

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM-BAKIR BORULARIN
YAPIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisi Kemal ÖZEL**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME VE İMALAT

HAZİRAN 2008

**ALÜMİNYUM-BAKIR BORULARIN
YAPIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisi Kemal ÖZEL
(503061305)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Barlas ERYÜREK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Nurullah GÜLTEKİN (Yıldız Tek. Üniv.)
Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU (İTÜ)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Geleneksel birleştirme yöntemlerine göre birçok avantajı olan yapıştırma işlemi her geçen gün sanayi uygulamalarındaki kullanım alanını artırmaktadır. Özellikle kolay uygulanabilir olması ve birleştirmelerde ek malzeme gerektirmediğinden hafiflik ve maliyet kazancı sağlaması yapıştırma birleştirmelerini cazip hale getiren en önemli etkenlerdir. Bu yüksek lisans tezinde alüminyum-bakır boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesi üzerine çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde değerli birikimi ile bana destek olan, yardımlarını esirgemeyen ve yol gösteren saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Barlas ERYÜREK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasına teknik destek sağlayan Arçelik A.Ş. Ar-Ge Direktörü Sayın Dr. Cemil İNAN'a, Ar-Ge Mekanik Teknolojiler Yöneticisi Sayın Fatih ÖZKADI'ya ve Ar-Ge Malzeme Teknolojileri Ailesi Lideri Sayın Sibel ODABAŞ'a teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince maddi, manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve yardımlarını esirgemeyen, değerli fikirleri ile yapıcı yönlendirmelerde bulunan Ar-Ge Uzmanı Sayın Dr. Feriha SERTÇELİK BİROL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez hazırlama sürecinin her aşamasında en az benim kadar emek ve katkısı bulunan Malzeme Mühendisi Aslı GENCER'e, yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Ar-Ge Mühendisi Celal VATANSEVER'e ve eksiksiz ilgileri için tüm Arçelik A.Ş. Ar-Ge Malzeme Teknolojileri Ailesi çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, daima yanımda olduklarını bildiğim sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimin, akademik veya mesleki anlamda, yapıştırma birleştirmeleri üzerine çalışma yapacaklara yol gösterici bir kaynak olmasını ümit ederim.

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanması sırasında yapılmış olan tüm deneyler Arçelik A.Ş. Araştırma Geliştirme Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiş olduğundan, elde edilen teknik bilgiler Arçelik A.Ş.'nin izni olmadan kullanılamaz.

Haziran 2008

Kemal ÖZEL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI	1
2. YAPIŞTIRICILAR	4
2.1. Yapıştırıcıların Sınıflandırması	6
3. YAPIŞMA	9
3.1. Yapışma Teorileri	10
3.1.1. Mekanik Tutunma Teorisi (Yapışmanın Mekanik Teorisi)	10
3.1.2. Adsorpsiyon Teorisi	11
3.2. Yapışma Hasarları	12
3.3. Yapışma Etkenleri	17
4. YAPIŞTIRMA BİRLEŞTİRMELERİ	19
4.1. Yapıştırma Birleştirmelerinin Dayanımını Belirleyen Etkenler	19
4.1.1. Yüzey Hazırlığı	19
4.1.2. Yapıştırıcının Kurlenmesi	22
4.1.2.1. Sıcaklığın Kurlenmeye Etkisi	23
4.1.2.2. Basıncın Kurlenmeye Etkisi	26
4.1.3 Camsı Geçiş Sıcaklığı	27
4.1.4. Çalışma Ortamı Koşulları	29
4.1.4.1. Nemli Çalışma Ortamının Etkisi	30
4.1.4.2. Sıcaklığın Etkisi	36

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
5.1. Deney Numuneleri	40
5.1.1. Levha Numuneleri	41
5.1.2. Boru Numuneleri	42
5.1.3. Yapıştırıcılar	44
5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	45
5.2.1. Levha Numunelerinin Hazırlanması	45
5.2.2. Boru Numunelerinin Hazırlanması	48
5.3. Deneyler	50
5.3.1. Isıl Çevrim İle Yaşlanma Deneyi	51
5.3.2. Rutubet İle Yaşlanma Deneyi	53
5.3.3. Sızıntı Deneyi	53
5.3.4. Çekme Deneyleri	54
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	56
6.1. Isıl Çevrim İle Yaşlanma Deneyleri Sonuçları	56
6.1.1 Levha Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	57
6.1.2 Boru Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	65
6.2. Rutubet İle Yaşlanma Deneyleri Sonuçları	70
6.2.1 Levha Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	70
6.2.2 Boru Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları	76
6.3. Deneysel Bulguların Genel Değerlendirmesi	80
7. SONUÇLAR	91
8. ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	94
EKLER	96
EK-A	96
ÖZGEÇMİŞ	107

KISALTMALAR

AH	: Adezyon (Yapışma) Hasarı
ASTM	: American Society For Testing And Materials
BN	: Bağlı Nem
EN	: European Standards
IGK	: Isıl Genleşme Katsayısı
ISO	: International Organization For Standardization
KH	: Karışık Hasar
PU	: Poliüretan
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SGS	: Sıfır Gerilme Sıcaklığı
TS	: Türk Standartı
UV	: Mor Ötesi

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1	: Yapıştırma birleştirmelerinin üstünlükleri ve sınırlamaları.....	5
Tablo 3.1	: Çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki kritik yüzey enerjileri [8].....	9
Tablo 3.2	: Hasar türleri ve sebepleri	15
Tablo 4.1	: Suyun yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi [9]	31
Tablo 4.2	: Yapışma yüzeyi olarak çelik kullanılan deneyde, sıcaklığın birleştirme dayanımına etkisi	37
Tablo 4.3	: Yapıştırıcı birleştirmelerinde sıkça kullanılan bazı malzemelerin IGK'leri [4]	38
Tablo 5.1	: Deneylerde kullanılan yapıştırıcıların temel özellikleri*.....	44
Tablo 6.1	: da Silva ve Adams'ın çalışmalarında elde ettiği deneysel sonuçlar ...	59
Tablo A.1	: A yapıştırıcısının ısı çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları	96
Tablo A.2	: B yapıştırıcısının ısı çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları.....	97
Tablo A.3	: C yapıştırıcısının ısı çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları.....	99
Tablo A.4	: D yapıştırıcısının ısı çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları	100
Tablo A.5	: A yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları	101
Tablo A.6	: B yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları	103
Tablo A.7	: C yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları	104
Tablo A.8	: D yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları	105

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1	: Yapışmada etkili olan kuvvetler [8]	10
Şekil 3.2	: Islatma kalitesini gösteren şematik şekil [8]	12
Şekil 3.3	: Adezyon ve kohezyon hasarlarının şematik gösterimi.....	13
Şekil 3.4	: TS EN ISO 10365/Nisan 2001 standardı	15
Şekil 3.5	: Petrie, bir yapıştırma birleştirmesinin zincir halkaları ile ifade etmiştir [9]	16
Şekil 3.6	: Suyun kohezyon ve adezyon hasarı oluşturma mekanizmaları.....	17
Şekil 4.1	: Yapışan yüzeylerin kirli olması durumunda adezyon kuvvetlerinin zayıflaması durumu	20
Şekil 4.2	: Boru birleştirmeleri ile gerçekleştirilen çalışmada (a) 20°C’de kürlendirilmiş (b) 80°C’de kürlendirilmiş numunelerin SEM görüntüleri [12]	24
Şekil 4.3	: İki aşamalı kürlenmenin çalışma sıcaklığına bağlı olarak dayanım üzerindeki etkisi [12].....	25
Şekil 4.4	: Kürlenme ortamındaki basınç artışının birleştirmenin dayanımına etkisi [14]	26
Şekil 4.5	: Boru birleştirmelerinde kürlenme ortamı basıncının birleştirme dayanımına etkisi [12].....	27
Şekil 4.6	: Tek sıra bindirmeli bağlantılarda sıcaklık değişiminin polimer yapıya etkisi [15]	28
Şekil 4.7	: Camsı geçiş sıcaklığı civarında polimer malzemenin çekme dayanımının değişimi [15]	29
Şekil 4.8	: Kaplanmış çelik ve çift komponentli PU yapıştırıcı ile 60°C ve %95 bağıl nem koşullarında yapılmış bir yaşlanma deneyine ait sonuçlar [16]	29
Şekil 4.9	: Yapıştırıcıdaki bozulmanın zamana bağlı gelişiminin şematik gösterimi [16]	30
Şekil 4.10	: Polimer zincirlerinin hidroliz tepkimesi ile bozulması [9].....	31
Şekil 4.11	: Yapıştırıcı malzemelerin sertlik değerlerinin nemin etkisi ile zamanla değişimi [9]	32
Şekil 4.12	: Suyun ara yüzeye girişinin şematik gösterimi [9]	33
Şekil 4.13	: Nemli ortamda bekleme süresine bağlı olarak dayanımdaki azalma (o 50°C %50 bağıl nemde, 50°C %100 bağıl nemde, Δ 50°C %100 bağıl nemin ardından 50°C %50 bağıl nemde bekletilen numuneye ait sonuçlardır) [16].....	34
Şekil 4.14	: Çeşitli türlerde yapıştırıcılar kullanılarak hazırlanmış, 6 yıl süre ile ortalama %55 bağıl nemde bekletilmiş numunelerde tespit edilen dayanım değişimi [16]	35
Şekil 4.15	: Bağıl nemin birleştirme dayanımına etkisi [16]	36

Şekil 4.16 : Sıcaklığın alüminyum birleştirmelerinde bağlantı dayanımına etkisi (Grafik üzerindeki sayılar yapıştırıcı-malzeme arayüzünden ayrılan numunelerin sayıca yüzdesini göstermektedir).....	37
Şekil 4.17 : IGK'si farklı malzemelerin yapıştırılması sonucu sıcaklık değişimi ile ortaya çıkan kesme yükleri [16].....	38
Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan levha numunesi	41
Şekil 5.2 : Deneylerde kullanılan birleştirilmiş alüminyum-bakır levha çifti	41
Şekil 5.3 : Deneylerde kullanılan birleştirilmiş alüminyum-bakır levha çiftinin kesit görünümü	42
Şekil 5.4 : Deneylerde kullanılan boru numuneleri (a) bir ucuna havşa açılmış alüminyum boru (b) bakır boru	42
Şekil 5.5 : Deneylerde kullanılan boru numunelerinin 3 boyutlu görünümü (a) alüminyum boru (b) bakır boru	43
Şekil 5.6 : Birleştirilmiş durumdaki boru numunelerinin (a) kesit (b) 3 boyutlu görünümü	44
Şekil 5.7 : Levha numunelerin hazırlanmasındaki işlem adımları	46
Şekil 5.8 : Yapıştırıcı kalınlığının sabit olarak uygulanmasını sağlayan düzenek ..	47
Şekil 5.10 : Boru numunelerin hazırlanmasındaki işlem adımları	49
Şekil 5.11 : Yapıştırıcı seçimi için kullanılan deney akış şeması. (* Sadece boru numuneleri içindir).....	51
Şekil 5.12 : Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi koşulları	52
Şekil 5.13 : Sızıntı deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	54
Şekil 6.1 : A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.1).....	57
Şekil 6.2 : A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	57
Şekil 6.3 : B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.2).....	61
Şekil 6.4 : B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	61
Şekil 6.5 : C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.3).....	62
Şekil 6.6 : C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	63
Şekil 6.7 : D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi(Tablo A.4)	63
Şekil 6.8 : D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	64
Şekil 6.9 : Levha numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar)	64
Şekil 6.10 : A yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları	66
Şekil 6.11 : B yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları	67
Şekil 6.12 : C yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları	67

Şekil 6.13 : D yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları	68
Şekil 6.14 : Boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-sütun gösterimi)	69
Şekil 6.15 : Boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-pasta gösterimi)	69
Şekil 6.16 : A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.5).....	70
Şekil 6.17 : A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	71
Şekil 6.18 : B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.6).....	72
Şekil 6.19 : B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	72
Şekil 6.20 : C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.7).....	73
Şekil 6.21 : C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	73
Şekil 6.22 : D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.8).....	74
Şekil 6.23 : D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı.....	74
Şekil 6.24 : Levha numunelerinin rutubet ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar)	75
Şekil 6.25 : A yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları.....	76
Şekil 6.26 : B yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları.....	77
Şekil 6.27 : C yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları.....	77
Şekil 6.28 : D yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları.....	78
Şekil 6.29 : Boru numunelerinin rutubet ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-sütun gösterimi)	79
Şekil 6.30 : Boru numunelerinin rutubet ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-pasta gösterimi)	79
Şekil 6.31 : Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonucu yapıştırıcıların mukavemet azalmaları	80
Şekil 6.32 : Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması	81
Şekil 6.33 : Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması eğrilerinin asimptot form yapacak biçimde devam ettirilmesi	82
Şekil 6.34 : A ve C yapıştırıcılarının (adezyon hasarı veren yapıştırıcıların) ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonunda verdiği asimptotik form	83

Şekil 6.35: B ve D yapıştırıcılarının (kohezyon hasarı veren yapıştırıcıların) ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonunda verdiği asimptotik form	83
Şekil 6.36: Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucu yapıştırıcıların mukavemet azalmaları	84
Şekil 6.37: Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması.....	85
Şekil 6.38: Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması eğrilerinin asimptot form yapacak biçimde devam ettirilmesi....	86
Şekil 6.39: A yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması	88
Şekil 6.40: B yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması	89
Şekil 6.41: C yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması	89
Şekil 6.42: D yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması	90

SEMBOL LİSTESİ

a	: Mukavemet kaybını veren doğrunun eğimi
α	: Isıl genleşme katsayısı
E	: Elastiklik modülü
ϵ	: Birim şekil değişimi
ℓ	: Son uzunluk
ℓ_0	: İlk uzunluk
σ	: Çekme yükü
σ_{ISIL}	: Sıcaklık değişiminin ortaya çıkardığı çekme yükü
θ	: Islatma açısı
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
ΔT	: Sıcaklık farkı
τ	: Yaşlanma sonrası kesme yükü
τ_0	: Yaşlanma öncesi kesme yükü
$\Delta \tau$	: Kesme yükü farkı

ALÜMİNYUM-BAKIR BORULARIN YAPIŞTIRMA YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Yapıştırma yöntemiyle gerçekleştirilen birleştirmelerde, kaynak için zorunlu olan yüksek sıcaklık, lehimlemedeki ilave metal malzeme gereksinimi ve perçinlemedeki birleştirme elemanı olan perçin birleştirme bölgesinden uzaklaştırılmaktadır. Böylelikle kalıntı ısı gerilmeler, korozyona sebep olan metal-metal teması ve ön yükleme gibi bağlantı dayanımını düşüren etkenler ortadan kaldırılmaktadır. Bu sayede, birleştirme bölgesinde uniform gerilme dağılımı sağlanmakta, nem ve sıcaklığa karşı dayanımda artış elde edilmektedir.

Ancak yapıştırma ile birleştirme yönteminin de bir takım kısıtlamaları mevcuttur. Yapıştırıcının yüksek nem altında suyu emmesi, polimer yapısı gereği camsı geçiş sıcaklığının altında ya da üstünde çalıştırıldığında özelliklerinde değişim gözlenmesi, kürlenme süresi sebebiyle bağlantının birleştirme gerçekleştikten hemen sonra yüklenememesi bunlardan bazılarıdır. Mühendislik yapıştırıcıları olarak tanımlanan yapısal yapıştırıcıların yüksek yük taşıma yeteneklerine rağmen diğerlerine nazaran daha gevrek yapıda olmaları, çalışma ortamı sıcaklığındaki değişimin farklı ısıl genişleme katsayıları sebebiyle birleştirmeye ek yük getirmesi, yapıştırma birleştirmesinden etkin sonucun alınabilmesi için tasarım ve uygulama aşamalarında dikkate alınması gereken hususlardır.

Yüksek ve düşük sıcaklıkların ve/veya rutubetli ortamın yapıştırıcıların ve yapıştırma birleştirmelerinin dayanımını olumsuz etkilediği geçmiş çalışmalarla ortaya konmuş bilgilerdir. Oluşan hasarların çevresel etkilerle malzeme-yapıştırıcı ara yüzeyinden (adezyon) ya da yapıştırıcının kendisinden (kohezyon) olması çeşitli sebep ve koşullara bağlıdır.

Bu çalışmada, akışkan taşıyan alüminyum ve bakır boruların yapıştırma yöntemiyle birleştirilmesi amaçlanmıştır. Boru birleştirmesinin çalışacağı koşullar dikkate alınarak deney yöntemleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, ortamdaki sıcaklık çevriminin ve nemin, zamana bağlı olarak yapıştırma birleştirmesinin dayanımına etkileri incelenmiştir. Çalışmada dört farklı yapıştırıcı ile çalışılmıştır. Al-Cu boru birleştirmeleri için uygun olan yapıştırıcı seçilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmada, yapıştırma birleştirmelerine ait dayanım kaybı (yaşlanma) eğrilerinin bir amprik katsayı ile değiştiği belirlenmiştir. Bu katsayı, yapıştırıcı türü ve çalışma koşulları olmak üzere bir takım sebeplere bağlı olarak değişmekte ve deneysel olarak belirlenebilmektedir. Bazı yapıştırıcıların belirli yaşlanma süresi sonunda dayanımlarını ani olarak kaybettikleri (düşey doğrultuda asimptotik formda eğriler vererek), bazıların ise mukavemet değerlerini sabitleyip bağlantı ömrü sonsuz olacak biçimde (yatayda asimptotik formda eğriler vererek) davranış gösterdiği belirlenmiştir.

ADHESIVE BONDING OF ALUMINUM-COPPER TUBES

SUMMARY

Conventional joining methods such as welding, brazing and riveting have some significant disadvantages. For instance, welding creates HAZ, brazing needs additional material and riveting requires mechanical parts during processes. All of these produce weakening effects on the joining region. Joining by adhesive bonding instead of conventional methods, undesired effects like thermal residual stress, corrosion due to metal-metal contact and pre-loading are eliminated. Uniform stress distribution and strength increase in temperature and humidity environments can be formed.

However, adhesive bonding process also has limitations. Water uptake of adhesive under wet conditions, property and behavior changes in adhesive when it works over and under glass transition temperature are main incapacibilities of adhesive bonding. Moreover, joints can not be loaded at once because of curing time. Although engineering adhesives are high-strength adhesives, they are brittle. Therefore, they can create troubles if they are used in temperature cycle conditions due to expansion. All of these advantages and limitations have to be taken into account in both design and application stages.

Previous studies pointed out that service conditions such as high/low temperatures and humidity affect strength of adhesive joint negatively. Failures can occur either as adhesion or cohesion depending on material-adhesive type and service conditions.

In this study, adhesive bonding of aluminum-copper tubes used to transfer fluid is aimed. Experimental methods and procedures were designed considering actual service conditions of Al-Cu tubes. In experimental works, time-dependent effects of temperature cycles and humidity on the strength of adhesive joint were investigated. Four different adhesives were used in experiments and selection of most suitable one for joining of Al-Cu tubes is intended.

It was determined that strength-loss (aging) curves vary by an empirical constant. This constant depends on adhesive type and service conditions basically. Some adhesives lose their strength rapidly and some of them stabilize their strength level at the end of a certain aging time. These were determined by using asymptotical tendency of strength reduction curves.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Havacılık sanayisinde tasarım ve üretimin ivme kazandığı II. Dünya Savaşı yıllarından itibaren mühendisler ve tasarımcılar, malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak, lehimleme, perçinleme gibi geleneksel yöntemlerin yerini alabilecek bir yöntem geliştirme arayışına girmiştir. Manevra yeteneklerinin geliştirilebilmesi için havacılık araçlarının hafif olması beklenen niteliklerden biridir. Halbuki, tüm geleneksel birleştirme yöntemlerinde çeşitli biçimlerde ilave metal malzeme kullanılmakta, bu durum birleştirilen yapının ağırlığının artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca ağır ortam koşulları karşısında uzun süre dayanım beklentisi yeni bir birleştirme yöntemine duyulan ihtiyacı arttırmıştır.

Yapıştırma yöntemiyle gerçekleştirilen birleştirmelerde, kaynak için zorunlu olan yüksek sıcaklık, lehimlemedeki ilave metal malzeme gereksinimi ve perçinlemedeki birleştirme elemanı olan perçin birleştirme bölgesinden uzaklaştırılmaktadır. Böylelikle kalıntı ısı gerilmeler, korozyona sebep olan metal-metal teması ve ön yükleme gibi bağlantı dayanımını düşüren etkenler ortadan kaldırılmaktadır. Bu sayede, birleştirme bölgesinde uniform gerilme dağılımı sağlanmakta, nem ve sıcaklığa karşı dayanımda artış elde edilmektedir.

Ortamda buhar olarak ya da sıvı halde bulunan su, geleneksel yöntemlerde birleştirilmiş bağlantıların dayanımını olumsuz etkilemektedir. Metal-metal teması kesilemediğinden zamanla korozyon oluşmakta, birleştirmenin çalışma süresi azalmaktadır. Özellikle metal boruların birleştirilmesinde tercih edilen kaynak veya lehimleme prosesleri, sulu ortamda çalışan birleştirmelerde korozyona sebep olmaktadır. Boru birleştirmelerinde yoğun olarak basınçlı akışkan taşındığı düşünüldüğünde ise mikro boyuttaki bir çatlakın dahi oluşturacağı hasarın boyutu, öngörülemeyen mertebelere ulaşabilmektedir. Akışkan taşıyan sistemlerdeki titreşim ise hasar oluşumunu tetikleyen bir başka etkidir. Ön yüklemesiz bir bağlantı oluşturarak yorulma dayanımının artırılması, birleştirme prosesinde yüksek sıcaklık uygulamasının oluşturacağı ısı kalıntı gerilmelerin oluşumundan kaçınılması, boru sisteminde proses gereği ortaya çıkan titreşimlerin kullanılan ilave malzeme ile

sönümlenebilmesi ve korozyonun önlenmesi boru birleştirmelerinde daha sağlıklı tasarımlar yapılmasına olanak sağlayacaktır. Boru birleştirmelerinin hassasiyetine karşılık verebildiği için birleştirme yöntemi olarak yapıştırma yöntemi tercih edilmeye başlanmıştır. Bu sayede boru et kalınlıkları azaltılarak malzeme tasarrufu sağlanmakta, birleştirmeden uzun ömür alınabildiği için bakım, tamir, onarım periyodu uzatılarak iş gücü maliyetleri düşürölmekte, daha büyük yükler taşınabilmekte ya da aktarılabilmektedir

Ancak yapıştırma ile birleştirme yönteminin de bir takım kısıtlamaları mevcuttur. Yapıştırıcının yüksek nem altında suyu emmesi, polimer yapısı gereği camsı geçiş sıcaklığının altında ya da üstünde çalıştırıldığında özelliklerinde değişim gözlenmesi, kürlenme süresi sebebiyle bağlantının birleştirme geręekleřtikten hemen sonra yüklenememesi bunlardan bazılarıdır. Mühendislik yapıştırıcıları olarak tanımlanan yapısal yapıştırıcıların yüksek yük taşıma yeteneklerine rağmen diğerlerine nazaran daha gevrek yapıda olmaları, çalışma ortamı sıcaklığındaki değişimin farklı ısı genleşme katsayıları sebebiyle birleştirmeye ek ısı gerilme yükü getirmesi, yapıştırma birleştirmesinden etkin sonucun alınabilmesi için tasarım ve uygulama aşamalarında dikkate alınması gereken hususlardır.

