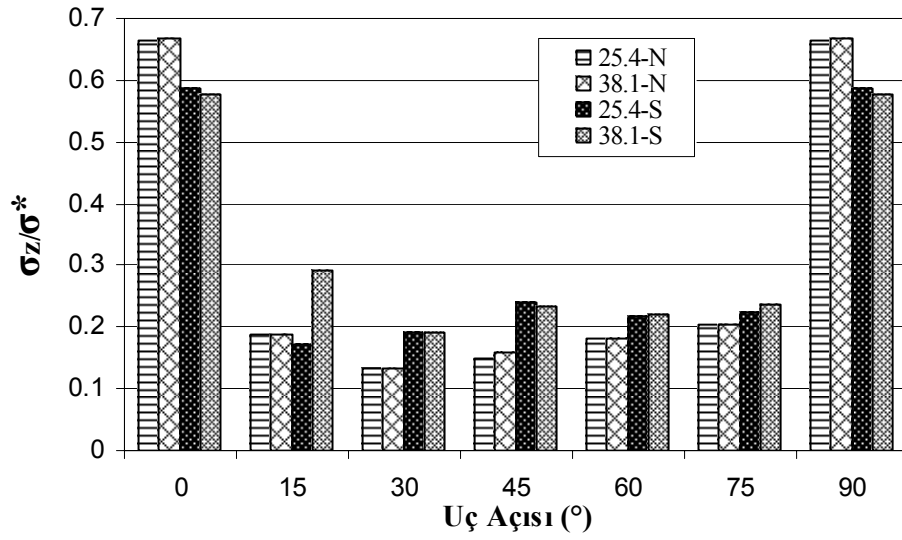
Şekil 6.19.e de ise eşdeğer gerilme oranları görülmektedir. Eşdeğer gerilmelerin maksimum değerleri seçilen diğer gerilme bileşenleri içerisinde uç açısının değişiminden en az etkilenen gerilme bileşeni olarak görülmektedir. 0° ve 15° de SikaForce ile birleştirilen bağlantılarda oluşan eşdeğer gerilme oranları Neoxil ile birleştirilenlerden yüksek iken 30, 45, 60 ve 75° de ise Neoxil ile birleştirilen numunelerin eşdeğer gerilme oranları SikaForce ile birleştirilen numunelerinkinden daha yüksektir.