Bu çalışmada, akışkan taşıyan alüminyum ve bakır boruların yapıştırma yöntemiyle birleştirilmesi amaçlanmıştır. Geleneksel yöntemlerden lehimleme ile geręekleřtirilen bağlantılarda metal-metal teması kesilemediğinden, suyun etkisi ile korozyon oluşmakta, bu durum bağlantı ömrünün ksalmasına sebep olmaktadır. Alüminyum-bakır arasındaki temasın bir yalıtkan olan yapıştırıcı malzeme kullanılarak kesilmesi ile galvanik korozyon oluşumu önlenecektir.

Nemli ortamda ve geniş sıcaklık aralığında çalışacak bir yapıştırma birleştirmesi için; nemin etkisi ile yapıştırıcının zamanla bozularak boruları bir arada tutmak için gerekli gücü sağlayamaması, suyun zamanla metal-yapıştırıcı arayüzüne girerek yapışmayı güçsüzleştirmesi, düşük ve yüksek sıcaklıkların yapıştırıcının yapısına ve dolayısıyla birleştirme dayanımına etkileri, geniş aralıklı sıcaklık değişimlerinin alüminyum-yapıştırıcı-bakır arasında genleşme-daralma kaynaklı yarattığı ilave gerilmeler ve bu gerilmelerin etkileri, birleştirme işlemi sonrası bağlantının daha kısa sürede kullanılabilmesini sağlayacak ek işlemlerin gerekliliği gibi çeşitli kısıtlar bulunmaktadır. Alüminyum-bakır boruların yapıştırma ile birleştirilmesine engel olabilecek bu kısıtlamalar ayrıntılı olarak çalışılmış ve bunları birleştirme

performansına en az zarar verecek düzeye indirme veya ortadan kaldırma yöntemleri araştırılmıştır.

Bu amaçla çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Dört adet farklı yapıştırıcı denenmiş, deney sonuçları birbiri ile karşılaştırılmış ve birleştirmenin çalışma koşullarına en iyi uyum sağlayacağı öngörülen yapıştırıcı uygulamada kullanılmak üzere seçilmiştir.

2. YAPIŞTIRICILAR

Yapıştırıcı, yüzeylere uygulandığında onları bir arada tutabilen ve ayrılmayı önleyen polimerik malzemedir [1]. ASTM'in tarifine göre ise yapıştırıcı, yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen maddedir [2].

Yapıştırıcıların en önemli işlevi parçaları bir araya getirerek birleştirmektir. Yapıştırıcılar ile geleneksel mekanik birleştirme yöntemlerinden daha uygun bir gerilime dağılımı sağlayarak yük taşımak ve yük iletimi sağlamak mümkündür [3].

Malzeme sınıflandırmaları incelendiğinde doğada yapıştırıcı diye bir malzeme türü olmadığına vurgu yapılmaktadır. Yapıştırıcılar çeşitli malzemelerin karışımıyla meydana gelen maddelerdir. Yapıştırıcıların temel bileşeni ya bir organik polimerdir ya da polimer oluşturmak için tepkimeye girebilen bileşiklerdir.

Yapıştırıcıların çok yönlü olması nedeniyle her türlü malzeme kombinasyonunun birleştirilebilmesi, bu teknolojinin en büyük faydalarından biridir. Bağlantı bölgelerinin yorulma özelliklerini iyileştirmesi ve çok daha hafif bağlantılar elde edilebilmesi, farklı kalınlıklarda parçaların birleştirilebilmesi başta uçak ve otomobil endüstrisi olmak üzere pek çok uygulama için sağladığı en önemli avantajlardan birkaçıdır.

Yapıştırıcılar ile çok ince sac malzemelerin bile süreksizlik bölgeleri oluşturmadan ve ilave malzeme gerekmeden birleştirilebilmesi diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla, daha düşük maliyet ve ağırlıkta bağlantılar oluşturulmasına olanak tanımaktadır Buna ek olarak yapıştırma birleştirmeleri; kaynak, lehim, perçin gibi yöntemlerin sağladığı bağlantı dayanımına eş değer dayanımlar verebilmektedir. Bu etkenler, hafifliğin ve dayanımın ön plana çıktığı havacılık ve otomotiv sanayilerinde yapıştırıcıların yoğun olarak kullanılmasını kaçınılmaz kılmıştır. Benzer veya farklı malzemelerden üretilmiş kanat, gövde, motor parçaları gibi pek çok parçanın birleştirilmesinde, sızdırmazlığın sağlanmasında ve tamir amaçlı olarak çeşitli tipte yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Ayrıca bağlantıların pürüzsüz yüzeyler oluşturması,

işlevsellik ve görselliğin önemli olduğu alanlarda yapıştırma birleştirmelerine önemli bir üstünlük kazandırmaktadır.

Yapıştırıcılar, sanayide çok uzun yıllardır yer almakla birlikte yapıştırıcı teknolojisinin ilerlemesiyle yapıştırıcıların her geçen gün uygulama alanlarının arttığı ve yeni uygulama alanlarının ortaya çıktığı gözlenmektedir. En temel uygulama alanları olarak havacılık/uçak, otomobil, elektrik/elektronik, paketleme, beyaz eşya, mobilya, ayakkabı sanayileri ve inşaat, dışçılık gibi alanlar gösterilmektedir.

Yapıştırıcıların üstünlükleri ve sınırlamaları aşağıda verilmiştir [4]:

Tablo 2.1: Yapıştırma birleştirmelerinin üstünlükleri ve sınırlamaları

Üstünlükler	Sınırlamalar
Geleneksel mekanik bağlantılara göre üniform gerilme dağılımı ve daha yüksek yük taşıma kabiliyeti sağlar	Birleştirilecek parçalar itinalı bir yüzey hazırlığı gerektirir
Her şekildeki ince ve kalın parçalar birleştirilebilir	Bazı tip yapıştırıcılar için nispeten uzun kürlenme sürelerine ihtiyaç olabilir
Benzer veya benzer olmayan olmayan tüm metallerin birleştirilmesi mümkündür	Üst kullanım sıcaklık sınırı genellikle 180oC-200oC'dır.
Yalıtkan özellikleri nedeniyle elektrokimyasal korozyonu önleyici etkileri mevcuttur	Birleştirme için ısı ve basınç gerekebilir
Çevrimli yüklere ve dolayısıyla yorulma hasarlarına karşı daha dirençlidir	Birleştirme için özel tutucu ve aletler gerekebilir
Düzgün yüzeyler elde edilmesine olanak tanır	Sıkı bir proses kontrolüne ihtiyaç vardır
Isı ve elektriğe karşı yalıtkan olma ve titreşim sönümleme özellikleri vardır	Yapıştırıcının mekanik özellikleri zaman içinde, çalıştığı ortama göre değişim gösterebilir
Geleneksel mekanik bağlantı yöntemlerinden genelde daha hızlı ve daha ucuz olabilirler	
Yapıştırıcı uygulamasında mukavemet artışını etkileyen gerekli ısı genellikle çok düşüktür	
Birleştirme sonrası temizleme işlemleri basittir	

Sağlam ve kuvvetli bir yapışma için yapıştırıcılardan birtakım özellikler beklenmektedir. Bunlar [5]:

- Doğru viskozitede olması
- Tüm yüzeye yayılmayı (kaliteli ıslatmayı) sağlayacak yüzey gerilimine sahip olması
- Yapışmanın geç ya da erken olmaması
- Genleşme ve büzülmenin hiç olmaması ya da az olması
- Yapıştırılan yüzey ile kimyasal tepkimeye girmemesi
- Yüzeyden sıyırma ile alınabilmesi, ayrılırken yüzeye zarar vermemesi
- Atmosferik şartlara dayanıklı olması

2.1. Yapıştırıcıların Sınıflandırması

Yapıştırıcı hazırlanmasında kullanılan maddelerin çokluğu ve çeşitliliği, değişik özelliklere sahip yapıştırıcıların formüle edilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durum yapıştırıcıların gruplandırılmasını da zorlaştırmaktadır. Çeşitli kaynaklarda, yapıştırıcıların sertleşme davranışlarına, kimyasal yapılarına, uygulama yöntemlerine ve kullanım alanlarına göre sınıflandırmalar yapılmaktadır.

Yapıştırıcılar kullanım durumlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [5]:

1. Yapısal Yapıştırıcılar: Karşıladıkları yükler genellikle yüksektir. Yapıştırma alanı, tüm alanın küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Mühendislik yapıştırıcıları olarak da adlandırılan bu yapıştırıcılar otomobil gövde sacları, uçak parçaları, mobilya sanayisi gibi uygulama alanlarında sıkça tercih edilmektedir.
2. Tabakalı (Laminating) Yapıştırıcılar: Birleştirmenin taşıdığı yükler genellikle düşüktür ve yapışma bölgesi toplam yüzey alanının büyük bölümünü kaplamaktadır. Etiketleme, paketleme, ciltleme gibi uygulama alanlarında tercih edilmektedir.
3. Basınca Duyarlı Yapıştırıcılar: Genellikle düşük yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Bu tip yapıştırıcıların kullanımı yapısal ya da tabakalı olabilir. Uygulanması kolay ve yapışmanın tamamlanma süresi kısadır. Geçici bağlama sağlarlar.

En yaygın olarak kullanılan yapısal yapıştırıcılar, ana elemanın kimyasal yapısına göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır [6]:

1. Epoksi Yapıştırıcılar: Epoksiler, hemen hemen bütün uygulamalar için kullanılabilecek oldukça yüksek mukavemetli yapıştırıcılardır. Genellikle reçine ve katılaştırıcı olarak iki bileşenden oluşurlar. Yapıştırma bölgesine uygulanmadan önce iki bileşenin karışması gerekmektedir. Oda sıcaklığında kürlenme birkaç dakikada tamamlanabildiği gibi bazı türlerinde bu süre birkaç güne kadar uzayabilmektedir. Epoksi yapıştırıcılar genellikle gevrek yapıya sahip olup nemli ortamlara karşı duyarlılardır. Uzun süre çevresel faktörlerin etkisi altında mukavemet kaybına uğramaları olasıdır. Epoksi yapıştırıcılar 260°C civarında bozulmaktadır ve başka bir etken (nem vs.) olmadığı sürece bu sıcaklık seviyesine kadar yüksek dayanım gösterirler [7]. Epoksinin metal ve plastik yüzeylere yapışması zayıftır, bu nedenle bağlantıda oluşan hasar malzeme ile parça ara yüzeyinde meydana gelmektedir.
2. Akrilikler: Akrilikler, karakter olarak epoksi ve poliüretana benzerler. İki bileşenden oluşurlar ve yapışmanın sağlanması için bileşenlerin karışması gerekmektedir [7]. Metaller ve plastikler ile kullanıldıklarında yüksek mukavemet değerleri vermektelerdir. -110°C ile 120°C arasında elastik özelliklerini değiştirmeden korurlar. Oda sıcaklığında hızlı kürlenirler. Yüzey hazırlığı yapılmamış yüzeylere karşı çok duyarlı değildirler [7]. Bu yapıştırıcılar nemli ortamlara karşı direnç gösterirler ve sağladıkları birleştirmenin mukavemetinde nem dolayısıyla önemli bir azalma gözlenmez. Akrilik yapıştırıcılar yanıcı özelliğe sahip olup, yüksek sıcaklıklarda kullanıma elverişli değildir.
3. Poliüretan Yapıştırıcılar: Poliüretan yapıştırıcılar yaygın olarak tek bileşenli ve iki bileşenli kullanılmaktadır. İki bileşenli olduğunda bileşenler reçine ve katalizördür. Epoksi yapıştırıcılar ile kıyaslandığında daha kısa çalışma ömürleri vardır ve nemli ortamlara karşı daha duyarlılardır. Düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet değerleri vermektelerdir. Yapıları tok ve elastiktir.
4. Anaerobikler: Anaerobik yapıştırıcılar, ortamdan oksijenin uzaklaştırılması ile kürlenirler. Bu yüzden yapıştırıcı uygulamasından hemen sonra, birleştirme bölgesi hava girişi engellenecek şekilde kapatılır. Anaerobik yapıştırıcılar iyi rutubet direncine sahiplerdir ve 150°C'ye kadar metal ve termosetlerin yapıştırılması için uygundur.

5. Silikon Yapıştırıcılar: Silikon yapıştırıcılar tek bileşenlidir. Kimyasal tanımıyla oda sıcaklığında vulkanize olmuş elastomerlerdir. Çekme dayanımları çok düşüktür [7]. -60°C ile 370°C arasında çalışabilme yeteneğine sahiptirler. UV, su ve yüksek sıcaklığa karşı dirençlidir ve sıfırın altında esnek özellik gösterirler [7]. Metal, cam, plastiklerin yapıştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

3. YAPIŞMA

Yapışma, yapıştırıcı ile malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen bir olaydır [1]. Yapışma iki temel mekanizma ile oluşur [8]:

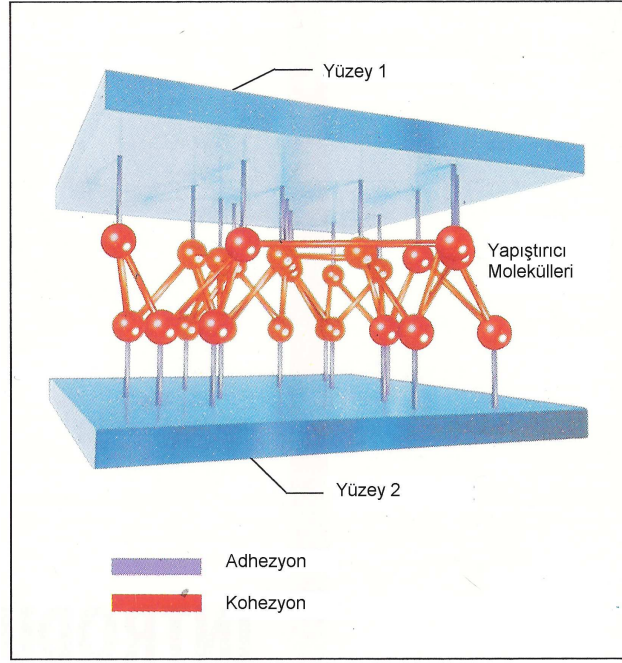
- Adezyon: Yapıştırıcı ile yüzeyler arasında kurulan kimyasal bağdır. Yapışmada en önemli kısmı oluşturan bu bağda van der Waals kuvvetleri iş görür. Yüksek dayanımlar, yapıştırıcının yüzey pürüzlerin içine iyi girmesine (penetre olmasına), bir başka deyişle ıslatmanın kaliteli olmasına bağlıdır. Yapıştırıcının yüzey pürüzleri içine giremediği durumlarda birleştirme dayanımının düşük kaldığı belirlenmiştir [8]. Islatma kalitesi ise yapışan yüzeylerin yüzey enerjilerine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Tablo 3.1’de bazı malzemeler için yüzey enerjisi değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki kritik yüzey enerjileri [8]

Malzeme	Yüzey Enerjisi (mN/m)
PTFE (Teflon)	18
PVC	40
Polyamide	46
Demir	2030
Tungsten	6800
Yapıştırıcı (Karşılaştırma Amaçlı)	30-47

Yapıştırıcının katı bir yüzeyi yeterli düzeyde ıslatması, yapıştırıcı yüzey enerjisinin, yapışan yüzeyin yüzey enerjisinden küçük ya da eşit olmasına bağlıdır. Tablo 3.1 incelendiğinde metallerin plastıklere göre daha kolay yapıştığı görülmektedir.

- Kohezyon: Yapıştırıcının yapısındaki moleküller arasında varolan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan bağ kuvvetidir.



Şekil 3.1: Yapışmada etkili olan kuvvetler [8]

Bir zincirin gücü, en zayıf halkasının gücü kadardır yaklaşımıyla, adezyon ve kohezyonun birlikte önem arz ettiği, dolayısıyla her iki kuvvetin de birleşme performansında eşit öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır.

3.1. Yapışma Teorileri

Bugüne kadar yapışma mekanizmalarının açıklanması amacıyla moleküler, makroskopik ve mikroskopik seviyelerde kırkı aşkın teori ortaya atılmıştır. Ancak bunların hiçbiri yapışma mekanizmasının bütün yönlerini tek başına açıklayamamaktadır [6]. Bu teorilerden en çok kabul görenler mekanik tutunma teorisi ve adsorpsiyon teorisidir.

3.1.1. Mekanik Tutunma Teorisi (Yapışmanın Mekanik Teorisi)

Katı malzemelerin yüzeyi hiçbir zaman pürüzsüz değildir. Mikro düzeyde de olsa daima tepecik ve vadilerden oluşan girinti ve çıkıntılar mevcuttur. Yapıştırıcının mikroçukurları doldurması ile yapışma gerçekleşmektedir. Yapıştırıcı sertleştiğinde ise yapışan yüzeyleri mekanik olarak bir arada tutar. Yapışmanın mekanik teorisine göre, tam bir yapışma için, yapıştırıcının yüzeydeki tüm çukurların içine girip yayılması, yüzeydeki sıkışmış havayı tahliye etmesi ve yapışan yüzeyleri mekanik olarak kilitlemesi gerekmektedir [9].

Bu teoride, bir katı yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı uygulandığı zaman, yapıştırıcının gözeneklere gireceği, bu yolla mekanik tutunma oluşacağı ve dolayısıyla da iyi bir yapışma meydana geleceği savunulmaktadır. Mekanik tutunma yapıştırıcının malzeme üzerinden kalkmasını engellemektedir [6].

Yüzey pürüzü, temasın olduğu yüzeyler arasında toplam yüzey alanını arttırdığı için yapışmaya olumlu katkı sağlar. Yüzeyler arası ve moleküller arası kuvvetlerin yapışmanın temeli olduğu kabul edildiğine göre, temas halindeki yüzey alanının artışı, yapışmayı sağlayan kuvvetlerin oluşacağı etkili yüzey alanını arttırdığı için yapışma verimi de artırır. Bu durum, mekanik teori ile açıklanan bir durumdur [9].

Ancak toplam yüzey alanı, pürüz yani girinti çıkıntılarla artırıldığında yapışma verimi artmaktadır. Birleştirmenin bindirme mesafesi artırılarak sağlanan toplam temas yüzeyindeki artış, mekanik kilitleme sağlamayacağından, yapışmada herhangi bir performans artışı sağlaması mümkün değildir. Bu koşul, dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur [9].

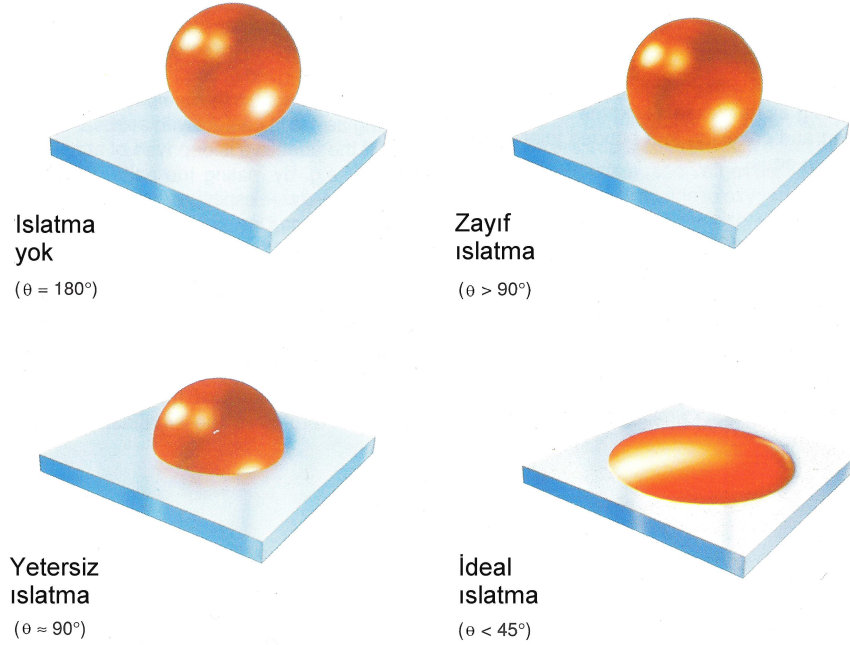
Mekanik teorinin açıklamalarına göre yapışma, yapışma kuvvetleri ile mekanik kuvvetlerin birlikte katkısı ile gerçekleşir. Yüzeyler pürüzler sayesinde mekanik olarak tutunurken, adezyon (yapışma) mekanizmaları ile kimyasal olarak bağlanmaktadır [9].

3.1.2. Adsorpsiyon Teorisi

Adsorpsiyon teorisi, yapışmanın iki malzemenin molekülleri arasındaki ilişki sonucu oluşan yüzey kuvvetleri ile ortaya çıktığını savunur. Yapışma, yapıştırıcı moleküllerinin yüzeye adsorpsiyonu (tutunması) ile ortaya çıkan çekim kuvvetlerinin sonucu olarak gerçekleşir. Bu kuvvetler genellikle ikincil kuvvetler ya da Van der Waals kuvvetleri olarak isimlendirilir. Bu kuvvetlerin oluşması için, yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasında $5 \text{ \AA}$ 'dan kısa mesafe olması gerektiği belirtilmektedir [9].

Yapıştırıcı ile yapışan malzeme arasında sürekli ilişkinin kurulmasına ıslatma adı verilmektedir. Şekil 3.2'de iyi ve zayıf ıslatma örnekleri şematik olarak gösterilmiştir. İyi ıslatma, yapıştırıcının, yüzeydeki tüm girinti ve çıkıntıları doldurması ile mümkün olur. Zayıf ıslatma ise yapışan yüzey ve yapıştırıcı arasında temas eden yüzey alanının az olması sonucu ortaya çıkan durumdur. Zayıf ıslatma oluşmasının sebebi, ara yüzeyde hava boşluklarının kalmasıdır.

Islatma, temas (contact) açısı ölçümü ile ifade edilmektedir. Tam ıslatma, bu açının (θ) sıfır olması ile mümkündür. Bu koşul, temiz cam yüzeyde saf su damlasının durumu için geçerli referanstır.



Şekil 3.2: Islatma kalitesini gösteren şematik şekil [8]

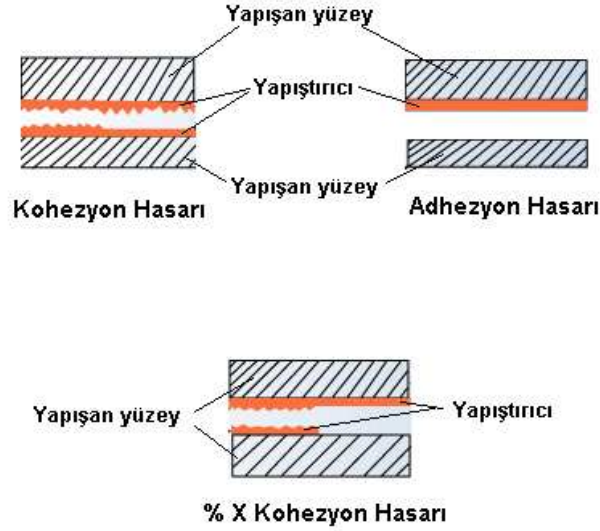
Islatma, malzemelerin kritik yüzey enerjileri ile doğrudan ilişkili bir kavramdır. İyi bir ıslatma için yapıştırıcı malzemenin kritik yüzey enerjisi, yapışan yüzeyin kritik yüzey enerjisi değerinden çok küçük olmalıdır. Bazı malzemelere ait kritik yüzey enerjisi değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Islatma ile yüzeyler arası ilişki sağlandıktan sonra, asıl kalıcı yapışmayı birincil kuvvetlerin gerçekleştirdiği kabul edilmektedir. Adsorpsiyon teorisinde, adezyon ve kohezyon kuvvetlerini oluşturan dört bağ tanımlanmıştır. Elektrostatik, kovalent ve metalik bağlar birincil bağ; van der Waals bağları ikincil bağ olarak tanımlanmaktadır.

3.2. Yapışma Hasarları

Adezyon ve kohezyon kuvvetlerine bağlı olarak hasar türleri de adhesiv kırılma ve kohesiv kırılma olarak farklılaşmaktadır. Adezyon kuvvetlerinin iş göremez hale gelmesinden kaynaklanan hasara, adhesiv hasar (adezyon hasarı, yapışma hasarı) adı verilmektedir. Adhesiv hasar, yapışan yüzey ve yapıştırıcı yüzeyleri arasında olan bir yüzeyler arası hasardır. Kohezyon kuvvetlerinin işlevsiz hale gelmesi durumunda

ortaya çıkan hasar ise kohesiv hasar (kohezyon hasarı) olarak isimlendirilmektedir. Kohesiv hasar ise yapıştırıcının kopma sonrasında yapışan yüzeylerde kaldığı hasar türüdür. Yapışan yüzeylerden birinin, yapıştırıcıdan önce hasar gördüğü durumlar, yaygın kullanımda, yapışan malzemenin kohesiv hasarı olarak tanımlanır [8, 9].



Şekil 3.3: Adezyon ve kohezyon hasarlarının şematik gösterimi

Hasar türleri TS EN ISO 10365/Nisan 2001 standardına göre belirtilmektedir (Şekil 3.4) [10].

Yapıştırıcı, mekanik olarak işlenmiş yüzeylerdeki pürüzlere tam olarak temas edemezse adezyon kuvveti oldukça zayıflar. Yapıştırma öncesi yüzeyde kirlerin bulunması teması etkileyen bir durumdur. Adhesiv kırılma, uygun olmayan yüzey temizliğinden kaynaklanır ve yapıştırıcının yapışan yüzeyden kalkması şeklinde gözlenir. Yapıştırma birleştirmelerinde yüzey temizliği iyi yapılmış ise hasar kohezyon hasarıdır, yapıştırıcının kendi içinde meydana gelmektedir [8].

Kohezyon hasarı, yapıştırıcının dayanım sınırına kadar zorlandığı durumlarda meydana geldiği için, daha çok arzu edilen hasar türüdür. Ancak hasar türünün bilinmesi, iyi bir birleştirmenin hasar nedenini belirlemek için tek başına yeterli değildir. Kohesiv hasar gören birleştirmeler en ekonomik çalışan ve beklenen ömrü tamamlayarak hasar görmüş birleştirmeler olarak nitelenemezler. Aksi durum, sıkça karşılaşılan hatalı yorumlamadır. Hasar sonrası oluşuna yüzey görüntüsü, birleştirmedeki zayıf halkayı göstermektedir. Hasar sebebini bulmak için daha hassas incelemeler yapmak gerekmektedir. Hasar türünün belirlenmesi, hasar sebebini

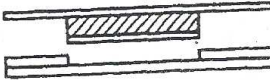
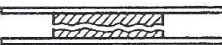
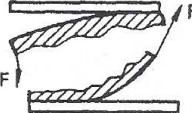
zayıf sınır tabakalardan ya da yetersiz yüzey hazırlığından kaynaklandığını belirlemek için kullanışlı bir yol göstericidir Tablo 3.2 [9].

ICS 83.180

TÜRK STANDARDI

TS EN ISO 10365/Nisan 2001

Çizelge 1 Hasarların gösterilmesi

	Hasar	Gösteriliş
Malzeme	 Yapıştırılan malzemenin birindeki veya her ikisindeki hasar (malzeme hasarı)	SF
	 Yapıştırılan malzemenin hasarı (malzemenin kohezyon hasarı)	CSF
	 Katlarına ayrılmayla oluşan hasar (katlarına ayrılma hasarı)	DF
Yapıştırıcı	Kohezyon hasarı tipleri  Kohezyon hasarı  Özel kohezyon hasarı 	CF SCF
	  Yapışma hasarı	AF
	 Ayrılma ile birlikte yapışma ve kohezyon hasarı	ACFP

Katlarına ayrılma hasarı oluşursa (yani, kaplamanın yapıştırılan malzemeden kopması), gösterilişin ardından kaplamanın niteliği belirtilmelidir.

NOT 1 - Kaplama tipleri, astar, vernik, boya, fosfatlama, vb. yi kapsar.

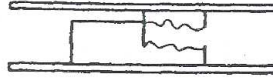
İki hasardan oluşan salınım kusuru meydana geldiğinde, bu durum, hasarın açıklanmasından sonra "OSC" yazılarak gösterilir:

AF (% 50) + CF (% 50), OSC

NOT 2 - Salınım hasarının kayma-yapışma modu, farklı hasar mekanizmaları (kohezyon ve yapışma hasarı veya kırılma olmayan ve kırılma kohezyon hasarı) arasında bir geçiş yapabilen bir elastik yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcıdan oluşan, elastik enerjinin yapıştırılan malzeme tarafından periyodik olarak depolanıp serbest bırakıldığı bir sistem için tipiktir.

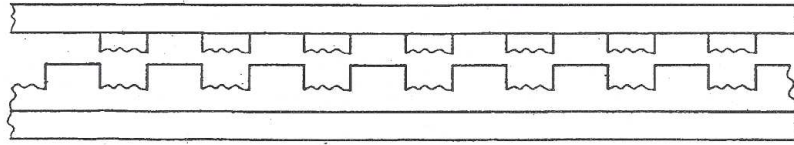
Şekil 2, kohezyon ve yapışma hasarının tipik bir salınım modelini göstermektedir.

Uygun bir alet kullanılarak yüzeyin incelenmesi, farklı hasar tiplerinin daha iyi ayrıt edilmesini sağlar.



AF (% 50) + CF (% 50)

Şekil 1 - Bir "karışık hasar" örneği



Şekil 2 - "Salınım kopması" örneği

Şekil 3.4: TS EN ISO 10365/Nisan 2001 standardı

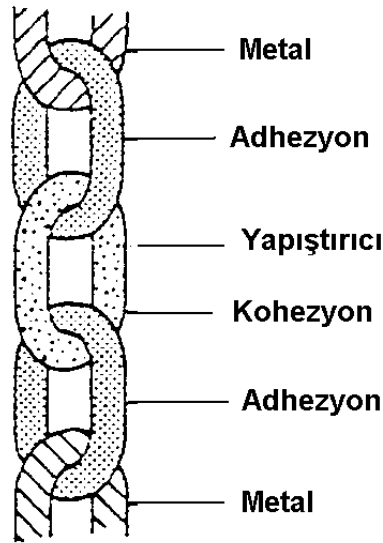
Tablo 3.2: Hasar türleri ve sebepleri

Hasar Türü	Sebebi
Adezyon (yapışma) hasarı	Kohezyon dayanımı > Yüzeyler arası dayanım
Kohezyon Hasarı	Yüzeyler arası dayanım > Kohezyon dayanımı
Adezyon/kohezyon karışık hasar	Yüzeyler arası dayanım ~ Kohezyon dayanımı

Kopan parçalar incelenerek hasarın adezyon (yapışma) ya da kohezyon hasarı olduğu anlaşılabilir. Yapışan yüzeylerden biri tamamen temizse hasar adezyon (yapışma) hasarı, her iki parçada da bir miktar yapıştırıcı kalıntısı varsa hasar kohezyon

hasarıdır denilebilir. Hasar türü incelenerek hasarın sebepleri üzerinde yorumlama yapılabilir. Örneğin, hasar yüzeyler arasında gerçekleşmiş (adezyon hasarı) bir hasar ise, yapıştırıcının kütleli (bulk) dayanımı, yapışmanın yüzeyler arasındaki dayanımından daha büyüktür denilir. Yapıştırmanın toplam dayanımı yeterli düzeyde değilse kullanıcı yüzey durumlarını inceleyerek “zayıf halka” durumunda olan bileşeni bulabilir. Eğer hasar ara yüzeyden ise, yapıştırıcının kohezyon özelliklerini arttırmak yapıştırma kalitesinin iyileşmesine fayda sağlamayacaktır. Çalışmalar yüzeyler üzerine yönlendirilmelidir. Ya da kohezyon hasarı durumunda yapıştırıcı malzeme özelliği üzerine yoğunlaşılmalıdır.

Petrie, bir yapıştırma birleştirmesini zinciri oluşturan halkalar ile ifade etmiştir (Şekil 3.5). Zincirin yüklenmesi durumunda en zayıf halkanın koparak birleştirmenin dağılacağı görülmektedir. Petire, açıklamasında ideal bir yapıştırma birleştirmesinde, zincirin gücünü belirleyen en zayıf halkanın yapıştırılan malzemeler olacağı belirtmiştir [9].

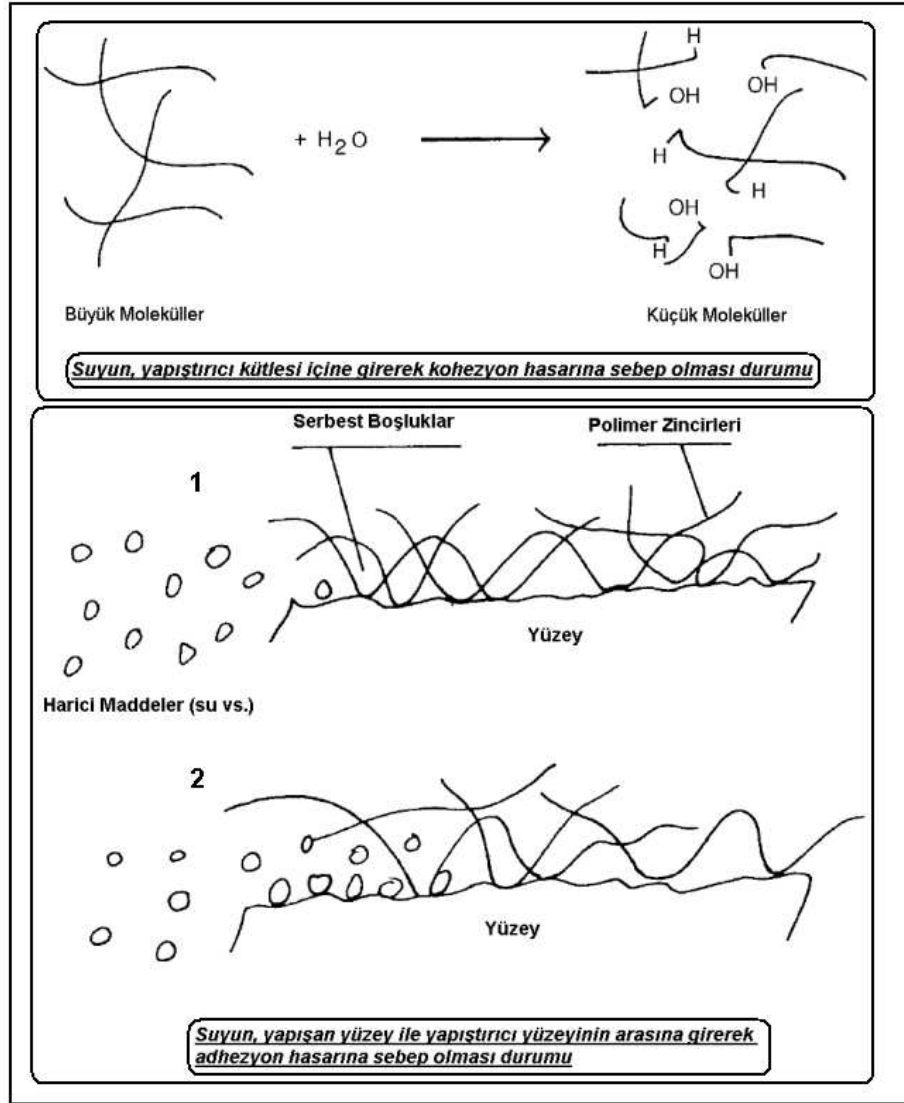


Şekil 3.5: Petrie, bir yapıştırma birleştirmesinin zincir halkaları ile ifade etmiştir [9]

Hasarın doğru sebebini tam olarak belirleyebilmek çok zordur. Bunun nedeni, yapıştırma birleştirmesinin zayıflayarak hasara uğramasında etkili olan faktörlerin çokluğudur [9].

Örnek olarak, yapıştırma dayanımını ve ömrünü önemli ölçekte azalttığı bilinen suyun hem kohezyon hasarını, hem de adezyon hasarını tetikleyici etkiler yaptığı Şekil 3.6’da verilmiştir. Su moleküllerinin ayrışarak yapıştırıcı kütleline girmesi ve sonrasında polimer zincirlerini koparması sonucu kohezyon hasarı oluşmaktadır.

Benzer şekilde suyun yapıştırıcı-yapışan malzeme ara yüzeyine girerek, iki yüzey arasındaki bağları koparması sonucu adezyon (yapışma) hasarı meydana gelmektedir.



Şekil 3.6: Suyun kohezyon ve adezyon hasarı oluşturma mekanizmaları

3.3. Yapışma Etkenleri

Yapışma etkenlerinin başında sıcaklık gelmektedir. Birçok yapıştırıcının yüksek sıcaklıklarda daha hızlı kürlendiği belirlenmiştir. Isının kontrolsüz uygulanması halinde ise yapıştırıcının bozulma (degradation) ihtimali ortaya çıkmaktadır. Basınç etkeni ise genellikle film ve bant halinde bulunan basınca duyarlı yapıştırıcılar için önem arz etmektedir. Kullanıldıkları yerin şeklini almaları ve yapışma işleminin gerçekleşmesi için bu yapıştırıcılara basınç uygulanmalıdır. Yapıştırıcının kuruyarak ve pişerek etkin hale gelebilmesi için birkaç saniyeden birkaç güne kadar belirli bir

sürenin geçmesi gerekmektedir. Bu durum da zamanın yapışmaya etkisini göstermektedir. Basınç ve/veya sıcaklık uygulamalarıyla bu süre üzerinde değişiklikler yapılabilir. Bunların dışında yapıştırıcı bileşimindeki katalizör ve çözücü, yapışma ortamındaki oksijen, nem, su ve UV ışınları yapışmaya etki eden diğer faktörler olarak gösterilmektedir [4].

4. YAPIŞTIRMA BİRLEŞTİRMELERİ

Birden fazla malzemenin, bağlayıcı olarak yapıştırıcı kullanılması suretiyle birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan yekpare (tek parça) yapıya yapıştırma birleştirmesi adı verilir. Yapıştırma birleştirmeleri ile geleneksel mekanik birleştirme yöntemlerinden daha uygun gerilme dağılımı sağlayarak yük iletmek veya taşımak mümkündür. Ayrıca yapıştırma, özellikle farklı malzemelerin birleştirilmesinde diğerlerine üstünlük sağlayan bir birleştirme yöntemidir. Metal, seramik plastik, cam ve odun gibi farklı tipteki malzemeler çeşitli düzenlerle, uygun yüzey hazırlığı ile kolaylıkla birleştirilebilir. Esnek bir yapıştırıcı kullanarak ısı genleşme özellikleri farklı malzemeler sorunsuzca birleştirilebilir, rijitlik durumunda oluşacak hasar önlenir ya da ertelenir. Birleştirmede yapıştırıcı kullanımı ile mekanik sönümleme sağlanabilir. Darbe ve tekrarlı yüklemelere karşı dayanımın artmasıyla yorulma dayanımında artış meydana gelir [3]. Uygun şekilde tasarlanmış birleştirmelerde genellikle yapıştırılan malzemeler yapıştırıcıdan önce yorulma göstermektedirler.

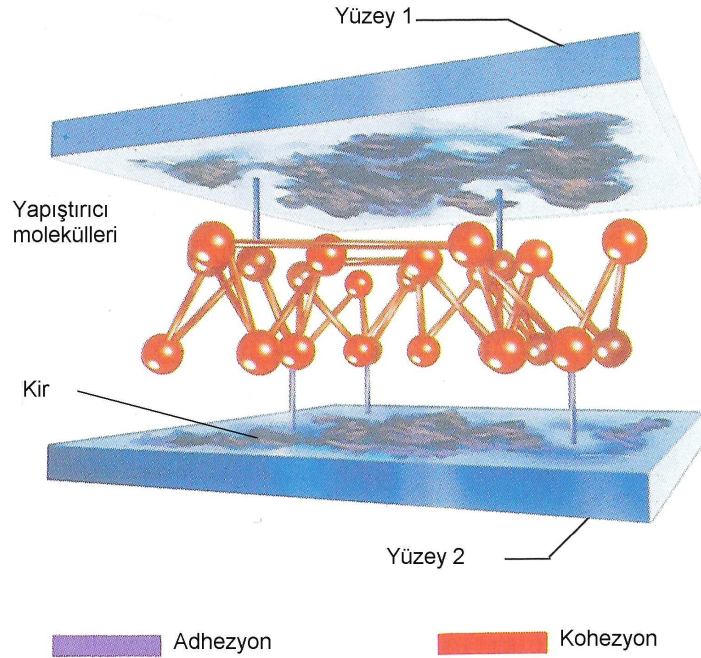
4.1. Yapıştırma Birleştirmelerinin Dayanımını Belirleyen Etkenler

4.1.1. Yüzey Hazırlığı

Yüzey hazırlığı yapıştırma birleştirmeleri için önemli bir etkidir. Zayıf sınır tabakalar olarak adlandırılan yüzeydeki oksit, boya, pas vs. maddelerin, yapıştırıcı ile yüzeyin doğrudan temasını engellemeleri sebebiyle kaldırılması gerekmektedir. Özellikle sanayi uygulamalarında pratik bir işlem olmamasına rağmen, yüzey hazırlığı zorunlu bir uygulamadır.

Birleştirilecek bütün yüzeyler için yüzey hazırlama işlemi birleştirmenin kalitesi ve etkisinin kontrol altında tutulması açısından çok önemlidir. Yüzeyde bulunan oksitler, kirler, yağlar gibi yüzey bileşenleri yapıştırıcıların tutunmasını önemli ölçüde etkiler. İyi bir yapışma sağlanması için yapıştırıcı uygulama işlemi öncesinde bağlantıdan beklenen işlevlere göre yüzeylerdeki istenmeyen bileşenlerin temizlenmesi gereklidir. Yüzey hazırlama işlemleri basit bir çözücü kullanarak yağ almadan, yüzey pürüzlülüğünü artırma, oksit tabakasının kimyasal modifikasyonuna

kadar geniş bir aralıktadır. Uygulanan yüzey temizleme işlemine göre işlem süresi birkaç saniyeden saat mertebesine kadar sürebilir. İyi hazırlanmış yapıştırma birleştirmelerinde kopma, yapıştırıcı ve malzeme arasında değil, yapıştırıcıda meydana gelir.



Şekil 4.1: Yapışan yüzeylerin kirli olması durumunda adezyon kuvvetlerinin zayıflaması durumu

Metallerde çözücüyle silme veya buharla yağ giderme uygulanan en basit ön yüzey işlemleridir. Bu işlem genellikle çok yüksek yüklerin ve ağır ortam şartlarının kritik olmadığı uygulamalar için yeterlidir. Düşük ve orta dereceli bağlantı dayanımının istendiği birleştirme bölgeleri için yoğun bir yüzey hazırlığına gerek yoktur. Yüksek bağlantı dayanımı, sürekliliği ve verimliliği gerektiği durumlarda dikkatli ve kontrollü bir yüzey hazırlığı prosesine ihtiyaç vardır. Yüzey hazırlama yöntemlerinin seçiminde birleştirmeden beklenen bağlantı dayanımı, çalışma ömrü ve çalışma ortamı, yapıştırılacak malzemenin türü ve yapıştırılacak malzeme yüzeyindeki başlangıçta bulunan kirletici unsurların miktarı ve niteliği dikkate alınmalıdır [3].