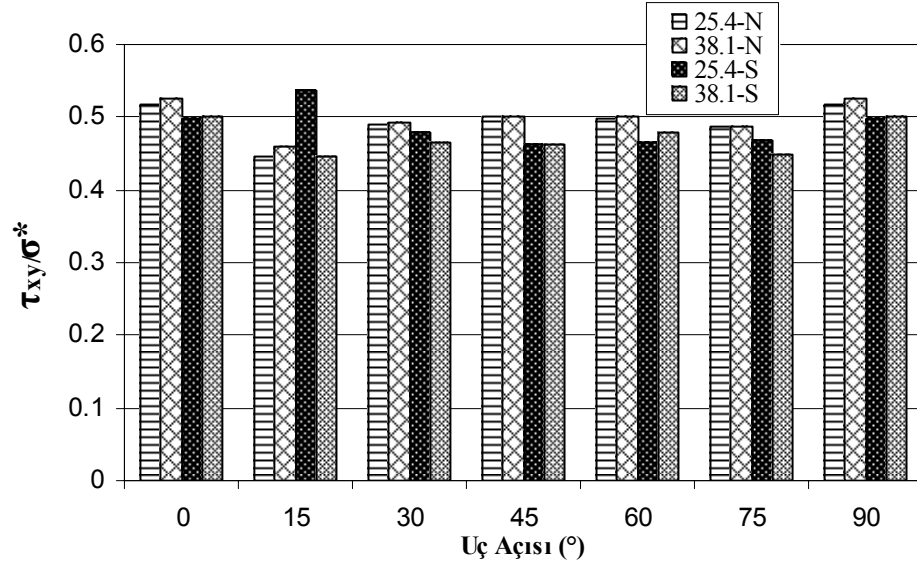
Şekil 6.20.a



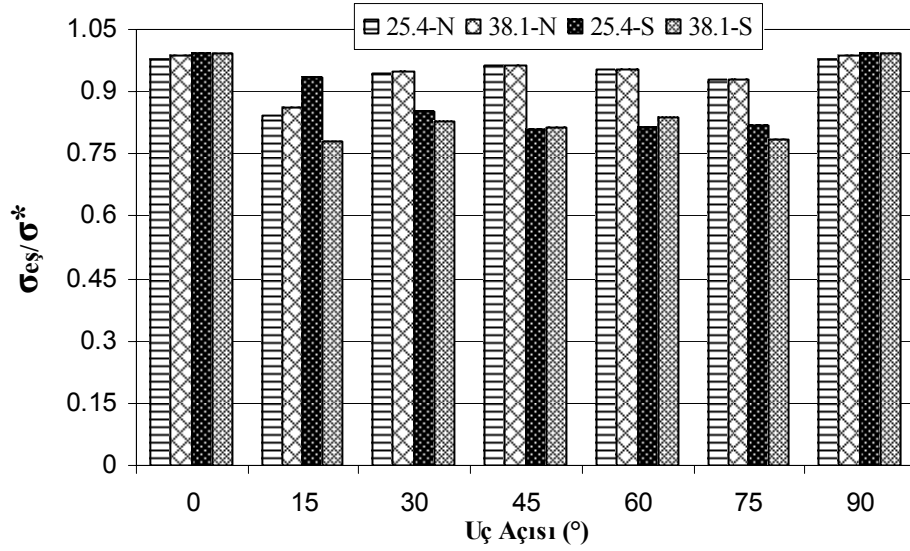
Şekil 6.20.b



Şekil 6.20.c



Şekil 6.20.d



Şekil 6.20.e

Şekil 6.20. İki farklı yapıştırıcı ile birleştirilmiş 25.4 ve 38.1 mm bindirme mesafesine sahip bağlantılarda bindirme mesafesi ve serbest uç açısının maksimum (a) normal (σ_x), (b) soyulma (σ_y), (c) normal (σ_z), (d) kayma ve (e) eşdeğer gerilme oranları açısından karşılaştırılması (EA: Eşit Alan, N: Neoxil, S: SikaForce).

Şekil 6.20. genel olarak incelendiğinde 25.4 ve 38.1 mm bindirme mesafesinin her ikisi için Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantıların tamamında gerilmelerin maksimum değerlerinin 0° de meydana geldiği ve bu değerlerin bindirme mesafesindeki artıştan daha çok uç açısının değişiminden etkilendiği görülmektedir.

Soyulma gerilmeleri göz önüne alındığında 0° de Neoxil ile birleştirilmiş bağlantılarda meydana gelen soyulma gerilmeleri SikaForce ile birleştirilen bağlantılarından daha yüksektir (Şekil 6.20.b). Bu durum, eğilme momentinden kaynaklanan dönmeleri SikaForce'un, Neoxil'den daha iyi tolere edebildiğini ve soyulma gerilmesi açısından dayanımının daha iyi olduğunu göstermektedir. 0° nin dışında kalan diğer uç açılarında ise SikaForce ile birleştirilmiş numunelerde A' ve B' noktalarına transfer edilen soyulma gerilmesi değerlerinin Neoxil ile birleştirilen ve maksimum değerleri A ve B bölgelerinde oluşan soyulma gerilmelerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Normal (σ_z) gerilmesinin bindirme mesafesi ve açılara göre dağılımı soyulma gerilmesi ile benzer bir dağılım sergilemiştir (Şekil 6.20.c).

Tüm açı değerlerinde Neoxil ile birleştirilmiş numunelerde oluşan kayma gerilmelerinin maksimum değerleri SikaForce ile birleştirilen numunelerden daha yüksektir (Şekil 6.20.d).