Yüzeyi temizlenmiş bir malzeme yapıştırıcı, yapışma yüzeyini daha kolay ve daha kaliteli ıslattığı için bağlantı mukavemeti oldukça yükselir. Bağlantı dayanımı, yüzey hazırlığının aşağıdaki işlevlerin bir ya da birkaçını birlikte gerçekleşmesi nedeniyle artmaktadır [11]:

- Yüzeydeki kirleri kaldırır
- Absorbe edilen suyu kontrol eder

- Oksit oluşumunu kontrol eder
- Polimerlerin bozulmasını hızlandıran yüzey atomlarını olumsuz etkileyerek bozulmayı geciktirir
- Yapıştırıcı ve yapışan malzemeyi birbirinin olumsuz etkilerinden korur
- Birleşen malzemelerin kristal yapısını yapıştırıcının moleküler yapısına uydurur
- Yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilebilmesini sağlar

Yüzey pürüzlülüğü de yapıştırma bağlantılarının mukavemetine etki eder. Yapıştırıcının pürüzler arasına girip sertleşmesi bir şekil bağı meydana getirir. Bu nedenle yapıştırılacak yüzeyin çok parlak olmaması gerekir. Ancak hangi pürüz miktarının ne derece etkili olduğu tam olarak bilinmemektedir [6].

Yüzey hazırlama yöntemleri yağ ve kir alma, mekanik aşındırma ve kimyasal işlemler olarak üç grupta toplanabilir. Bunlar:

1. Yağ ve Kir Alma: Mümkün olan en iyi yapıştırma performansını elde etmek için yapıştırılacak yüzeylerden yağ, gres, toz ve diğer kalıntıların tamamen temizlenmesi gerekir. Çözücü ile silme, uygulama yönünden basit bir işlem olması sebebiyle en çok tercih edilen yöntemdir. Yapıştırılacak yüzeyler, üzerine temiz çözücü damlatılmış bez ile silinerek ya da yüzey çözücü ile ıslatıldıktan bir süre sonra temiz bir bezle silinerek temizlenirler. Çözücü olarak metil etil keton, trikloro metilen ve aseton iyi yağ çözücüler oldukları için yaygın olarak kullanılırlar [3]. Tek başına uygulandığında yağ gidermede yeterli bir yöntem değildir. Bir başka yağ giderme yöntemi de buharla yağ gidermedir. Bu yöntemde yapıştırılacak yüzeyler damıtılmış, yoğunlaşmış çözücü buharıyla yıkanmaktadır. Çözücü buharlarının sıcaklığı kaynama noktasındadır ve genellikle trikloroetilen ve perkloroetilen çözeltileri kullanılır. Çözeltili buharına bir dakika daldırma metallerin yağının tam olarak giderilmesi için yeterlidir [6].
2. Mekanik Aşındırma: Kirli metal yüzeylerdeki oksit tabakası yapıştırma performansını olumsuz etkiler ve çözeltili ile kaldırılamaz. Oksit tabakasını yüzeyden kaldırmak için kum püskürtme, taşlama, zımparalama, fırçalama gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Seçilecek yöntem yapıştırılacak yüzeyin alanına ve malzeme türüne göre değişmektedir [8]. Yüzey pürüzlülüğünün yapıştırma birleştirmelerinin mukavemetine önemli

derecede etkisi vardır. Bu etki, yapışan malzemenin yüzey alanını arttırarak bir başka deyişle yüzeyler ve yapıştırıcı arasındaki kimyasal bağ sayısını attırarak sağlanır. Etkili bir yüzey aşındırması yapıştırma alanını arttırmanın yanında yüzeydeki yabancı madde tabakalarını temizleyerek yüzeyin daha iyi ıslanmasına yardımcı olmaktadır.

Mekanik aşındırma işlemlerinin en yaygın kullanılanı zımparalamadır. Çok kalın zımpara kullanmamak kaydıyla kaliteli bir yüzey pürüzü elde etmek mümkündür. Bağlantı dayanımı yüzey pürüzünün derecesine bağlıdır. Aşırı pürüzlü yüzeyler yapıştırma esnasında boşluklar oluşturacağından dayanımı olumsuz yönde etkiler [3].

Aşındırma işleminden sonra yüzeyde kalan parçacıklar temiz, kuru, basınçlı hava ile ya da herhangi bir yağ alma yöntemiyle temizlenmelidir. Aşındırma işleminden sonra zaman kaybedilmeden yapıştırma uygulamasının yapılması gerekmektedir. Aksi durumda, atmosfer ortamında bekleyen malzeme yüzeyinde yeniden oksit tabakası oluşur.

3. Kimyasal İşlemler: Yüzeylerin kimyasal çözelti yöntemi ile temizlenmesi en etkili yüzey temizleme yöntemidir. Bu yöntem ile yüzeyin daha güçlü olması ve daha kaliteli ıslatma sağlanması için, yüzeyin kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirilir. Her malzeme türü için farklı bir kimyasal işlem önerilmektedir. Yapıştırılacak yüzey, hazırlanan çözelti içine koyulur ve belirli bir süre bekletilir. Çözeltiden çıkarılıp saf suya daldırılır bir süre de burada bekletildikten sonra çıkarılıp kurulanır. Çözelti zamanla kirleneceği için dönemsel temizliğine dikkat edilmelidir [11].

Kimyasal temizleme yöntemleri hızlı bir proses olmaması, çözeltinin düzenli yenilenmesinin maliyetleri yükseltmesi ve aşındırma, ardından yağ alma işlemlerinin yeterli görülmesi sebebiyle sanayide özel uygulama alanları dışında tercih edilmemektedir.

Bu üç yaygın yöntemin dışında ileri araştırmalarda kullanılan buharla honlama, ultrasonik temizleme, boşlukta iyonik bombardımanı, elektrik akımı boşalması gibi yüzey hazırlığı işlemleri de mevcuttur.

4.1.2. Yapıştırıcının Kürlenmesi

Bir yapıştırıcının fiziksel özelliklerinin, bir takım kimyasal tepkimeler ile (polimerizasyon, vulkanizasyon vb.) ısı, katalizör, basınç etkisi ile ya da etkisi

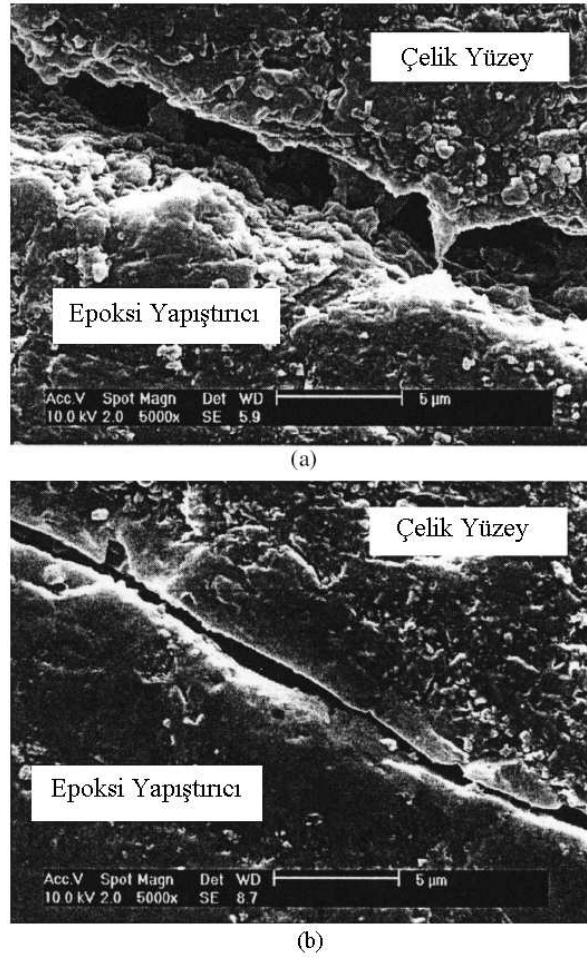
olmadan değişmesine kürlenme adı verilmektedir [2]. Yapıştırıcıların birçoğu reaktif polimerlerdir. Sıvı halden katı hale geçme esnasında bünyelerinde birçok kimyasal işlem gerçekleşir. Her yapıştırıcı için kürlenme özellikleri farklıdır. Kürlenme mekanizmalarına örnek olarak anaerobik tepkime ile kürlenme, UV kürlenmesi, aniyonik tepkime ile kürlenme, nemde kürlenme ve kimyasal tepkime ile kürlenme gösterilmektedir [8].

Sıvı haldeki yapıştırıcılar, yapışma yüzeyini ıslattıktan sonra katı hale geçerler. Yapıştırıcının bu hal değişimi kimyasal tepkimeler sonucu yapıştırıcı içindeki         n uzaklaşması ile sağlanır. Kimyasal tepkimeler ile katılaşmanın bazı getirileri vardır. Yapıştırıcı içindeki su ya da       ler tepkime sonrası kendiliğinden uzaklaştığından bunları gidermek için ek bir prosese ihtiyaç duyulmaz ve tepkime genellikle oda sıcaklığında gerçekleştiğinden ilave ısı işlem gerektirmez. Kimyasal tepkimeler ile katılaşan yapıştırıcılara yapısal yapıştırıcılar da denmektedir [6]. Bunun nedeni birleştirilecek yüzeylerle iyi temas sağlayarak dayanımı yüksek birleştirmeler vermeleridir ve sahip oldukları yüksek elastiklik modülleridir. Bundan dolayı sıvı haldeki yapıştırıcılar mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilirler. Bu yapıştırıcı grubu metaller gibi ısı iletimi katsayısı yüksek olan malzemeler ile oluşturulacak birleştirmeler için en uygun yapıştırıcılardır. Diğer kürlenme mekanizmaları ile kürlenen yapıştırıcılar ile karşılaştırıldığında kimyasal tepkime ile kürlenen yapıştırıcıların ısı direnci olağanüstüdür. Ancak katılaşma süresinin uzun olması ve yüksek mukavemet değerlerine ulaşılması için kürlenme esnasında yapıştırma bölgesi yüzeyine basınç uygulaması gerektirmesi temel yetersizlikleridir [6].

Yüzey hazırlığından sonra yapıştırma birleştirmesinin dayanımına etki eden en önemli etken kürlenme işlemidir. Bir başka deyişle kürlenmenin gerçekleştiği sıcaklık ve basınç birleştirme performansını doğrudan etkilemektedir.

4.1.2.1. Sıcaklığın Kürlenmeye Etkisi

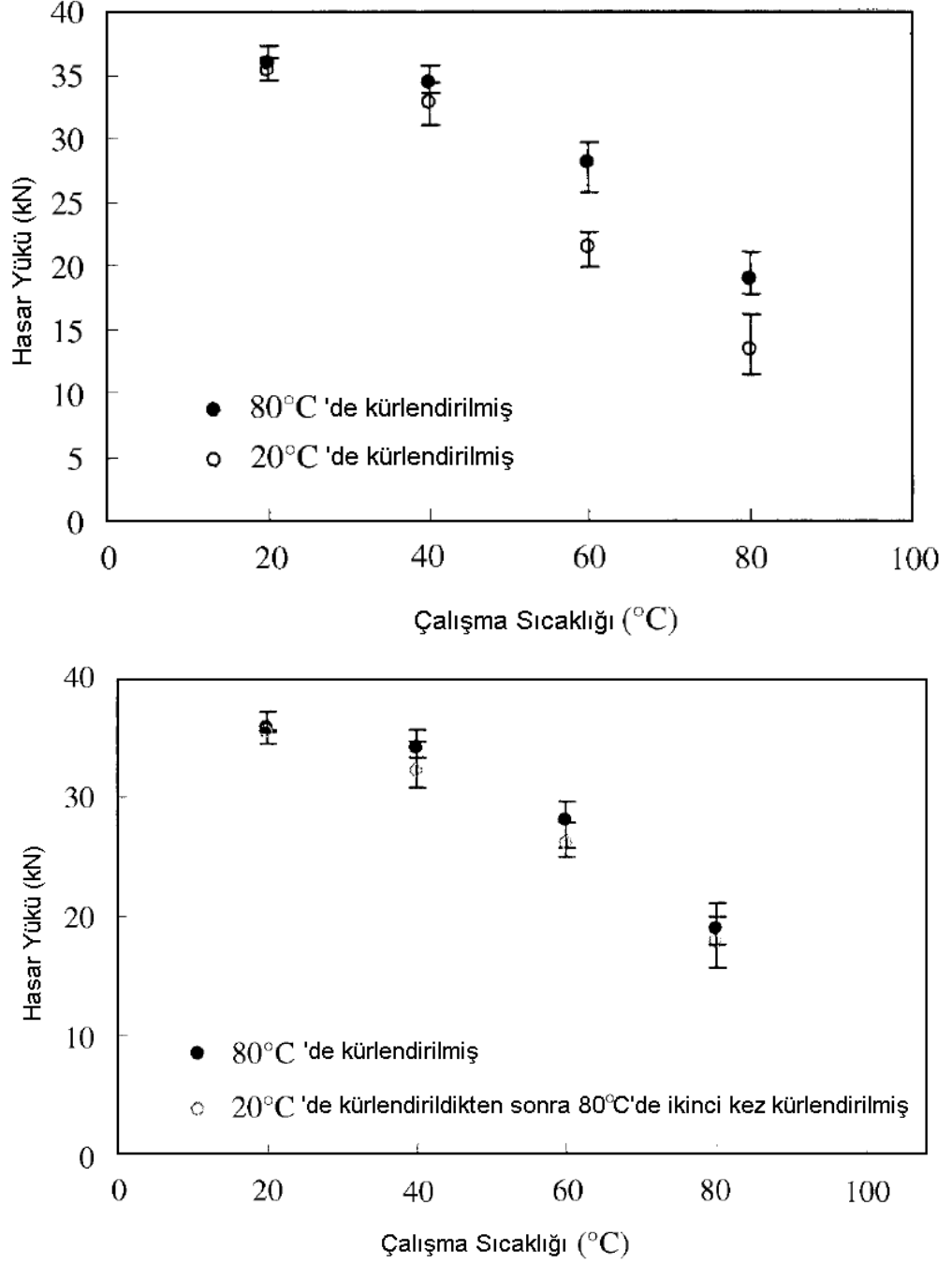
Yapıştırıcıların polimer esaslı olmaları sebebiyle sıcaklık artışı ile viskoziteleri düşmektedir. Düşük viskoziteli yapıştırıcıların daha iyi ıslatma sağladıkları bilinmektedir. Yapıştırmanın oda koşullarından daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi durumunda, yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunması sağlandığından daha yüksek dayanımlı birleştirmeler elde edilmektedir.



Şekil 4.2: Boru birleştirmeleri ile gerçekleştirilen çalışmada (a) 20°C’de kürlendirilmiş (b) 80°C’de kürlendirilmiş numunelerin SEM görüntüleri [12]

Boru birleştirmeleri ile yapılan çalışmalarda 20°C’de hazırlanan birleştirme ile 80°C’de hazırlanan birleştirmelerin dayanımları çekme testi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2, yüksek sıcaklıkta kürlenmenin, yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunduğunu ifade eden bir çalışmadan alınmıştır. 0,1 mm’lik yapıştırıcı kalınlığı için 80°C’lik ortam sıcaklığında kürlenene numunenin daha yüksek çekme mukavemeti değeri verdiği görülmüştür. Aynı çalışma 1 mm’lik yapıştırma kalınlığı ile tekrarlandığında ise 20°C’lik ortam sıcaklığında kürlenene numunenin daha yüksek çekme mukavemeti verdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak, yüksek sıcaklıkta kürlendirme esnasında ortaya çıkan artık ısıl gerilmelerin, dayanım yönünden daha iyi ıslatma ile sağlanan faydaları ortadan kaldırması gösterilmiştir. Sıcaklık artışıyla sağlanan daha kaliteli ıslatma yapıştırıcı kalınlığının artması ile ortadan kalkmaktadır [12]. Aynı çalışmada, 20°C’lik ortamda kürlenene numunelerin 60°C ve üzeri çalışma sıcaklıklarında dayanımlarını, 80°C’lik ortamda kürlenene numunelere göre daha fazla yitirdikleri belirlenmiştir. Kim ve Lee ayrıca iki aşamalı kürlenme (postcuring) çalışmaları da

gerçekleştirmişlerdir. İki aşamalı kürlenmede yapıştırıcı öncelikle oda sıcaklığında kürlenmekte ardından daha yüksek sıcaklıklı bir ortamda bekletilmektedir Yapıştırıcı kürlenmesini yüksek sıcaklıklı ortamda tamamlamaktadır. Böylelikle yapıştırıcı özelliklerinde bir miktar iyileşme sağlanmaktadır [13].



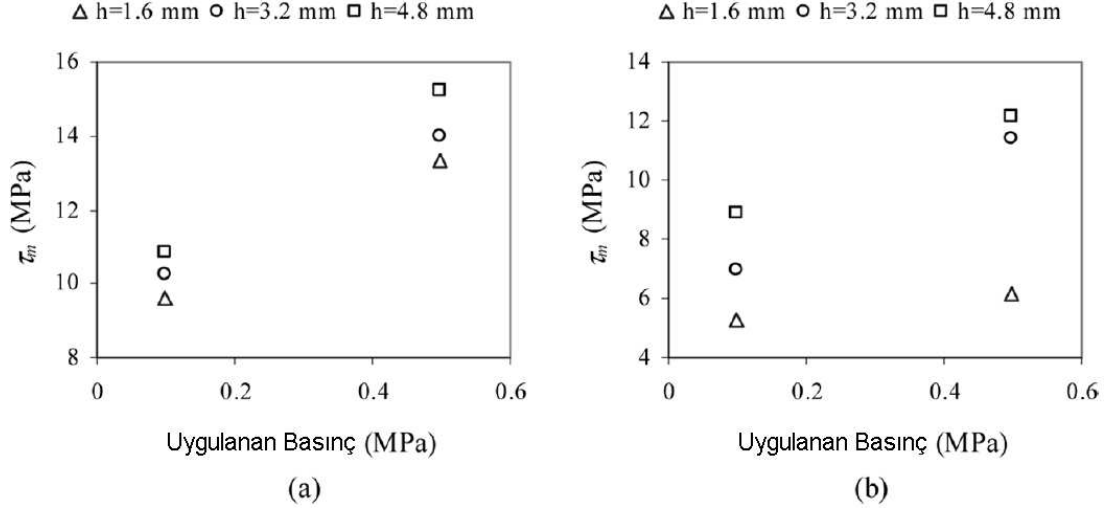
Şekil 4.3: İki aşamalı kürlenmenin çalışma sıcaklığına bağlı olarak dayanım üzerindeki etkisi [12]

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi iki aşamalı olarak kürlendirilmiş numuneler çalışma sıcaklığı arttıkça dayanımlarında daha az kayıp vermektelerdir.

4.1.2.2. Basıncın Kürlenmeye Etkisi

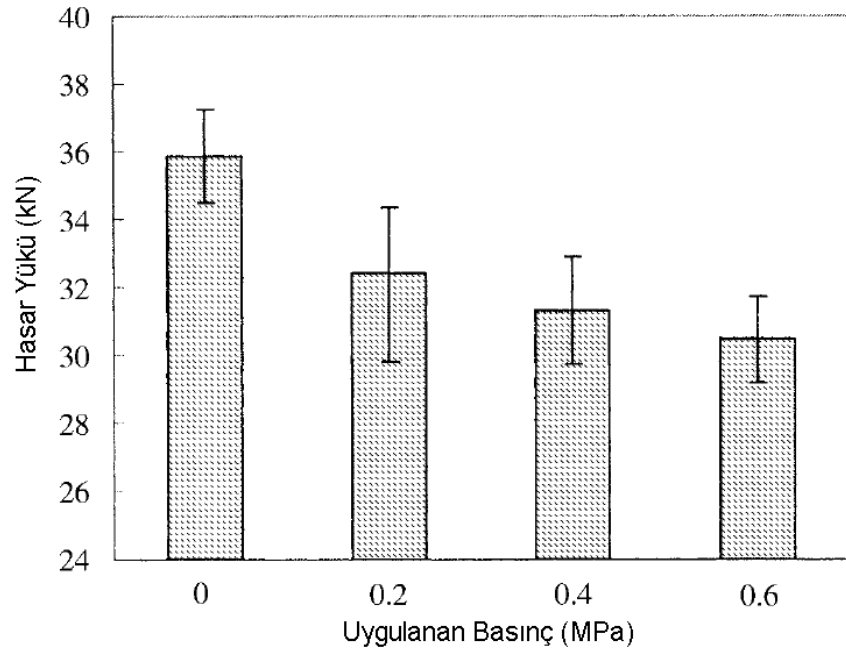
Basıncın da sıcaklık gibi kürlenme sürecine ve kürlenme sonrası mekanik özellikleri doğrudan etki eden bir etkidir. Kürlenmenin gerçekleştiği ortamın basıncının birleştirimin mekanik performansına etkisi incelemek üzere çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Şerit levhalar ile yapılan çalışma sonrasında kürlenme ortamındaki basıncın artması ile birleştirme mukavemetinde artma meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.4) [14].



Şekil 4.4: Kürlenme ortamındaki basınç artışının birleştirimin dayanımına etkisi (a) 25 mm bindirme mesafesi (b) 100 mm bindirme mesafesi [14]

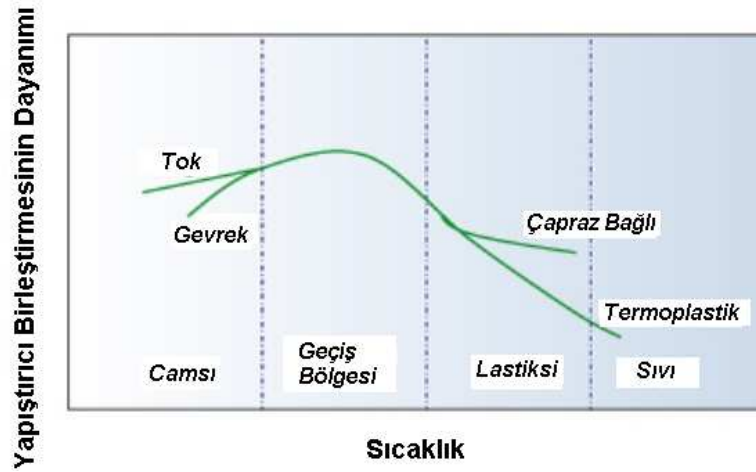
Boru birleştirmeleri ile gerçekleştirilen çalışmada ise kürlenmenin tamamlandığı ortam basıncının artmasıyla, birleştirimin dayanım değerlerinin düştüğü kaydedilmiştir (Şekil 4.5) [12].



Şekil 4.5: Boru birleştirmelerinde kürlenme ortamı basıncının birleştirme dayanımına etkisi [12]

4.1.3 Camsı Geçiş Sıcaklığı

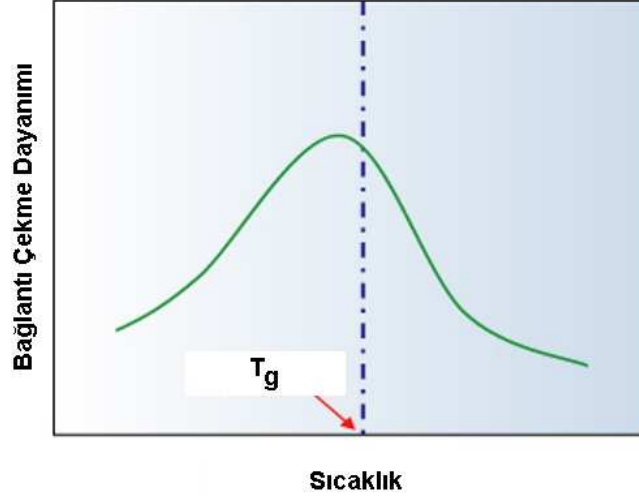
Polimerik malzemelerin yapışmalarını etkileyen en önemli temel unsurlardan biri de camsı geçiş sıcaklığıdır. Camsı geçiş sıcaklığı polimer malzemenin camsı (glassy) halden, kauçuğumsu (rubbery) hale geçtiği sıcaklık olarak tanımlanmaktadır [15]. Yaygın kullanımda T_g ile temsil edilmektedir. Amorf polimerler yeterince düşük sıcaklıklarda sert ve kırılabilirler. Böyle bir polimer ısıtıldığında camsı geçiş sıcaklığı denilen bir sıcaklıkta yumuşayarak kauçuk özellikleri gösterir. Bu ifade her ne kadar tek bir sabit sıcaklıkta geçiş olduğu algısına sebep olsa da, yapı değişimi bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Bu aralığın yaklaşık olarak orta noktası camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olarak kabul edilmektedir [15]. Camsı geçiş sıcaklığı sabit değildir. Polimerin molekül ağırlığı, polimer bünyesindeki çapraz bağlanmanın derecesi, polimerin zincir yapısı, T_g 'yi belirleme kullanılan test yöntemi camsı geçiş sıcaklığını etkileyen etkenler olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Tek sıra bindirmeli bağlantılarda sıcaklık değişiminin polimer yapıya etkisi [15]

Camsı geçiş sıcaklığı yapıştırıcı sistemlerinde polimerin davranışını belirlemek için etkili bir fiziksel özelliktir. Çünkü T_g , polimerik sistemde oluşan moleküler hareketlerin anlaşılabilir olmasını sağlar. Moleküler hareketler ise adezyon, kohezyon ve diğer polimer özelliklerini açıklayan temel bir olgudur. Düşük sıcaklıklarda katı haldeki polimer yapıda moleküller daha hafif ve bağımsız titreşimler yaparlar. Polimer sıcaklığı artırılarak, belirli bir sıcaklık değerine ulaşıldığında ise moleküller aniden daha esnek ve bağımsız hareket etme eğilimine girerler. Molekül hareketliliğinde artan esneklik, zincir parçalarını ayırmaya ve molekülleri serbertçe hareket ettirmeye yetecek güçte titreşimler oluşmasına sebep olur. Molekül serbestliğinin arttığı bu sıcaklık camsı geçiş sıcaklığıdır. Camsı geçiş sıcaklığının üstüne çıkıldıkça moleküller arası mesafe gitgide açılmakta ve zincirler olması gerekenden uzun olmaktadır. Bu durum yapıştırıcıdan beklenen dayanımın alınmasını zorlaştırmaktadır (Şekil 4.6) [15]. Camsı geçiş sıcaklıkları malzemelere göre çok farklı değerlerdedir. Örneğin epoksi sistemler için 100°C civarında olan bu değer, doğal kauçuk için -73°C 'dir.

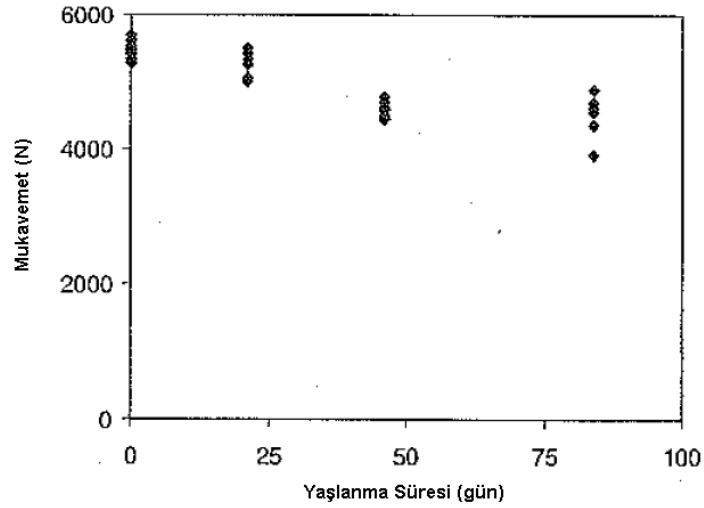
Yapıştırıcıların yüksek sıcaklıktaki dayanımları camsı geçiş sıcaklığı ile doğrudan ilgilidir. Yapıştırıcıdan yüksek dayanım beklentisi var ise camsı geçiş sıcaklığının bağlantının çalışma sıcaklığının üzerinde olmalıdır. Düşük T_g 'ye sahip yapıştırıcılarda düşük sıcaklık performansı almak daha güçtür, bunun sebebi bu sıcaklığın altında yapıştırıcıların kırılgan davranış göstermeleridir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Camsı geçiş sıcaklığı civarında polimer malzemenin çekme dayanımının değişimi [15]

4.1.4. Çalışma Ortamı Koşulları

Çalışma ortamının içinde bulunduğu çevresel etkenler, yapıştırıcı birleştirmesinin performansında son derece önemli bir yere sahiptir. Çevresel etkenler ile yaşanan birleştirmede mekanik özellikler zamana bağlı olarak azalmaktadır. Bu yaklaşımın deneysel sonuçları birçok çalışma ile ortaya koyulmuştur. Bu çalışmalara ait bir örnek şekilde verilmiştir (Şekil 4.8) [16].

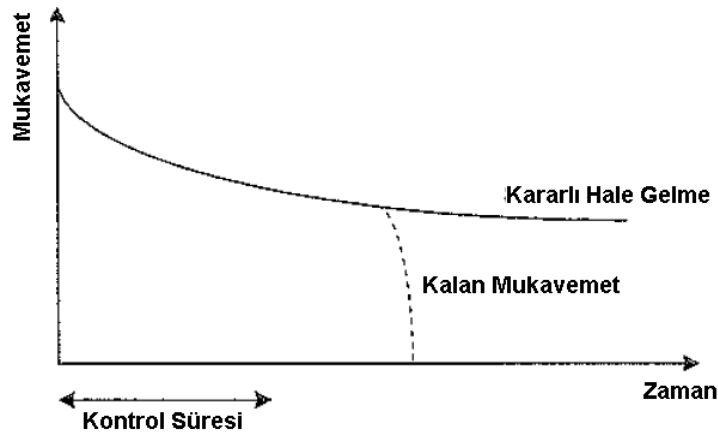


Şekil 4.8: Kaplanmış çelik ve çift komponentli PU yapıştırıcı ile 60°C ve %95 bağıl nem koşullarında yapılmış bir yaşlanma deneyine ait sonuçlar [16]

Yaşlanma deneyleri yüksek nem ve yüksek sıcaklık koşullarında hızlandırılarak uygulanmaktadır. Gerçekleştirilmiş çalışmalar sonucunda buhar ya da sıvı haldeki su, sıcaklık, bağlantının çevresel etkilere maruz kalma süresi, uzun süreli yüklemeler ve çevrimsel sıcaklık değişimleri yapıştırma bağlantıları için önemli etkilere sahiptir. Bunların

arasında suyun en önemli etken olarak ön plana çıktığı uygulamalarda belirlenmiştir. Yapıştırıcıların bozulma (degradation) mekanizmalarının, bu etkenlerle ne şekilde ilişkilendirilebileceği, araştırmacılar tarafından henüz tam olarak ifade edilememiştir [16].

Birçok çalışmada yapıştırma birleştirmelerinin mekanik özelliklerinin, yaşlanma süresince başlangıçta ciddi oranda azaldığı ve belirli bir değerden sonra sabitlendiği görülmüştür (Şekil 4.9). Ayrıca mekanik özelliklerin hızlı ve ani bir şekilde sıfıra inebildiği de tecrübe edilmiştir. Bu sebeple literatürde yapıştırmadaki bozulmanın zamana bağlı değişimi açıklanamamış bir sorun olarak değerlendirilmektedir [16].



Şekil 4.9: Yapıştırıcıdaki bozulmanın zamana bağlı gelişiminin şematik gösterimi [16]

Yapıştırma bağlantıların kullanım süresince sağlam kalması, başlangıçtaki mukavemetinden çok daha önemlidir. Yapılan pek çok çalışma yapıştırıcı ile hazırlanmış bağlantıların çevresel ortamlar nedeniyle sağlamlığını kaybettiklerini göstermiştir [17].

4.1.4.1. Nemli Çalışma Ortamının Etkisi

Su, sıvı veya buhar halde iken tüm yapıştırma bağlantıları için tehlikelidir. Su, yapıştırıcıların kullanımını sınırlandıran ve çevresel kararlılığı zorlaştıran önemli bir etkidir. Nem yapıştırma birleştirmesine temelde iki şekilde olumsuz etki doğurmaktadır [9].

- a. Yapıştırıcının kendisinde meydana getirdiği bozulma
- b. Yüzey ile yapıştırıcı arasına girerek meydana getirdiği bozulma

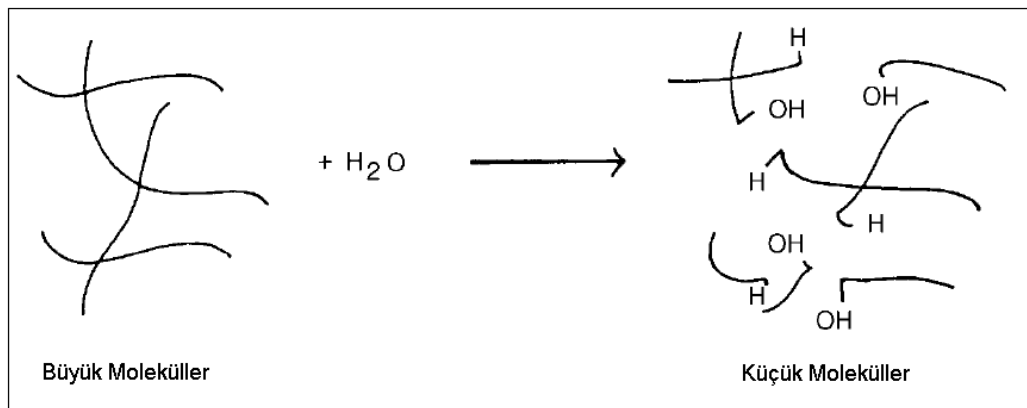
Su, yapıştırıcının yapısına nüfuz ederek özelliklerini değiştirir. Yapıştırma ara yüzeyinde su bulunması ise daha büyük bir sorundur. Su, her ortamda bulunabilmesi

ve sahip olduğu özellikler sebebiyle sorun teşkil etmektedir. Ara yüzey kuvvetlerinde iyon çiftlerinin katkısının bulunduğu durumlarda, suyun yüksek geçirgenliği önem kazanmaktadır. Ayrıca yüzey gerilimi yüksek olduğu için, yapıştırıcı ile metal yüzey arasındaki van der Waals kuvvetlerinin azalmasına sebep olarak yapışma kuvvetini azaltıcı etki gösterir. Metallerde, yapısal yapıştırıcılar ile sağlanan bağlantıların mukavemetinin azalması, uygun bir ön yüzey işlemi ile veya uygun bir bağlayıcı kullanımı ile önüne geçilebilecek bir sorundur [16].

İç bozulma olarak tanımlanan, yapıştırıcının kendisinin zamana bağlı olarak nemden olumsuz etkilenmesi, yapıştırıcının bünyesine su alması (emmesi) ile gerçekleşir. Yapıştırıcılar su alma hızlarına ve miktarlarına bağlı olarak değişik seviyelerde bozulurlar. Su alma hızları ise bir takım sabitler ve katsayılar ile belirlenmektedir. İlgili tablolar literatürde bulunmaktadır. Yapıştırıcı içine emilmiş suyun, kürlenmiş yapıştırıcıda meydana getirdiği azalma Tablo 4.1’de verilmiştir [9].

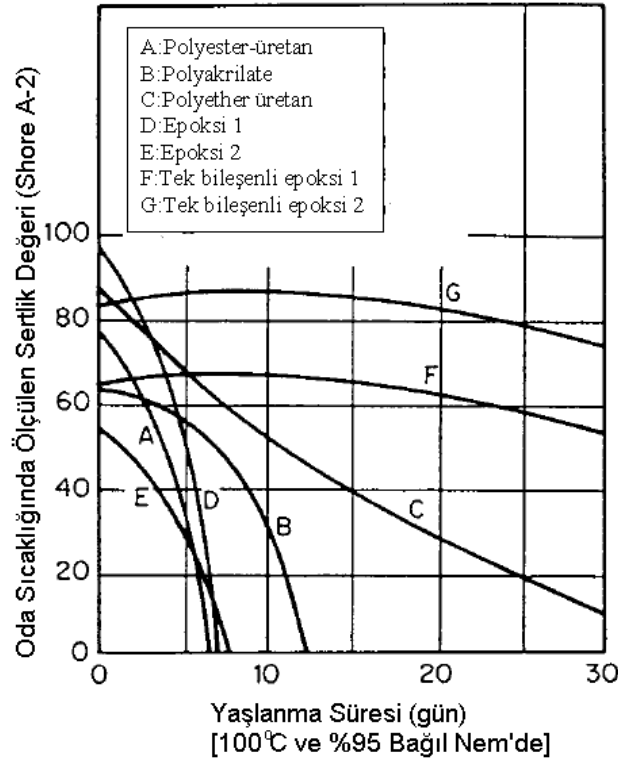
Tablo 4.1: Suyun yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi [9]

Yaşlanma Koşulları	Alınan Su Miktarı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopmadaki Uzama (%)	Hasar Biçimi
Başlangıç	0	73	5	Gevrek
3 ay, %65 Bağlı Nem	2,9	52	263	Sünek
5 gün, 50°C'de Su	9,4	19	260	Lastiksi



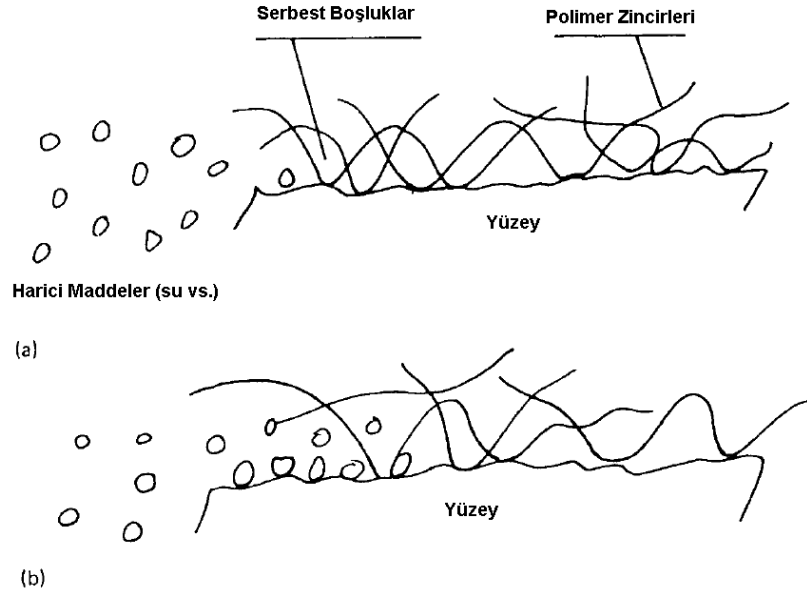
Şekil 4.10: Polimer zincirlerinin hidroliz tepkimesi ile bozulması [9]

Yapıştırıcının hidroliz tepkimeleri ile bozulması, ana polimerin zincir yapısına bağlıdır. Şekil 4.10'da polimer zincirlerinin su ile hidroliz tepkimeleri tarafından tahribatı şematik olarak gösterilmiştir. Yapılan bir başka deneysel çalışmada ise yüksek nemli ortamda bulunan yapıştırıcı numunelerinin belirli kontrol sürelerinde sertlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.11'de yapıştırıcıların sertlik değerlerindeki düşme açıkça görülmektedir [9].



Şekil 4.11: Yapıştırıcı malzemelerin sertlik değerlerinin nemin etkisi ile zamanla değişimi [9]

Yapışan yüzey-yapıştırıcı arasına giren su yapıştırıcı performansını olumsuz etkilemekte, nemin etki ettiği süre arttıkça bağlantı dayanımındaki azalma artmaktadır.

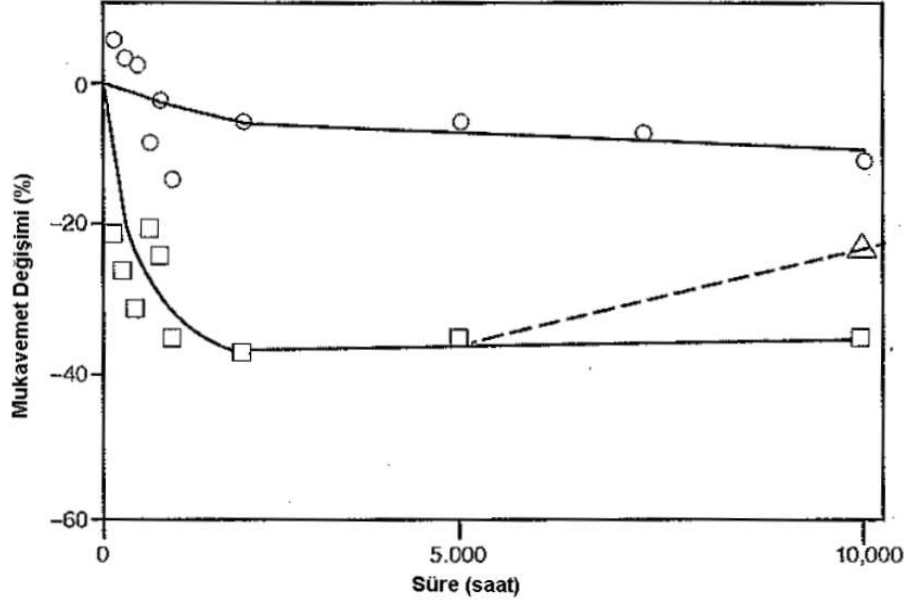


Şekil 4.12: Suyun ara yüzeye girişinin şematik gösterimi [9]

Suyun yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasına girme mekanizması Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu mekanizma birçok birleştirmede dayanımı azaltan esas etkindir. Yapılan çalışmalarda, yaşlanma süresinin başlarında birleştirmede ortaya çıkan hasar türünün kohezyon kusuruna yakın olduğu, artan yaşlanma süresi ile birlikte adezyon (yapışma) kusuruna doğru değiştiği belirlenmiştir [9].

Literatürde metalik yüzeylere uygulanan katı yapıştırıcıların nemli ortamlardan nasıl etkilendiğine dair birçok veriye ulaşılmaktadır. Bu veriler çoğunlukla bağlantı mukavemetinin zamana bağlı değişim grafikleri şeklinde verilmektedir. Bağlantı mukavemeti başlangıçta hızla azalmakta ve zamanla çok düşük değerlere veya sıfıra gitmektedir. Söz konusu eğrilerin şekilleri genel olarak birbirine benzemekle beraber mukavemetin başlangıçtaki azalma hızı ve ulaştığı minimum değerler farklılık göstermektedir [16].

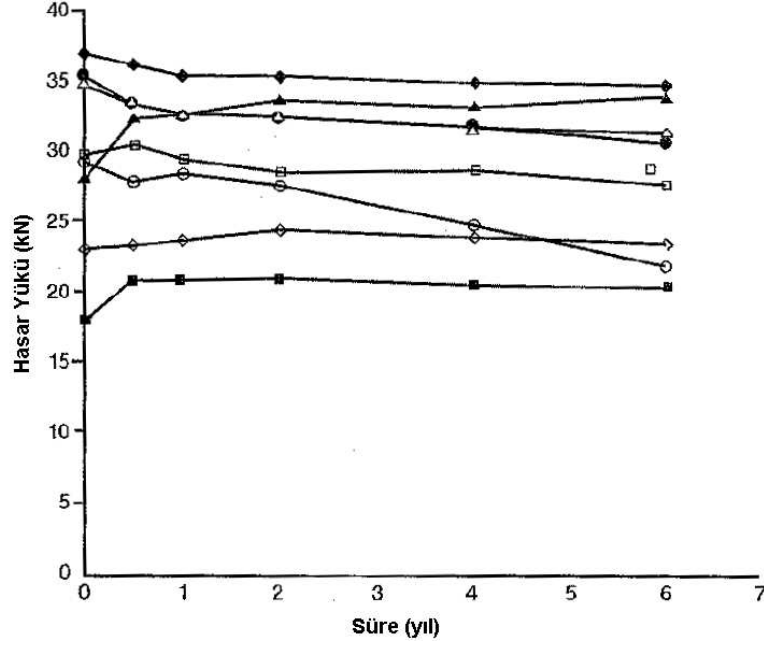
Brewis, Comny ve diğ. tarafından gerçekleştirilmiş çalışmalar sonrasında alüminyum ile hazırlanmış yapıştırma bağlantıları 50°C sıcaklık ve %100 bağıl nem ile 50°C sıcaklık %50 bağıl nem koşullarında bekletilmiştir. Deney sonuçları ile elde edilen eğriler Şekil 4.13’dedir.