0° de 25.4 ve 38.1 mm bindirme mesafesinde her iki yapıştırıcı içinde meydana gelen eşdeğer gerilme değerleri birbirine çok yakın iken 0° nin dışında kalan diğer 5 açı değerinde ise Neoxil ile birleştirilen numunelerde ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilmeler SikaForce ile birleştirilen numunelerde meydana gelen eşdeğer gerilme değerlerinden daha yüksektir. Bu durum daha önceki kısımlarda vurgulandığı gibi şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan SikaForce 7710'un uç kısımlarda meydana gelen gerilmeleri yapıştırıcı bağlantının orta kısımlarına transfer ederek meydana gelen gerilmeleri Neoxil CE92 N8'den daha iyi tolere edebildiğini göstermektedir.

7. SONUÇLAR

Yapısal yapıştırıcıların doğru olarak tespit edilmiş mekanik özelliklerine, 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 uniform 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, elastisite modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma uzunluğuna, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine, yapışma işlemine ve yapıştırıcı birleştirmeli bağlantının maruz kalacağı çevresel şartlara bağlıdır.

Bu çalışmada; iki farklı özelliğe sahip yapıştırıcı kullanılarak farklı bindirme mesafelerinde farklı uç açısına sahip malzemeler (adherent) birleştirilmiştir. Elde edilen numuneler çekme deneyine tabi tutulmuş ve bu deneyler neticesinde bağlantıların hasar kuvvetleri ve hasar tipleri tespit edilmiştir.

Çekme deneyi neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tüm bindirme mesafeleri ve tüm açı değerleri kullanılarak hazırlanan numuneler için çekme deneyi neticesinde hasara uğrayan yapıştırma yüzeyleri incelendiğinde 0° (90° ya da açısız) uç açısına sahip numunelerde meydana gelen hasar tipinin “kohosiv hasarı”, uç açısı 0°’nin dışında kalan tüm numunelerde ise “özel kohosiv hasarı” olduğu görülmüştür.

Her iki yapıştırıcı ile yapıştırılan bağlantıların dayanımı 0° de en düşüktür. Uç açısı arttırıldığında yapıştırıcı dayanımı da artmaktadır. Çalışmada kullanılan uç açıları değerlendirildiğinde bağlantıların maksimum dayanıma 15° uç açısında ulaştıkları görülmüştür (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2).

Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılarak oluşturulan Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’den de görüleceği üzere bindirme mesafesi arttıkça hem Neoxil CE92 N8 hem de SikaForce 7710 ile birleştirilen bağlantıların dayanımı artmıştır.

Artan bindirme mesafesi yapışma bölgesinde meydana gelen ortalama kayma gerilmelerini azaltmış dolayısı ile bağlantının kayma dayanımına olumlu yönde katkı sağlamıştır (Şekil 6.3 ve Şekil 6.4).

Bir yapıştırıcının kayma dayanımı (τ_{xy}), bağlantıdaki normal gerilmeler tamamıyla çıkarılırsa belirlenebilir. Birçok durumda yapıştırıcı tabakasında normal gerilmeler (σ_x, σ_y) hasarı kontrol eder. Bunun sonucu olarak ASTM D1002’de tanımlanan yöntemle, tek tesirli bindirme bağlantısının kayma dayanımı belirlenemez. Elde edilen kayma dayanımı, gerilme yığılmaları kritik bir seviyeye ulaştığında ve hasar oluştuğunda meydana gelen basit ortalama kayma gerilmeleridir. Yapıştırıcının gerçek kayma dayanımı değildir[65].

Ortalama kayma gerilmesi (τ_{ort}), yapıştırıcıya ait malzeme özelliklerini temsil etmez. Bundan dolayı, tek başına tasarım parametresi olarak kullanılamaz[65].