Şekil 4.13: Nemli ortamda bekleme süresine bağlı olarak dayanımdaki azalma. (o 50°C %50 bağıl nemde, □ 50°C %100 bağıl nemde, Δ 50°C %100 bağıl nemin ardından 50°C %50 bağıl nemde bekletilen numuneye ait sonuçlardır) [16]

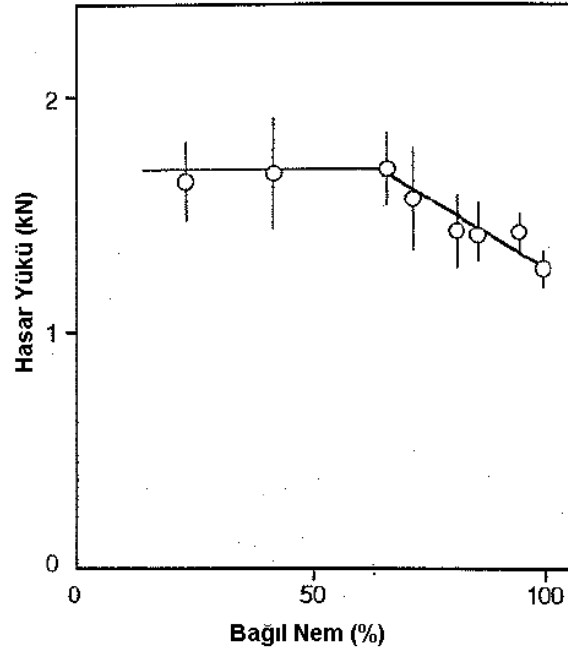
Bu deneyde elde edilen sonuçlar; 50°C ve %100 bağıl nem koşullarında bekletilen numunelerin dayanımının başlangıçta %40-60 azaldığını ve bu değerde sabitlendiğini; 50°C ve %50 bağıl nem ortamında bekletilmiş referans numunelerin dayanımında kayda değer bir azalma görülmediği; 50°C ve %100 bağıl nem şartlarında 5000 saat boyunca bekletilen numuneler daha sonra 50°C ve %50 bağıl nem ortamında 5000 saat daha bekletildiklerinde, bağlantı mukavemetinde önemli ölçüde iyileşme görüldüğü şeklindedir [16].

Bağlantı mukavemetinin %80-100 arası yüksek bağıl nem ortamında zayıfladığı görülmekle beraber, %50 ve daha düşük bağıl neme sahip ortamlarda herhangi bir mukavemet azalması görülmeden uzun süreli dayanım sağlandığı sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Örneğin DeLollis (1977), laboratuvar ortamında bekletilen epoksi-alüminyum bağlantılarının 11 yıl boyunca aynı mukavemette kaldığını göstermiştir. Benzer şekilde, Brewis ve diğ., epoksi yapıştırıcılarla yaptığı deneylerde, 10000 saat boyunca 20°C ve %45 BN ortamında bekletilmiş numunelerin dayanımında kayda değer bir azalmaya rastlamamıştır. Ashcroft, Digby ve Shaw (2001) tarafından farklı yapıştırıcı tipleri kullanılarak yapılan deneylerde ise, ortalama 25°C ve %55 bağıl nem şartlarında altı yıl bekletilen numunelerin mekanik dayanımında azalma görülmemektedir Şekil 4.14 [16].



Şekil 4.14: Çeşitli türlerde yapıştırıcılar kullanılarak hazırlanmış, 6 yıl süre ile ortalama %55 bağıl nemde bekletilmiş numunelerde tespit edilen dayanım değişimi [16]

Yukarıda açıklanan çalışmalara benzer şekilde Gledhill, Kinloch ve Shaw, yapıştırıcılara zarar verecek kritik bir nem konsantrasyonu olduğunu ve buna karşılık gelen bir kritik bağıl nem oranının bulunduğunu öngörmüş ve bu konuda deneyler yapmıştır. Epoksi ile yapıştırılan bağlantılar 20°C, 40°C, 60°C ve 90°C sıcaklıkta suda ve 20°C, %55 bağıl nem ortamında bekletilmiş, suda bekletilen tüm numunelerin zayıfladığı görülmüştür. Sonuç olarak, kırılma mekaniği yaklaşımıyla bir yapıştırıcının kritik mukavemet değerine ulaşması için bulundurması gerekli kritik su konsantrasyonunun %1,35 olduğu tespit edilmiştir. Brewis, Comyn ve diğ. tarafından epoksi ile birleştirilmiş alüminyum numuneler üzerinde 10080 saat süresince yapılan yaşlandırma işleminden sonra alınan ölçümlerde ise kritik bağıl nem oranı %65 olarak bulunmuştur (Şekil 4.15). Bu ise yapıştırıcı içerisinde %1,45'lik su yüzdesine tekabül etmektedir ki bu sonuç, Gledhill, Kinloch ve Shaw'ın elde ettiği % 1,35'lik sonuçla büyük yaklaşıklıkla örtüşmektedir [16].



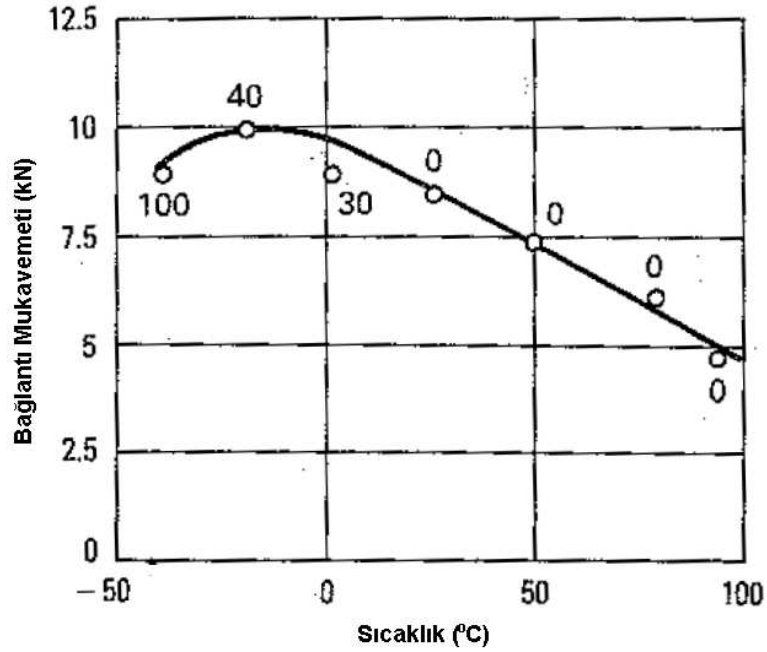
Şekil 4.15: Bağıl nemin birleştirme dayanımına etkisi [16]

4.1.4.2. Sıcaklığın Etkisi

Yapıştırıcının sıcaklık ile bozulması sonucu bağlantı mukavemetinde azalma, bağlantıda farklı malzemeler kullanılması durumunda malzemelerin ısı genleşme katsayıları sebebiyle oluşan gerilmelerin yarattığı ek yükler, sıcaklığı yapıştırma birleştirmelerinin performansı için önemli bir etken durumuna getirmektedir.

Yapıştırıcılar için karakteristik özellik olan camsı geçiş sıcaklığından daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu sıcaklığın altında ve üzerinde ya da çok altında ve çok üzerinde yapıştırıcının çok farklı davranışlar sergilediği bilinmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda yapıştırıcılar depolimerize olmaktadır. Yüksek sıcaklık terimi ile bahsedilen sıcaklıklar T_g değerinin üzerindeki sıcaklıklardır. Düşük sıcaklık ise T_g altındaki sıcaklıkları ifade ederken kullanılmaktadır. Sıcaklık etkisi ile yapıştırıcı molekülleri arasındaki mesafe artmaktadır. Mesafe artışı ile birlikte moleküllerin birbirini çekme kuvvetleri azalmakta ve belirli bir mesafeden sonra bu kuvvet çok düşük değerlere inmektedir. Bu değerler yapıştırıcıdan beklenen değerlerin altına indiğinde ise yapıştırıcı iş göremez hale gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise durum biraz daha farklıdır. Düşük sıcaklıklarda yapıştırıcı yapısında çok büyük değişiklikler olmamaktadır. Düşük sıcaklıklarda karşılaşılan sorunların temel sebebi camsı geçiş sıcaklığında uzaklaştıkça yapıştırıcının gevrek yapıya dönmesidir. Diğer taraftan Brewis, Comny ve Shalash'ın yaptığı çalışmalarda yapıştırıcı birleştirmesinin en

yüksek mukavemet değerlerini sıfır derecenin altında verdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.16). Aynı çalışmalarda sıcaklık yükselmesiyle birlikte bağlantı mukavemetinin düştüğü ve hasarın tamamen yapıştırıcı içinde gerçekleştiği (kohesiv) belirlenmiştir [4].



Şekil 4.16: Sıcaklığın alüminyum birleştirmelerinde bağlantı dayanımına etkisi. (Grafik üzerindeki sayılar yapıştırıcı-malzeme arayüzünden ayrılan numunelerin sayıca yüzdesini göstermektedir)

Yapıştırıcı karakteristiklerini belirlemek için çelik yüzeyler ile gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise benzer sonuçlar alınmıştır [18].

Tablo 4.2: Yapışma yüzeyi olarak çelik kullanılan deneyde, sıcaklığın birleştirme dayanımına etkisi

	-50°C	22°C	90°C
Deneysel yorulma dayanımı (kN)	11.0	11.0	9.0

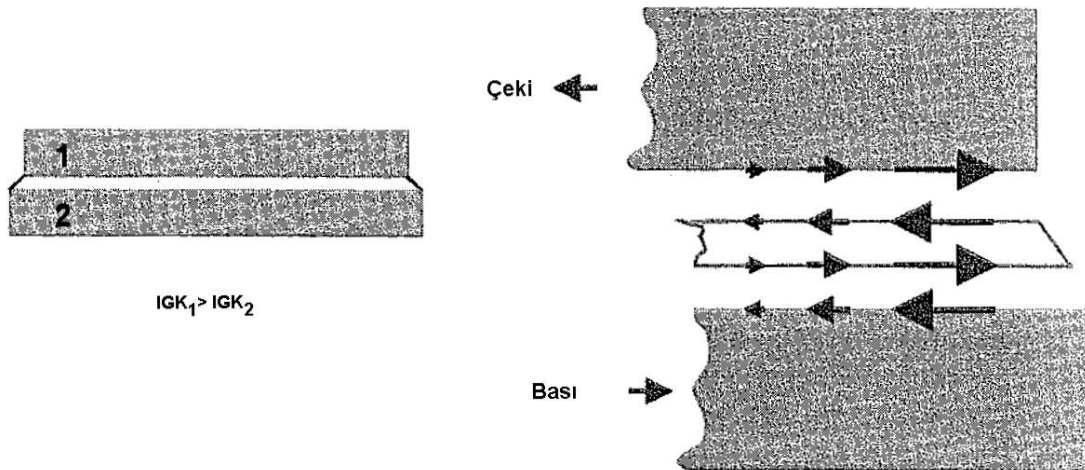
Yapıştırma birleştirmelerinde sıcaklık etkisi sonucu, yapıştırılan ve yapıştırıcı malzemelerin ısıl genleşme katsayılarının (IGK) farklı olması sebebiyle ortaya çıkan bir durum söz konusudur. Birleştirmenin maruz kaldığı sıcaklık değişimi, birleştirme elemanlarında genleşme-daralmalar sonucu kalıntı gerilmeler oluşturarak, bağlantıya karşılaması gereken ilave bir yük yaratmaktadır. Bu durum, birleştirme tasarımını kısıtlayan ve tasarımda dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

Yapıştırıcı olarak kullanılan polimer malzemeler genellikle yapıştırılan malzemeden daha yüksek bir ısı genleşme katsayısına sahiplerdir. Yapıştırıcı malzemelerin IGK'leri, elastik davranış sergiledikleri T_g sıcaklığının üzerinde 2,5-3,5 kat fazladır. Tablo 4.2'de mühendislik yapıştırıcısı olarak yaygın kullanılan epoksilerin ve bazı temel metal malzemelerin IGK'leri verilmiştir [4].

Tablo 4.3: Yapıştırıcı birleştirmelerinde sıkça kullanılan bazı malzemelerin IGK'leri [4]

	Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/K^{-1}$)	
	T_g üzerinde	T_g altında
Epoksi Yapıştırıcı (kürlenmiş-ort.)	180	65
Alüminyum	22	
Çelik	11	
Bakır	17	
Titanyum	9	

IGK'ler arasındaki fark ısı gerilmelerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu tip durumlarda yüksek IGK'ye sahip malzeme diğeri üzerinde bası gerilmeleri oluşturmaktadır. Bu gerilmeler yapıştırıcı kalınlığı boyunca kesme yüklerine dönüşmekte ve kimi zaman bağlantıda hasar oluşturmak için tek başına yeterli olmaktadır. Şekil 4.17'de IGK farkından kaynaklanan kesme yükleri gösterilmektedir.



Şekil 4.17: IGK'si farklı malzemelerin yapıştırılması sonucu sıcaklık değişimi ile ortaya çıkan kesme yükleri [16]

Yüksek sıcaklıkta (150°C) kürlenene bir epoksi yapıştırıcı, bu sıcaklıkta sıvı halden katı hale geçerken hacminde küçülme meydana gelmektedir. Bu olay bile başlı başına bir gerilme yaratmaktadır. Birleştirme bölgesi sıcaklığı yeniden T_g seviyelerine geldiğinde ise bir miktar daha ısı gerilme oluşmaktadır. Ancak T_g civarında yapıştırıcının daha kararlı davranış göstermesi sebebiyle ısı gerilmeler çok büyük etkiler gösterememektedir. T_g altına inildiğinde ise IGK farkından kaynaklanan gerilmeler soğutma miktarına bağlı olarak yeniden ortaya çıkacaktır. IGK'si yakın malzemelerin seçilmesi ısı gerilme kaynaklı sakıncaları ortadan kaldıracaktır. Metal-yapıştırıcı arasındaki IGK farkını azaltmak için yapıştırıcıya metal malzeme tozlarının eklenmesi kullanılan bir yöntemdir [4, 16].

Epoksi ve akrilik yapıştırıcılar için önerilen çalışma sıcaklığı yapıştırıcının T_g değeri civarındadır. Bu sıcaklık değerleri uzun süreli çalışma koşullarında emniyetli çalışma için sınır kabul edilmektedir. Ancak çalışma süresi boyunca, kısa süreli olarak bu sıcaklık seviyesinin dışında kalmak yapıştırma ile sağlanan bağlantının ömrünü kısaltıcı etki yapmamaktadır. Bu bilgiler çeşitli malzeme ve yapıştırıcılarla 1 yıl süre ile sürdürülmüş çalışmalar sonucunda elde edilmiştir [4].

Yüksek sıcaklıkta çalışacak birleştirmeler için gevrek yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Gevrek yapıştırıcı sıcaklık artışıyla esneyecek ve yapıştırıcıdan beklenen davranışı gösterecektir. Aynı durumda sünek yapıştırıcı kullanıldığında düşünülürse, yapıştırıcı sıcaklık artışıyla daha da sünek davranış gösterecek ve yapıştırma yeteneğini kaybedecektir. Aynı yaklaşım ile düşük sıcaklıklarda çalışacak birleştirmeler için de sünek yapıştırıcıların tercih edilmesi fayda sağlayacaktır [19]. Bu durum Da Silva ve Adams'ın yaptıkları çalışmada deneysel olarak ispatlanmıştır [20].

Sıcaklık ve nemin birlikte etkimesinin, yapıştırma birleştirmesi dayanımını en fazla etkileyen durumu oluşturduğu kaydedilmektedir [9].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmaların amacı alüminyum ve bakır boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılacak yapıştırıcının seçimidir. Yapıştırma yöntemi ile birleştirilecek boru birleştirmesi, -25°C ve 25°C sıcaklık aralığı ve %65 ortalama bağıl nemli ortamda çalışacaktır. Boru birleştirmesinin çalışacağı ortam koşulları dikkate alındığında, yapıştırıcı kullanımını engelleyen önemli etkenler söz konusudur. Bunlar, çalışma ortamı sıcaklığının geniş aralıkta çevrimsel olarak değişim göstermesi, çalışma ömrünü %50 ilâ %80 bağıl nem altında geçirecek olması ve boru birleştirmesinin basınçlı akışkan taşıyacak olması sebebi ile bağlantıdaki en küçük hasarın sızıntıya sebep olma olasılığıdır.

Bu etkenleri birleştirme performansını ne şekilde etkilediği araştırılmış, etkileri tespit etmek amacıyla bir dizi deneylerden oluşan bir yöntem geliştirilmiştir. Deney yöntemlerinin geliştirilmesinde, bağlantının çalışacağı koşulların ağırlaştırılmasına önem verilmiştir.

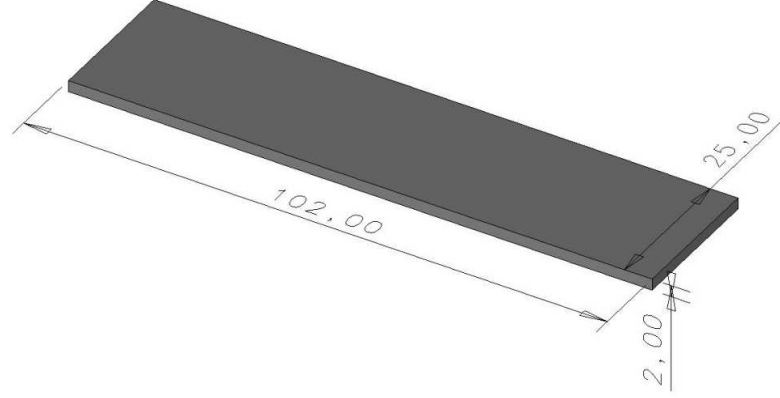
Deneysel çalışmalar 4 farklı yapıştırıcı ile sürdürülmüştür. Bu yapıştırıcıların performansları karşılaştırılmış ve tüm deneylerde en iyi yapıştırıcı seçilmiştir.

5.1. Deney Numuneleri

Deneylerde boru birleştirmeleri ile birlikte levha birleştirmeleri de denenmiştir. Bunun sebebi Al-Cu boru yapıştırma birleştirmelerine uygulanan çekme deneylerinde kopmanın Al borudan meydana gelmesidir. Kopmanın Al borudan meydana gelmesinin sakıncası, çekme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçların Al borunun dayanımı olmasıdır. Amaçlanan ise yapıştırıcının yaşlanma proseslerinden ne şekilde etkilendiğini, bir başka deyişle yapıştırıcının mukavemetini belirleyebilmektir. Çalışma ortamı koşulları sebebiyle, zamanla yapıştırma birleştirmesinde meydana gelen dayanım değişimini yaşlanma deneyleri ile tespit edebilmek amacıyla, doğrudan yapıştırıcı dayanımının ölçülebileceği levha numunelerinin hazırlanmıştır. Levha numunelerine, boru numuneleri ile paralel ve eş zamanlı olarak aynı deney yöntemi uygulanmıştır.

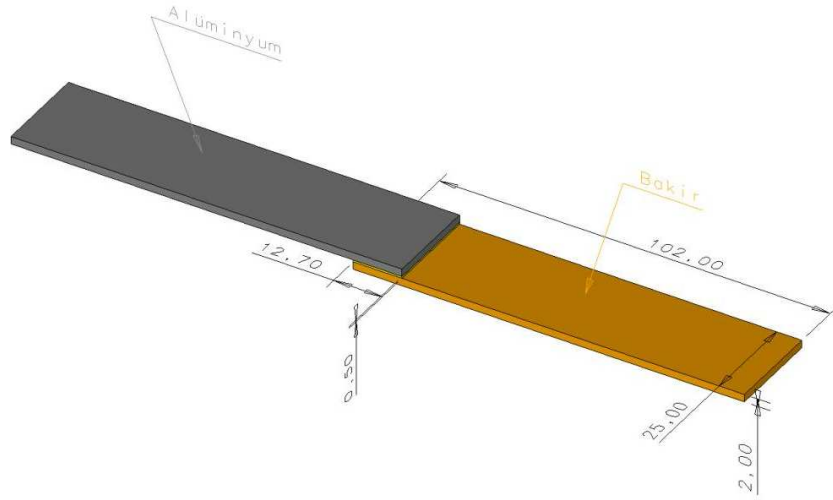
5.1.1. Levha Numuneleri

Çalışmada levha ve boru numuneleri kullanılmıştır. Her iki numune türü için de yapışan malzemeler alaşımsız alüminyum ve saf bakırdır. Levha numuneleri ASTM D 1002 [21] standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Levha numunelerin biçimi ve ölçüleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

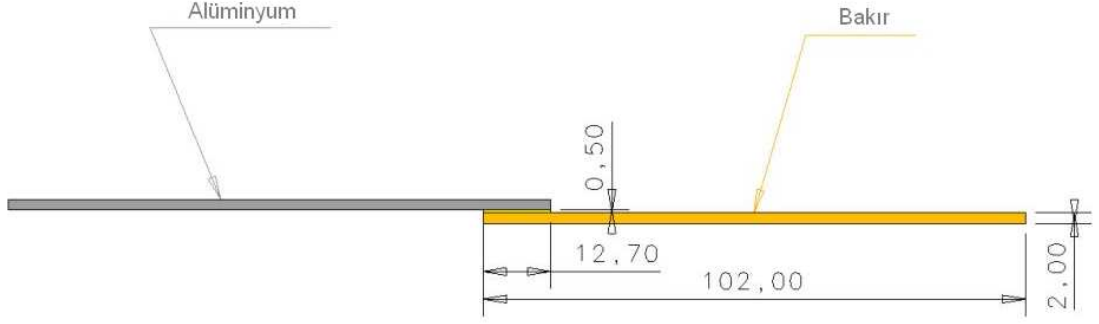


Şekil 5.1: Deneylerde kullanılan levha numunesi

Levhalar yine aynı standarda uygun olarak birleştirilmiştir. Şekil 5.2’de deneye alınan birleştirilmiş deney numuneleri gösterilmektedir. Bindirme uzunluğu 12,7 mm’dir. Yapıştırıcı, kalınlığı 0,5 mm olacak biçimde uygulanmıştır.