Neoxil CE92 N8, SikaForce 7710’dan yaklaşık olarak 4.16 kat daha yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen, çekme yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısında uç açısı ve bindirme uzunluğundaki artışla, SikaForce 7710 ile birleştirilmiş numunelerin, Neoxil CE92 N8 kullanılarak birleştirilen numunelerden daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Bahsedilen bu durum özellikle 0°’nin üstündeki uç açılarında daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Çekme yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantılarında çekme kuvvetinin eksantrikliğinden dolayı bindirme bölgesinde eğilme momenti oluşmaktadır. Oluşan bu eğilme momenti bindirme bölgesinin serbest uçlarında soyulma gerilmelerine neden olmaktadır. Tek tesirli bindirme bağlantılarında hasarın başlıca nedeni eğilme momentinden dolayı oluşan soyulma gerilmeleridir.

Neoxil CE92 N8, SikaForce 7710’dan daha yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen bağlantıdaki performansı SikaForce 7710’dan daha kötüdür. Bunun nedeni daha esnek bir

yapıştırıcı olan SikaForce 7710'un bağlantının uç bölgelerinde meydana gelen soyulma gerilmelerini (σ_y) daha düzgün dağıtarak büyük şekil değişimlerini üzerine almasından kaynaklanmaktadır.

Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 kullanılarak 6 farklı uç açısında ve farklı bindirme mesafelerinde birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantıları için, yapıştırıcılar (adhesives) ve yapıştırılan malzemelerin (adherents) gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınarak lineer sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Çekme deneyi neticesinde elde edilen hasar yükleri ile sonlu elemanlar analizi sonucunda tahmin edilen hasar yükleri arasında oldukça iyi bir uyumun olduğu görülmüştür (Tablo 6.3).

Sonlu eleman analiz sonuçları, çekme yüküne maruz yapıştırma bağlantılarında meydana gelen maksimum eşdeğer gerilmelerin yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde meydana geldiğini göstermiştir.

En kritik noktalar, 0° de Neoxil CE92 N8 ve SikaForce 7710 ile birleştirilmiş numunelerin tamamı için $x=0$ ve $x=a$ da (A ve B noktası) meydana gelirken 0° 'nin dışındaki açı değerlerinde Neoxil ve SikaForce ile birleştirilen bağlantılar için yapıştırıcı tabakasının farklı bölgelerinde oluştuğunu göstermiştir.

Çekme yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme uzunluğu arttırıldığında bağlantının taşıyabildiği yük miktarında her iki yapıştırıcı için de artış olmuştur.

0° nin dışında kalan uç açılarında ara yüzeyde meydana gelen eşdeğer gerilmelerin maksimum değerleri SikaForce 7710 ile birleştirilmiş numunelerde A' ve B' noktalarında meydana gelmekte ve bindirme mesafesi arttıkça bu gerilme değerleri azalmaktadır. Neoxil CE92 N8 ile birleştirilen bağlantılarda ise maksimum eşdeğer gerilmeler daima bağlantının uç kısımlarında (A ve B noktaları) oluşmakta ve bindirme mesafesinin artmasıyla çok fazla bir değişim göstermemektedir.

Sadece uç açısının etkisini gözlemleyebilmek için gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar, maksimum gerilmelerin bağlantının uç kısımlarında ve 0° de minimum gerilmelerin ise 15° de meydana geldiğini göstermiştir.

Soyulma gerilmeleri göz önüne alındığında 0 ile 15° arasında Neoxil ile birleştirilen bağlantılarda yaklaşık olarak 2.33 katlık bir fark SikaForce ile birleştirilen numuneler arasında ise yaklaşık olarak 1.61 katlık bir fark söz konusudur. Bu sonuç yapıştırıcılar ile gerçekleştirilecek bağlantı tasarımlarında serbest uç açısının önemli bir parametre olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada serbest uç açısının 15°

olarak alınması bağlantı performansını arttırmak için en uygun açı değeri olarak tespit edilmiştir.

Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılarda şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan yapıştırıcılar kullanıldığında A-B hattı boyunca meydana gelen σ_x , σ_y ve σ_z gerilmelerinin maksimum değerleri, tüm açı değerlerinde A ve B noktalarında, τ_{xy} ve $\sigma_{eş}$ gerilmelerinin maksimum değerleri ise 0° de A ve B noktalarında, 0° nin dışındaki açı değerlerinde ise bağlantının daha iç kısımlarında kalan A' ve B' noktalarına transfer edilmektedir.

SikaForce 7710'lu bağlantı yapıştırıcı tabakasında oluşan eşdeğer gerilme dağılımlarını Neoxil CE92 N8'e göre bindirmenin serbest uçlarından merkezine doğru daha iyi transfer ettiğiinden daha fazla yük taşımıştır.

KAYNAKLAR

1. ASTM D907-74, 1974, Definition of Terms Relating to Adhesives.
2. Shields, J., 1975 Adhesive Bonding, The Design Council, The British Standards Institution and The Council of Engineering Institutions, Oxford University Press.
3. Tomblin, J.S., Yang, C. and Harter, P., 2001, Investigation in thick bond line adhesive joint, Final Report, DOT/FAA/AR-01/33, US., Department of Transportation, Washington, DC.
4. Van Rijn, L.P., 1996, Towards the fastenerless composite design”, Composites Part A, 27A, 915-920.
5. Kinloch, A.J., 1987, Adhesion and adhesives science and technology, Chapman&Hall, ISBN 0-412-27440-X, p.441, London.
6. Loctite Worldwide Design Handbook, 1988.
7. Volkersen, O., 1938, Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, vol 15, 41-47.
8. Goland, M. and Reissner, E., 1944, The Stresses in Cemented Joints, Journal of Applied Mechanics, vol 11, 59-45.
9. Benson, N.K., 1969, Influence of Stress Distribution on Joint Strength, Adhesion Fundamentals and Practice, UK Ministry Technology, McLaren, London, pp 191.
10. Demarkless, L.R., 1955, Investigation of the Use of a Rubber Analog in the Study of Stress Distribution in Riveted and Cemented Joints, Tech. Note 3413, Nat. Advisory Committee Aeronautics, Washington, D.C.
11. Sazhin, A.M., 1964, Determining the Stresses in Bonded Joints Between Metal Plates”, Russian Engineering Journal, vol 44, no 11, 45-49.
12. Segerlind, L.J., 1968, On the Shear Stresses in Bonded Joints, Transactions of ASME J. of Appl. Mech., vol 35, no 1, 177-178.
13. Hart-Smith, L.J., 1973, Adhesive-bonded single-lap joints, CR-112235, Nasa Langley Research Center,.
14. Ojalvo, I.U., Idinoff, H.L., 1978, “Bond thickness upon stresses in single-lap adhesive joints, AIAA Journal, vol 16(3), 204-211.
15. Carpenter, W., 1980, Stresses in bonded connections using finite elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol 30, 1659-1680.
16. Oplinger, D.W., 1994, Effects of adherent deflection on single lap joints, International of Solids and Structures, vol 31, 2565-2587 ,