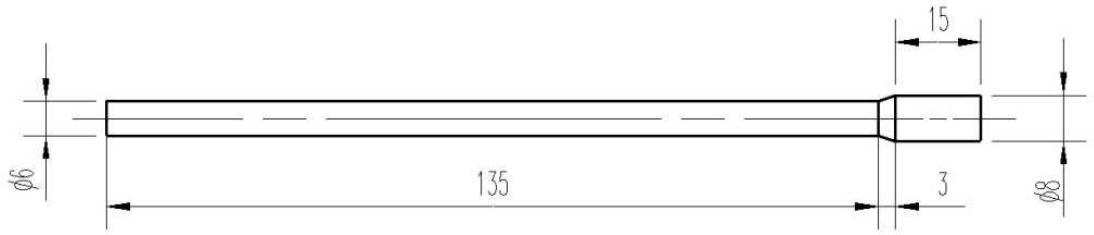
Şekil 5.2: Deneylerde kullanılan birleştirilmiş alüminyum-bakır levha çifti



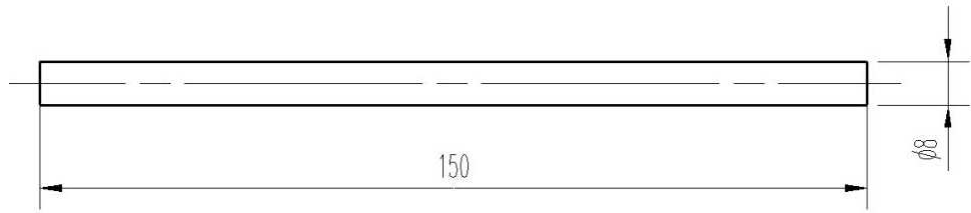
Şekil 5.3: Deneylerde kullanılan birleştirilmiş alüminyum-bakır levha çiftinin kesit görünümü

5.1.2. Boru Numuneleri

Boru numuneleri ise akışkan taşıyan sistemde kullanılan alüminyum ve bakır borulara uygun olarak hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan borulara ait ölçüler Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Boruların et kalınlığı 0,8 mm'dir. Alüminyum borunun bir ucuna, iç çapı 8 mm olacak şekilde havşa açılmıştır. Havşa uzunluğu 18 mm'dir.

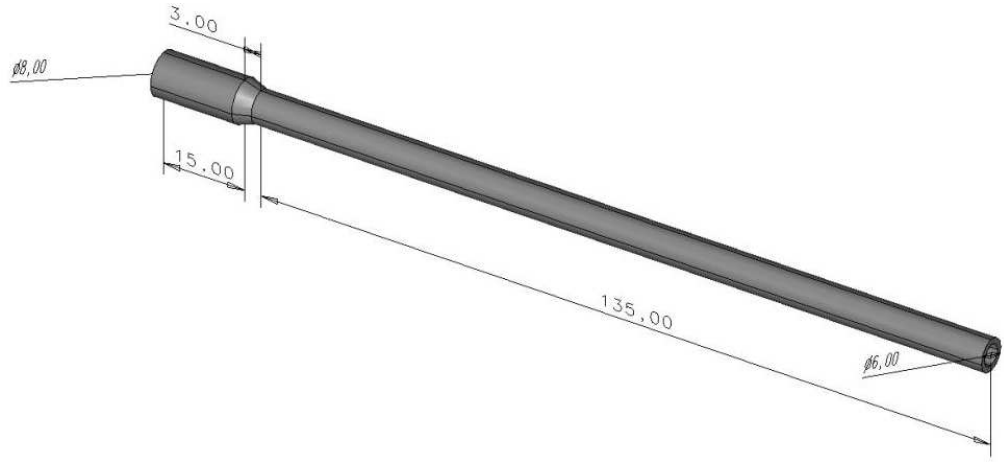


(a)

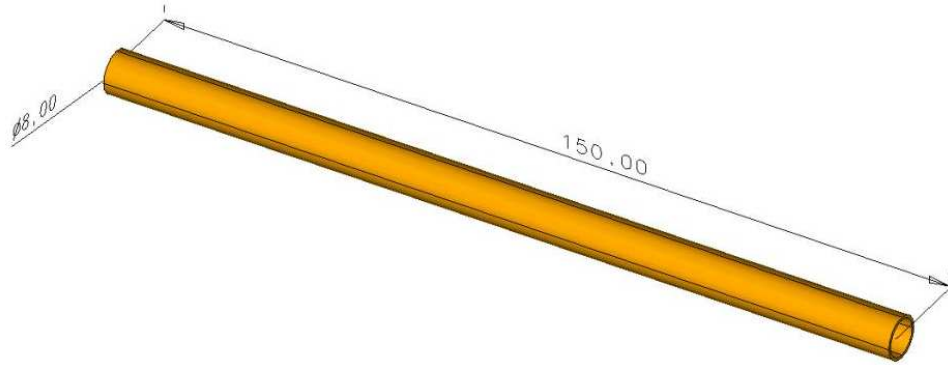


(b)

Şekil 5.4: Deneylerde kullanılan boru numuneleri (a) bir ucuna havşa açılmış alüminyum boru (b) bakır boru

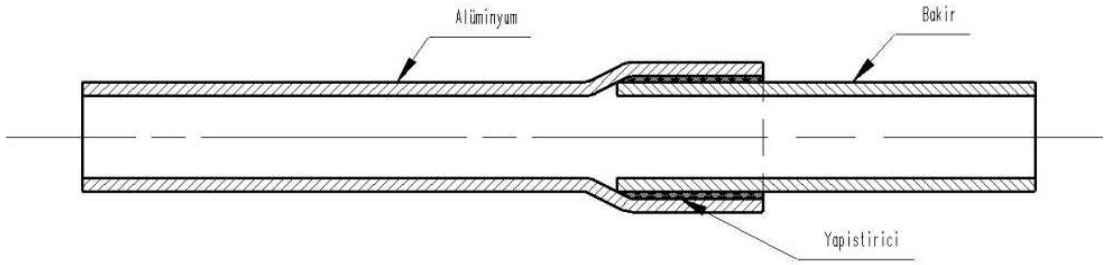


(a)

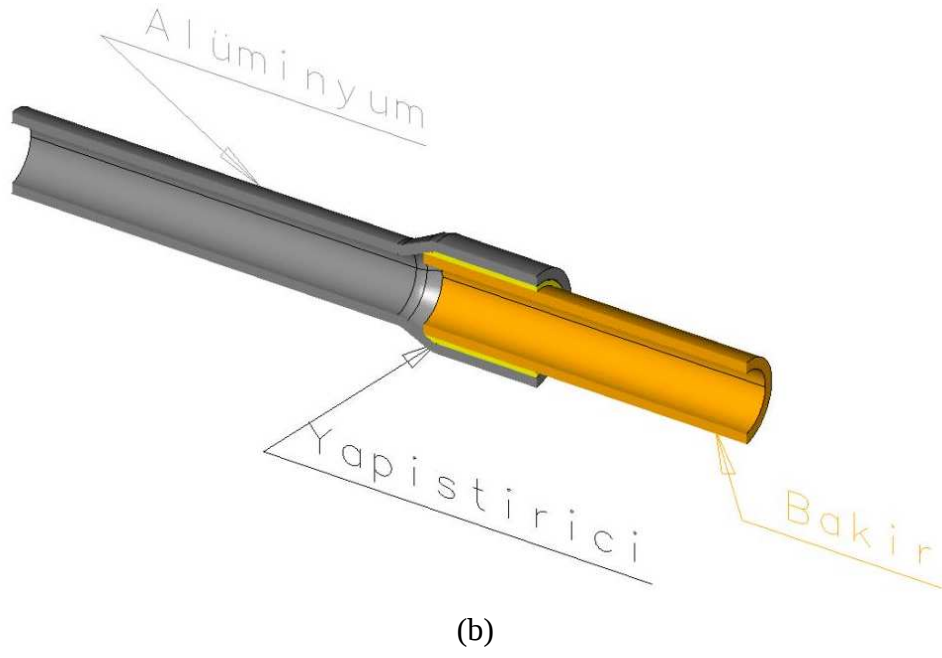


(b)

Şekil 5.5: Deneylerde kullanılan boru numunelerinin 3 boyutlu görünümü (a) alüminyum boru (b) bakır boru



(a)



Şekil 5.6: Birleştirilmiş durumdaki boru numunelerinin (a) kesit (b) 3 boyutlu görünümü

5.1.3. Yapıştırıcılar

Deneylerde 4 farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcıların temel özelliklerini Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Bu tez çalışması Arçelik A.Ş. ile ortak yürütüldüğünden bir takım gizlilik ilkelerine uyma zorunluluğu bulunmaktadır. Bu gizlilik ilkeleri kapsamında, Arçelik A.Ş.’nin talebi doğrultusunda deneylerde kullanılan yapıştırıcıların ticari isimleri kullanılmamış, yapıştırıcılar A, B, C ve D olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 5.1: Deneylerde kullanılan yapıştırıcıların temel özellikleri*

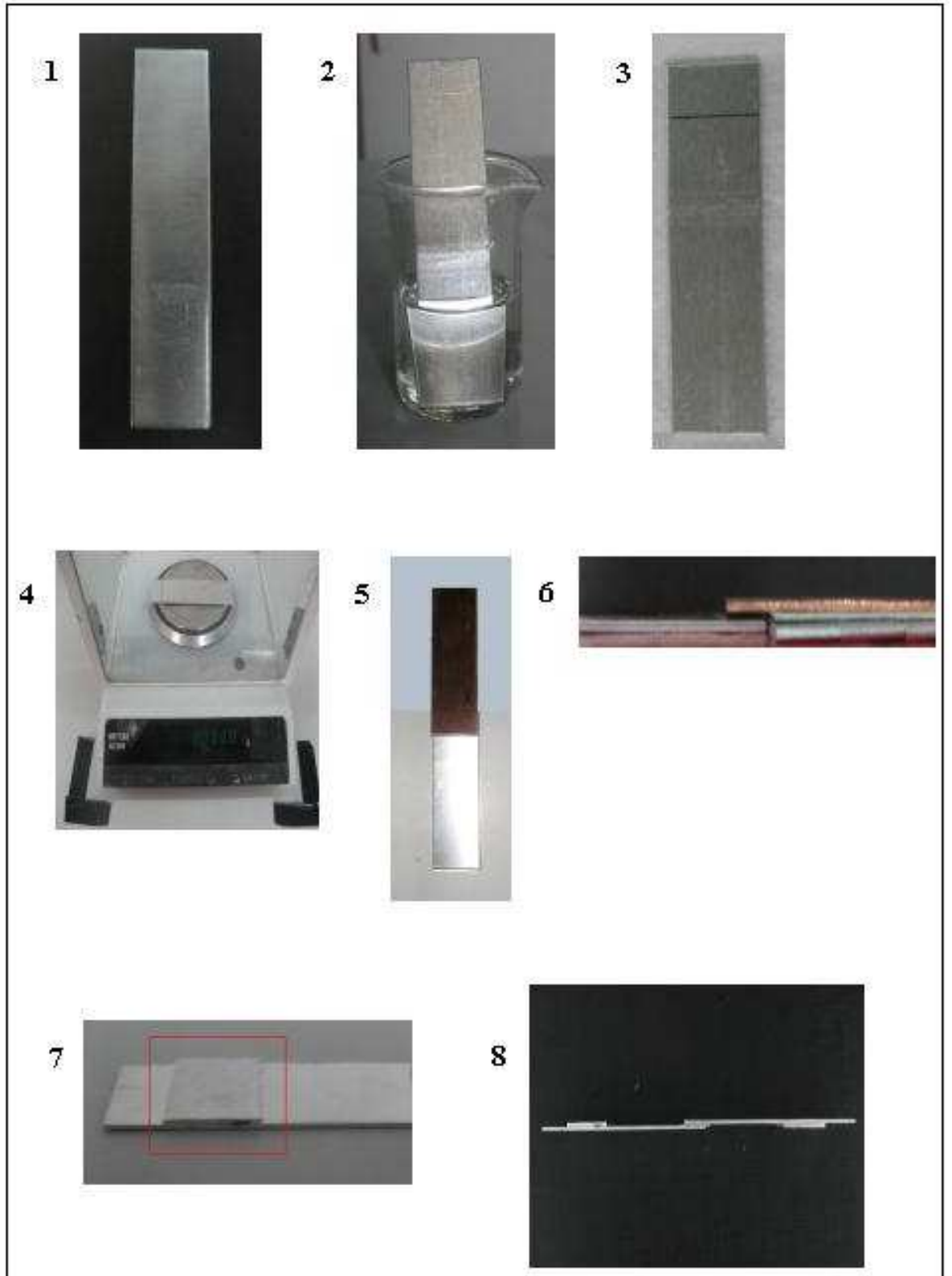
	A	B	C	D
	Yapıştırıcısı	Yapıştırıcısı	Yapıştırıcısı	Yapıştırıcısı
Ana Bileşeni	Epoksi	Epoksi	Epoksi	Epoksi
Komponent Sayısı	2	2	2	2
Oda Sıcaklığında Kürlenme Süresi (dak)	10	1000	13	7
Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	45	50	40	58
Elastiklik Modülü (GPa)	4,2	1,96	3,52	2,3
Davranış Biçimi	Rijit	Esnek	Rijit	Esnek

* Tablodaki tüm bilgiler üretici firmalardan sağlanan bilgilerdir.

5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

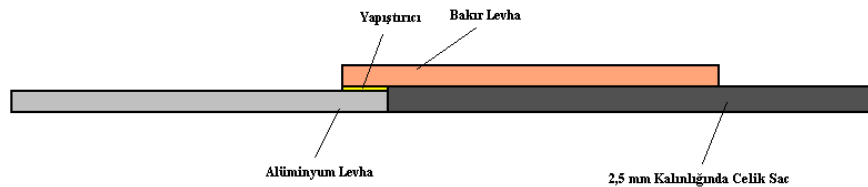
5.2.1. Levha Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada deneye alınacak levha numuneleri hazırlanma biçimi adım adım şu şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7):



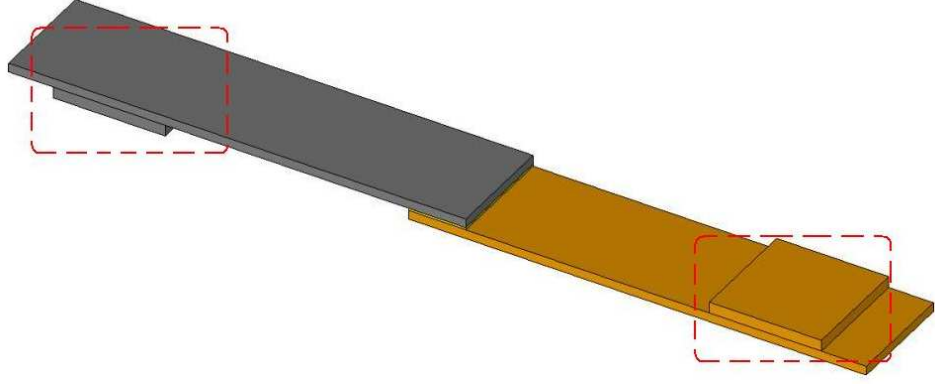
Şekil 5.7: Levha numunelerin hazırlanmasındaki işlem adımları

1. Yapıştırılacak numunelerin zımparalanması. Zımparalama hem bakır hem alüminyum levhaya yapılmıştır. Zımparalama sonrası alüminyum levhalarda yüzey pürüzü ortalama 10 μm ; bakır levhalarda ortalama 8 μm 'dir.
Yüzey pürüzü ölçümünde Mitutoyo Surf test 402 marka ve model iğne uçlu ölçüm cihazı kullanılmıştır.
2. Yapıştırılacak yüzeyin temizlenmesi ve kurulanması. Temizleme işlemi etil alkol ile gerçekleştirilmiştir. Kurulama amacıyla pamuk bez kullanılmıştır.
3. Yapıştırıcı sürülecek bindirme mesafesinin işaretlenmesi. Bindirme mesafesi ASTM D 1002 standardına göre 12,7 mm'dir.
4. Yapıştırıcının levha üzerine sürüldükten sonra teraziye yerleştirerek miktarının tespit edilmesi. Aynı yapıştırıcı için tüm numunelerde eşit ağırlıkta olmasına dikkat edilmiştir. Yapıştırıcı bir önceki adımda numune üzerine çizilen sınırlardan taşmayacak şekilde uygulanmıştır.
5. Levhaların birleştirilmesi. Yapıştırıcı Al levha üzerine uygulanmış, Cu levha Al levhanın üzerine kapatılmıştır.
6. Kürlenme esnasında tüm numunelerde yapıştırıcı kalınlığının aynı olması amacıyla numuneler yapıştırıcı kalınlığının uygulanmasını sağlayacak bir sac kullanılarak sabitlenmiştir (2 mm levha kalınlığı + 0,5 mm yapıştırıcı kalınlığı = 2,5 mm kalınlığında sac) (Şekil 5.8).



Şekil 5.8: Yapıştırıcı kalınlığının sabit olarak uygulanmasını sağlayan düzenek

7. Levhalarda çekme deneyi esnasında moment oluşumunu engellemek için ilave parça eklenmesi. Bu şekilde çekme deneylerinde, kuvvetin doğrudan yapıştırıcıya gelmesini sağlayarak saf kesme (pure shear) durumu oluşturulmaktadır. (Bu işlem çekme deneylerinden hemen önce, çift taraflı şerit bant kullanılarak gerçekleştirilmektedir).

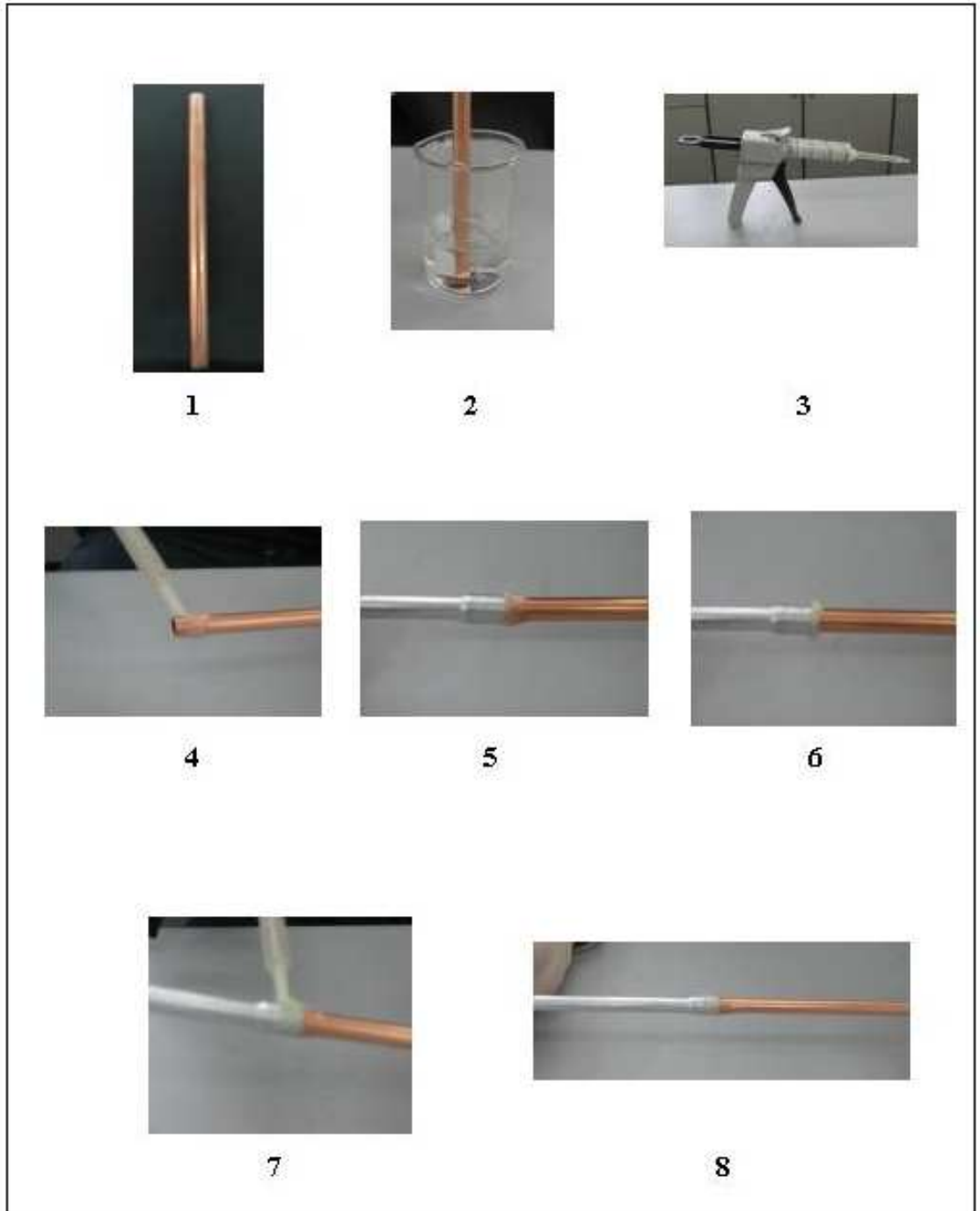


Şekil 5.9: Saf kesme (pure shear) elde etmek amacıyla eklenen parçalar ile deney numunelerinin çekme öncesi son halinin gösterimi

8. Deney numunesinin son halinin kesit fotoğrafı

5.2.2. Boru Numunelerinin Hazırlanması

Boru numunelerinin hazırlanma aşamaları da aşağıda aktarılmaktadır (Şekil 5.10):



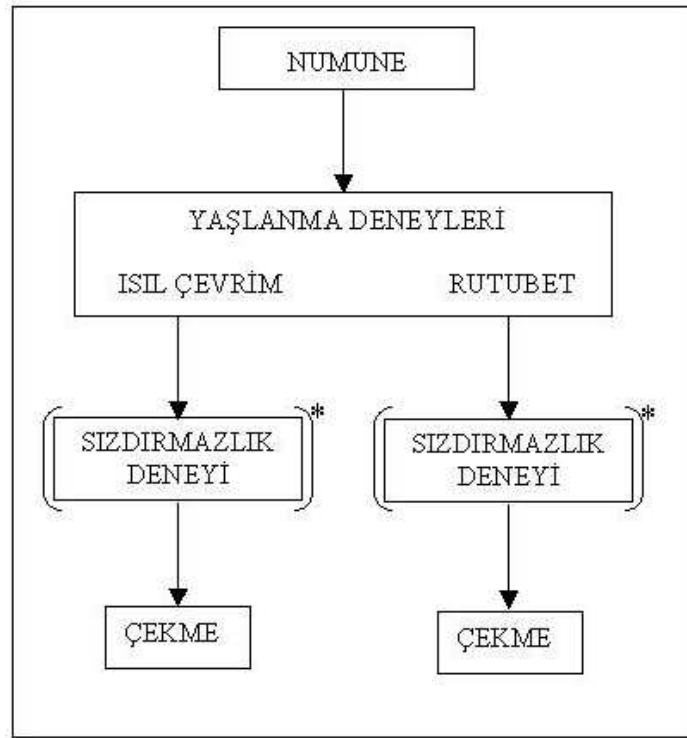
Şekil 5.10: Boru numunelerin hazırlanmasındaki işlem adımları

1. Yapıştırıcı uygulanacak kısmın zımparalanması. Zımparalama birleştirmede yapıştırıcının uygulanacağı Cu borunun dış yüzeyine yapılmıştır. Zımparalama sonrasında tüm numunelerde ortalama pürüz $9\text{ }\mu\text{m}$ 'dir.
2. Zımparalanan yüzeyin temizlenmesi ve kurulanması. Temizlemede etil alkol kullanılmış ve numuneler pamuk bez ile kurulanmıştır.