17. Kline, R.A., 1982, Stress Analysis of Adhesively Bonded Joints, Proceedint of the International Symposium on Adhesive Joints, H,Kansas City, 587-610.
18. Muki, R. and Sternberg, E., 1968, On The Stres Analysis of Overlapping Bonded Elastic Sheets, *Int. J. Solids Structures*, vol 4, 75-94.
19. Erdogan, F., 1969, Distribution of Adhesive Shear Stres in a Stiffened Plate, Technical Progress Report NASA Grant no NGR 39-007-011.
20. Erdogan, F. and Ratwani, M., 1971, Stress Distribution in Bonded Joints, *J. Composite Materials*, vol 15, 378-393.
21. Wah, T., 1973, Stress Distribution in a Bonded Anisotropic Lap Joint, *Transactions of ASME, Series H, J. of Engineering Materials and Techonology*, vol 95, 174-181.
22. Chang, D.J. and Muki, R., 1974, Stress Distribution in a Lap Joint under Tension-Shear, *Int. J. Solids Structures*, vol 10, 503-517.
23. Adams, R.D., 1989, Strength Predictions for Lap-Joints, Especially with Composite Adherents, *Journal of Adhesion*, vol 30, 219-242.
24. Mazumdar, S.K. and Mallick, P.K., 1998, Static and Fatigue Behaviour of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites, *Polymer Composites*, vol, 19, 139-146.
25. Hart-Smith, L.J., 1982, Design methodology for bonded-bolted composite joints Technical Report AFWAL-TR-81-3154, Douglas Aircraft Company.
26. Hart-Smith, L.J., 1985, Bonded-bolted composite joints, *J. Aircraft*, vol 22(11), 993-1000.
27. Chan, W.S. and Vedhagiri, S., 2001 Analysis of composites bolted-bonded joints used in repairing, *J. Compos. Mater*, vol 35(12), 1045-1061.
28. Fu Maofeng and Mallick, P.K., 2001, Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 21, 145-159.
29. Pfeiffer, P. and Shakal, M., 1998, Effect of Bonded Metal Substrate Area and its Thickness on the Strenght and Durability of Adhesively Bonded Joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol 12, 339-348.
30. Gali, S., Doley, G. and Ishai, O., 1981, An effective stres-strain concept in the mechanical characterization of stcuctural adhesive bonding, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 1(3), 135-140.
31. Chalkley, P.D. and Chiu, W.K., 1993, An improved method for testing the shear stres-strain behaviour of adhesives, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 13(4), 237-242.
32. Wang, C.H. and Chalkley, P., 2000, Plastic yielding of a film adhesive under multi-axial stresses, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 20, 155-164.

33. Vooley, G.R. and Carver, D.R., 1971, Stress concentration factors for bonded lap joint, *J. Aircraft*, vol 8, 817-820.
34. Carpenter, W.C. and Borsoum, R., 1989, Two finite element for modeling the adhesive bonded configuration, *J. Adhes.*, vol 30, 25-46.
35. Tsai, M.Y. and Morton, J., 1995, The effect of a spew filet on adhesive stress distribution in laminated single-lap joints, *Computers and Structures*, vol 32, 13-131.
36. Richardson, G., Crocombe, A.D. and Smith, P.A., 1993, A comparison of two and three-dimensional finite element analysis of adhesive joints, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 13, 193-200.
37. Li, G. and Lee-Sullivan, P., 2001, Finite element and experimental studies on single-lap balanced joint in tension, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 21, 211-220.
38. Andruet, R.H., Dillard, D.A. and Holzer, A.M., 2001, Two and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 21, 17-34.
39. Pandey, P.C., Shankaragouda, H. And Singh, Kr.A., 1999, Nonlinear Analysis of Adhesively Bonded Lap Joints Considering Viscoplasticity in Adhesives, *Computers and Structures*, vol 70, 387-413.
40. Adams, R.D., and Peppiat, N.A., 1974, Stress Analysis of Adhesive Bonded Lap Joints, *J.of Strain Analysis*, vol 9(3) 185-196.
41. Apalak, M.K. ve Güneş, R., 2002, On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single-lap joint, *Computers and Structures*, vol 80, 85-98.
42. Lee, S.J. and Lee, W.C., 1995, Optimal-design of the adhesively bonded tubular single lap joint, *Journal of Adhes.*, vol 50(2-3), 165-80.
43. Reedy, S.J. and Guess, T.R., 1996, Butt joint strength and effect of residual-stress and stress-relaxation, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol 10(1), 33-45.
44. Ioka, S., Kubo, S., Ohji, K. and Kishimoto, J., 1996, Thermal residual stresses in bonded dissimilar materials and their singularities, *JSME Int. J. Ser A-Mech. Mater Engng.*, vol 39(2), 197-203.
45. Humfeld G.R. and Dillard, D.A., 1998, Residual stress development in adhesive joints subjected to thermal cycling, *J. Adhes.*, vol 65(1-4), 277-306.
46. Abedian, A. and Szyszkowski, W., 1999, Effects of surface geometry of composites on thermal stress distribution a numerical study, *Composites Science and Technology*, vol 59(1), 41-54.

47. Harris, J.A. and Adams, R.D., 1984, Strength prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite element method, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 4(2), 65-78.
48. Sancaktar, E. and Simmons, S.R., 2000, Optimization of adhesively bonded single lap joints by adherent notching, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol 14(11), 1363-1404.
49. Avila, A.F. and Bueno, P.O., 2004, Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, vol 24, 407-414.
50. Kelly, G., 2005, Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints, *Composite Structures*, vol 69, 35-43.
51. Bigwood, D.A. and Crocombe, 1990, A.D., Nonlinear adhesive bonded joint design analyses, *Int. J. Adhes.*, vol 10, 31-41.
52. Goncalves, J.P.M., De Moura, M.F.S.F. and De Castro, P.M.S.T., 2002, A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints, *Int. J. Adhes.*, vol 22, 357-365.
53. Lang, T.P. and Mallick, P.K., 1998, Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints, *Int. J. Adhes.*, vol 18, 167-177.
54. Dorn, L. and Liu, W., 1993, Stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints, *Int. J. Adhes.*, vol 13, 21-31.
55. Taib, A.A., Boukhili, R., Achion, S. and Boukehili, A., 2006, Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol 26, 237- 248.
56. Kaya, A., Tekelioğlu, M.S. ve Findik, F., 2004, Effects of various parameters on dynamic characteristics in adhesively bonded joints, *Materials Letters*, vol 58, 3451-3456.
57. Özel, A., Aydın, M.D. ve Temiz, Ş., 2004, The effects of overlap length and adherent thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment, *J. Adhesion Sci. Technology*, vol 18(3), 313-325.
58. Aydın, M.D., Özel, A. and Temiz, Ş., 2005, The effect of adherent thickness on the failure of adhesively bonded single-lap joints, *J. Adhesion Sci. Technology*, vol 19(8), 705-718.
59. Temiz, Ş., Aydın, M.D., Alar, G. ve Özel, A., 2005, Nemli ortamlara maruz yapısal yapıştırıcıların dayanımı, TMMOB Makine Müh. Odası IX. Otomotiv ve yan sanayi sempozyumu, 27-28 Mayıs.

60. Kaya, A., 1991, Investigation of stres distributions in adhesive-bonded lap joint, MS. Degree Thesis, Dokuz Eylul University, Institute of Science and Technology, p.
61. Apalak, Z.G., 1995, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş T-tipi bağlantıların sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz ve tasarımı, Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 252s.
62. Kodakoğlu, L., 1996, Yapıştırıcıların genel özellikleri ve çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesinin analitik ve nümerik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 139s.
63. Engin, A., 1997, 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, 130s.
64. Şekercioğlu, T., 2001, Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 124s.
65. Aydın, M.D., 2003, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 179s.
66. Kaya, F., 2004, Yapıştırıcılar, Birsen Yayınevi, İstanbul, 318s.
67. Houwink, R. and Salomon, G., 1965, Adhesion and Adhesives, 2nd edition, Elsevier Publishing Co.
68. Wake, W.C., 1986, Adhesion and the Formulation of Adhesives, Structural Adhesives in Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE, C151/86, pp 161-168.
69. Aktaş, R. Ve Otobatmaz, I., 1995, Kompozit Malzemeler ve Havacılık Sanayindeki Uygulamaları, Seminer Notları, Ankra.
70. Morrisey, M.A. and Johnson, W.R., 1985, Douglas Aircraft Company Design Handbook, Adhesive and Cements, California.
71. CIBA-GEIGY, 1993, Ciba composites: Redux Bonding Technology, Duxford-Chambridge, Pub. No. RGU 201A.
72. Adams, R.D. and Wake, W.C., 1984, Structura Adhesive Joint in Engineering, Elsevier Scinece Publisher, London.
73. Sika Teknoloji Klavuzu, 2008.
74. Temiz, S., 2003, Study of the Effect of Environmental Factors on Mechanical Properties of Adhesively Bonded Joints, Ph. D. Thesis, Ataturk University, Erzurum, Turkey.

75. Kayacan, R.,1988, Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 240s.
76. Sika Teknoloji Klavuzu, 2008.
77. Apalak, M.K., 1998, Yapıştırıcı ile Metalleri Birleştirme Tekniği, Makine Bülteni, vol 7, no 11, sayfa 29-31.
78. Rende, H., 1996, Makine Elemanları Cilt 1, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
79. Bozacı, A., Koşif, İ, Çolak, Ö.Ü., Makine Elemanlarının Projelendirilmesi, Seç Yayın Dağıtım İstanbul.
80. Cerit, A.M., Makine Mühendisliği El Kitabı-Üretim ve Tasarım Cilt 2, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Yayın no:170, Ankara.
81. Gediktaş, M., 1972, Yapıştırma Bağlantıları, Mühendis ve Makine, cilt no 20, sayı no 229, sayfa 27-33.
82. Mallick, P.K., 1977, Composites Engineering Handbook Einband 1. Marcel Dekker, Inc.
83. Joneer, R.M., 1999, Mechanics Of Composite Materials, Second Edition, Taylor&Francis Publishing.
84. Sayman, O. ve Aksoy, S., 1982, Kompozit Malzemeler, Ege Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.
85. Petrie, E.M., 1975, Handbook of Plastics and Elastomers, McGraw-Hill, New York.
86. http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit
87. Akkurt, S., Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, 224s.
88. <http://www.camelyaf.com.tr/turkce/doc/polyester/ce92n8.pdf>
89. <http://www.sika.dk>
90. Aydın, M.D., Temiz, Ş. ve Özel, A., Yapısal Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlendiği Deneysel Yöntemler, Mühendis ve Makine, Cilt 45(536), sayfa 18-24.
91. Dean, G.D. and Duncan, B.C., 1995, Tensile Behaviour of Bulk Specimens of Adhesives, NPL Report DMM(B) 448, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.
92. Duncan, B.C. and Tomblins, P.E., 1994, Measurement of Strain in Bulk Adhesive Testpieces, NPL Report DMM(B) 398, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.
93. Amijima, S. and Fuji. T., 1989, Extension of a one dimensional finite element model program for analyzing elastic-plastic stresses and progressive failure of adhesive bonded joints, Int. J. of Adhesion and Adhesives, vol 9(4), 415-436.

94. Özel, A., Kadioglu, F., Sen, S. and Sadeler, R., 2003, Finite element analysis of adhesive joints in four point bending load, *Journal of Adhesion*, vol 79(7), 683-697.
95. Tsai, M.Y., Oplinger, D.W. and Morton, J., 1998, Improved theoretical solutions for adhesive lap joints, *Int. J. Solids Structures*, vol 35(12), 1163-1185.
96. <http://www.figes.com.tr/urunler/ansys/ansys.php>
97. Turgut, A., Gür, M., ve Arslan, N., 1995, Birleştirmelerde kullanılan yapıştırıcı malzemelerin polimerleştirme sıcaklığının ve süresinin çekme mukavemeti ve elastisite modülüne etkilerinin araştırılması, *Uluslararası Havacılık ve İleri Teknolojiler Sempozyumu, İ.T.Ü., İstanbul*.
98. Turgut, A., and Sancaktar, E., 1992, Viscoelastic and Processing Effects on The Fiber Matrix Interphase Strength, *Journal of Adhesion*, v.38, 111-129.
99. Turgut, A., and Sancaktar, E., (1991) The Effects of Cure and Loading Conditions on Fiber matrix Adhesion, *The Adhesion Society*, v.41,24-26

ÖZGEÇMİŞ

M. Yavuz SOLMAZ, 1974 yılında Diyarbakır'da doğdu. 1992 yılında Elazığ Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. 1993 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 1997 yılında mezun oldu. 1999 yılında Eskişehir 1. Ana Jet Üssü'nde Yedek Subay olarak askerlik görevini tamamladı. 1999 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D.'da yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2000 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Arş. Gör. olarak atandı. 2003 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği A.B.D.'da doktora öğrenimine başladı. Halen aynı üniversitede Uzman olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.