3. Yapıştırıcı uygulama ekipmanı. Çalışma süresince deneylerde kullanılan tüm numuneler çift bileşenli yapıştırıcılar için hazırlanmış uygulama tabancası ile hazırlanmıştır. Şekil 5.8’de kartuş, karıştırma ucu ve tabanca mekanizması bir arada gösterilmiştir.
4. Yapıştırıcının uygulanması. Yapıştırıcı birleştirmede içe geçecek Cu borunun dış yüzeyine uygulanmıştır.
5. Boruların birleştirilmesi. Yapıştırıcı uygulanan Cu boru, havşa açılmış Al borunun içine sokulmaktadır
6. Boruların birleştirilmesinin ardından yapıştırma bölgesinin görünümü. Boruları iç içe geçirme esnasında bir miktar yapıştırıcı sıyrılmakta ve birleşme çizgisinde birikmektedir.
7. Yapıştırıcının birleştirme bölgesine dağıtılması. Sıyrılan yapıştırıcı, üretici firmalardan alınan tavsiye doğrultusunda birleştirme bölgesine dağıtılmaktadır.
8. Borular ve birleştirme bölgesinin son hali

5.3. Deneyler

Yapıştırma yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin ortam koşullarından nasıl etkilendiklerinin tespiti için Şekil 5.11’de gösterilen deney yöntem ve süreci geliştirilmiştir.



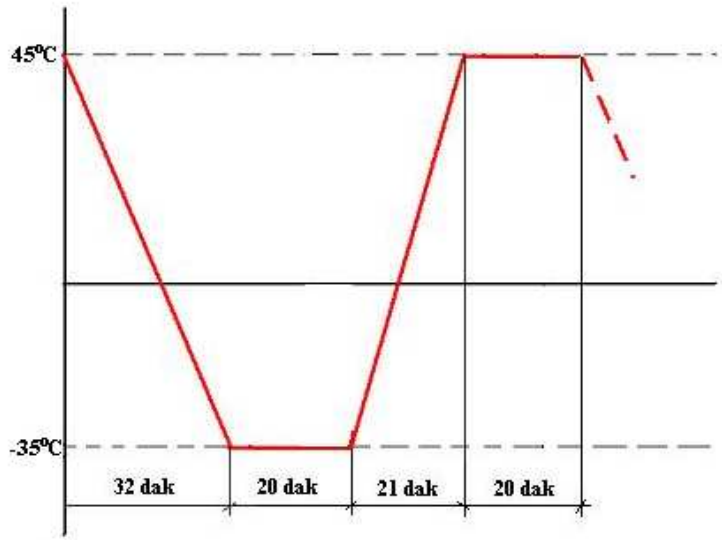
Şekil 5.11: Yapıştırıcı seçimi için kullanılan deney akış şeması. (* Sadece boru numuneleri içindir).

Hazırlanan numuneler yaşlanma deneylerine alınmıştır. Yaşlanma deneyleri ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma olarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Yaşlanma deneylerinin birleştirme dayanımında meydana getirdiği değişimi tespit etmek amacıyla çekme deneyleri uygulanmıştır. Yaşlanma sonrasında çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar, yaşlanma öncesi sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Boru numuneleri için çekme deneyleri öncesinde sızdırmazlık deneyi gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Isıl Çevrim İle Yaşlanma Deneyi

Yapıştırma birleştirmesinin çalışma koşulları incelendiğinde geniş bir sıcaklık aralığı ile karşılaşılmaktadır. Sıfırın altında ve üzerinde değişim gösteren bu sıcaklık çevrimi sırasında birleştirmeyi oluşturan farklı malzemeler, farklı genleşme ve daralma davranışları göstereceklerdir. Bu farklılıklar yapıştırıcıya ek çekme ve basma yükleri getirecek ve birleştirmenin dayanımını olumsuz etkileyecektir. Ayrıca sıfırın altındaki sıcaklıklarda yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığından uzaklaşması sebebiyle ortaya çıkabilecek sorunlar mevcuttur. Olası olumsuz etkilerin mertebesinin tespit edilmesi ve genel anlamda birleştirmenin çalışmasına etkisinin belirlenmesi amacıyla ısıl çevrim ile yaşlanma deneyi tasarlanmıştır.

Sıcaklık çevrimi +45°C ile -35°C aralığında ve %65 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Sınır sıcaklık değerleri belirlenirken boru birleştirmesinin çalışacağı koşulların her iki yönde de üzerine çıkılması suretiyle deney koşullarında ağırlaştırma yapılmıştır. %65 bağıl nem ise birleştirmenin çalışma koşullarındaki çevrimsel bağıl nem değerlerinin ortalaması olarak deneye eklenmiştir. Nem etkisi, ısıl çevrim deneyinde ağırlaştırılmadan uygulanmıştır. Nem etkisi eklenerek, birleştirmenin geniş sıcaklık aralığındaki davranışının, nemli çalışma koşullarında belirlenmesi amaçlanmıştır. Isıl çevrim ile yaşlanma deneylerinde uygulanan sıcaklık çevrimi Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12: Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi koşulları

Hazırlanan sıcaklık çevriminde sıcaklık, 45°C’den -35°C’ye 32 dakikada düşmekte, -35°C’den 45°C’ye 21 dakikada çıkmaktadır. -35°C’de ve 45°C’de 20’şer dakika bekleme yapılmaktadır. Bu süreler iklimlendirme cihazının sıcaklık değiştirme hızı ile belirlenmiştir. Deneyde kullanılan iklimlendirme cihazı Angelantoni CH 250 model kabindir. Kabin iç hacmi 224 litre olup ölçüleri 600×535×700 mm’dir.

Isıl çevrim ile yaşlanma deneyine alınan numuneler 20., 35., 50., 60., 70. ve 80. günler sonunda iklimlendirme kabininden alınarak Şekil 5.9’da verilen deney akış şemasına uygun olarak deneylere alınmıştır. Her bir yapıştırıcıdan, her kontrol süresi için 5’er adet levha ve boru numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler, olası ısıl şok etkisini engellemek amacıyla deneylerin sürdürüldüğü iklimlendirme kabininden, sıcaklık çevrimi oda sıcaklığında iken çıkarılmışlardır. Kabinden çıkarılan numuneler

çekme deneyleri öncesi ASTM D 1183-03 standardı [22] uyarınca 7 gün süre ile ortam koşullarında (23°C ve %50 BN) bekletilmiştir.

5.3.2. Rutubet İle Yaşlanma Deneyi

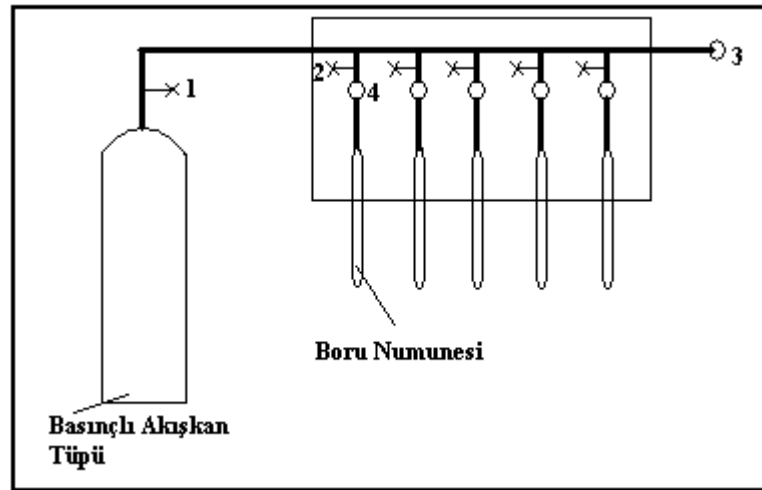
Alüminyum-bakır boru birleştirmesinin çalışacağı ortam koşullarında rutubet önemli yer tutmaktadır. Nemin hem yapıştırıcı malzeme ara yüzeyine girerek hem de yapıştırıcı içine nüfuz ederek bağlantı dayanımına etki ettiği bilinmektedir. Çalışma süresi boyunca birleştirme %50 ile %85 arasında değişen bağıl neme maruz kalmaktadır. Nem oranındaki değişimin süreye bağlı ortalaması alındığında ise %65'lik bir ortalama bağıl nem ortaya çıkmaktadır. Rutubetli ortamda birleştirme dayanımının ne şekilde etkilendiğini belirlemek amacıyla rutubet ile yaşlanma deneyi tasarlanmıştır.

Rutubet deneyine alınan numuneler %98 bağıl nem ve 40°C'ye koşullandırılmış rutubet kabinde bekletilmişlerdir. Her bir yapıştırıcıdan, her kontrol süresi için 5'er adet levha ve boru numuneleri hazırlanmıştır. Deneyin toplam süresi 75 gündür. Bu sürede numuneler, 15'er günlük periyotlarla kabinden çıkarılmış, ortam koşullarında 7 gün bekletilerek (ASTM D 1183-03'e göre) çekme deneylerine alınmıştır. Rutubet deneyleri Liebisch 3003 model rutubet kabinde gerçekleştirilmiştir. Kabin iç hacmi 300 litre olup, ebatlar 750×500×800 mm'dir.

5.3.3. Sızıntı Deneyi

Çalışmanın amacı alüminyum ve bakır boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesidir. Ancak öngörülen çalışma koşulları yapıştırıcıyı ve bağlantıyı zorlayacak düzeydedir. Gerek sıcaklık değişimi ile meydana gelecek genleşme-daralmanın bağlantı dayanımına etkileri, gerek çalışma sıcaklıklarının yapısal yapıştırıcılar için tavsiye edilen sıcaklık aralığının dışına çıkması sonucu yapıştırıcıda meydana gelecek bozulma gerekse nem etkisi ile yapıştırıcının yapışan yüzeyden ayrılması basınçlı akışkan taşıyan boru birleştirmesi için üzerinde dikkatle durulması gereken bir husustur. Yapıştırma bölgesinde meydana gelecek mikroçatlaklar basınç sebebiyle sızıntı için başlı başına bir sebep olabileceği gibi kolay ilerleyerek birleştirme bölgesinde hasara da sebep olabilmektedir. Yaşlanma etkileri ile deneyler sonrası yapıştırma bölgesinde bir hasar oluşup oluşmadığını tespit edebilmek için sızıntı deneyi uygulanmıştır.

Sızıntı deneyini gerçekleştirmek amacıyla bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Borunun bağlandığı sisteme bir tüpten 25 bar'a kadar istenilen basınçlarda akışkan sevk edilebilmektedir. Basıncı akışkan boru içinde bir süre bekletilerek sistemde sızıntı olup olmadığı gözlenmiştir. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 5.13'de verilmiştir. Düzeneğin çalışması şu şekilde özetlenebilir: Numuneler düzeneğe yerleştirildikten sonra ilk olarak basınç gazın bulunduğu tüpün vanası (1), ardından her numunenin bağlı olduğu vanalar (2) açılır. Tüpteki ayar vanası (1) vasıtası ile sistemdeki basınç kontrol edilebilmektedir. Sistemin basıncı deneyde uygulanan basınç değerine gelince ilk olarak 1 numaralı vana kapatılarak sistem içi basıncı sabitlenir. Sistemin basıncı 3 numaralı manometre vasıtasıyla izlenmektedir. Ardından her numunenin vanası (2) ayrı ayrı kapatılarak boru numuneleri içindeki basınçlar sabitlenir. Numune iç basınçları herbir numune için ayrı olarak bağlanmış 4 numaralı manometreler ile takip edilmektedir.



Şekil 5.13: Sızıntı deney düzeneğinin şematik gösterimi

Sistem basıncının sabitlenmesinin ardından manometrelerden (4) numunelerin basınçları takip edilir. Bu işlem 4 saat sürmektedir. İlk 3 saat 10 bar'lık, sonraki 1 saat 20 bar'lık basınç uygulanmıştır. 4 saat boyunca numuneye bağlı manometrede herhangi bir düşüş tespit edilmediğinde numunede sızıntı olmadığı kabul edilmiştir. Sızıntı olan numunelerde manometrelerde devamlı bir düşüş gözlenmiştir.

5.3.4. Çekme Deneyleri

Yapıştırma birleştirmelerinin dayanımının belirlenmesi amacıyla çekme deneyi uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Levha ve boru numunelerinin her ikisi

için de yaşlanma öncesi ve sonrası çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deney sonuçları yorumlanırken numunelerin yaşlanma öncesi ve sonrası verdiği dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Çekme deneylerinde yapıştırıcılar kesme yükü altında zorlanmışlardır.

Levhalar ile gerçekleştirilen deneyler sonrasında sonuçlar doğrudan yapıştırıcının kesme mukavemetini verirken, boru numuneleri ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar Al borunun kopma mukavemetini vermektedir. Boru numuneleri ile gerçekleştirilen çekme deneyleri değerlendirilirken kopmanın Al borudan ya da yapıştırma bölgesinden olduğu incelenmiştir. Kopma Al borudan gerçekleşmiş ise yapıştırıcının yeterli dayanımı sağladığı, kopma yapıştırma bölgesinde meydana gelmiş ise yapıştırıcının yeterli mukavemeti gösteremediği kabul edilmiştir.

Çekme deneyleri Instron marka 4505 model mekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Levha numuneleri 10 kN'luk yük ve 2 mm/dak çekme hızı; boru numuneleri 5 kN'luk yük ve 5 mm/dak çekme hızı ile çekilmiştir.

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Alüminyum-bakır boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesi amacıyla sürdürülmüş deneysel çalışmaların sonuçları ve değerlendirmesi bu bölümde verilmiştir.

Levha numuneleri ile gerçekleştirilen tüm deney sonuçları EK-A’da verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda çevresel etkenlerin birleştirme dayanımında meydana getirdiği değişimin tespiti üzerine yoğunlaşmıştır. Çevresel etkenler yüksek ve düşük sıcaklıklar, rutubet ya da bağıl nem olarak değerlendirilmiştir.

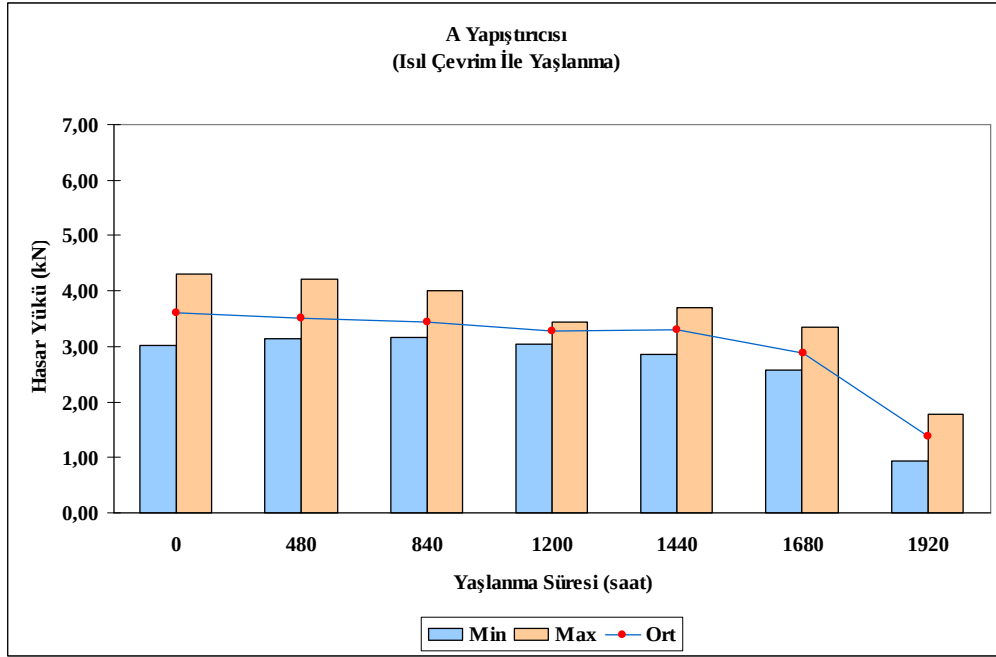
Çevresel etkiler sonucu yapıştırma birleştirmesinin ömrünün belirlenmesi karmaşık ve çözümü zor bir sorundur. Bunun sebebi birleştirmenin çalıştığı ortamda birden fazla etkinin bir arada bulunmasıdır [9].

6.1. Isıl Çevrim İle Yaşlanma Deneyleri Sonuçları

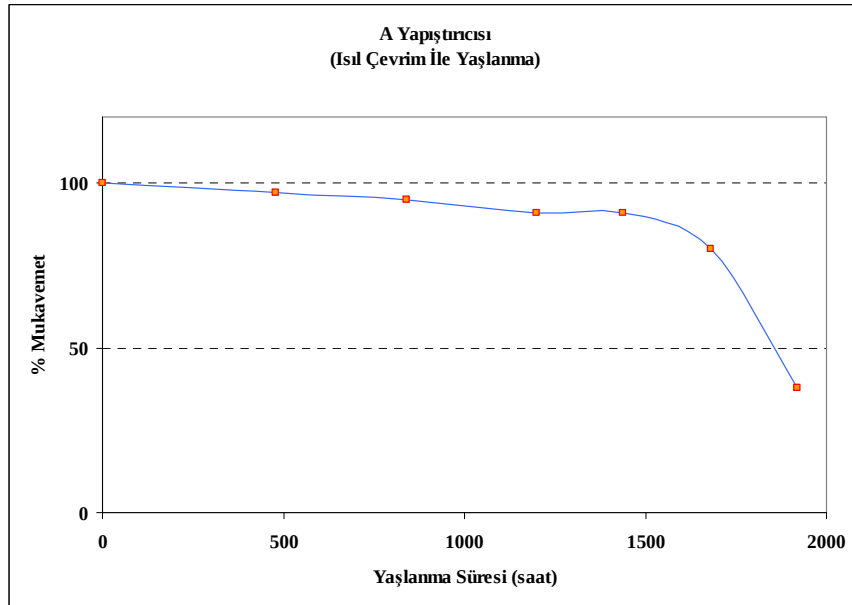
Geçmişte yapılmış çalışmalar incelendiğinde ısı etki ile meydana gelen dayanım azalması iki temel etkene dayandırılmıştır. Bunlar;

- a. Sıcaklık etkisi ile yapıştırıcı malzemenin bozularak (degradation) zamanla yapıştırma özelliğini kaybetmesi
- b. Benzemeyen (dissimilar) malzemeler ile oluşturulan yapıştırma birleştirmesinde sıcaklık çevrimi sonucunda ısıl genleşme katsayısı (IGK) farkından dolayı ortaya çıkan artık gerilmelerin birleştirme dayanımını düşürmesi [9, 16, 23].

6.1.1 Levha Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları



Şekil 6.1: A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.1)



Şekil 6.2: A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi Şekil 6.1’de verilmiştir. Mukavemet değerlerinin yaşlanma süresine bağlı olarak sürekli bir azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Azalma eğrisinin 70. ve 80. günler arasında dikleştiği

dikkati çekmektedir. Şekil 6.2’de birleştirmenin zamana bağlı mukavemet değişimi, deney süreleri sonunda ölçülen mukavemet değerlerinin, başlangıç mukavemetine oranı olarak verilmiştir. Şekil 6.2.’de her bir nokta 5 adet deney numunesinin ortalamasını göstermektedir. Hasarların tamamı TS EN ISO 10365/Nisan 2001 standardına göre adezyon (yapışma) kusurudur. Bir başka deyişle yapıştırıcı malzeme arayüzünden ayrılmıştır.

Yapıştırma birleştirmelerinin doğası gereği, çevresel koşulların etkisi ile zamana bağlı olarak mukavemet kaybı gerçekleşmektedir. Isıl çevrim ile yaşlanma deneylerinin uygulanmasındaki amaç, yapıştırıcı ile sağlanan birleştirmenin, sıcaklığın çevrimsel olarak değiştiği bir ortamda başlangıç mukavemetinin ne kadarını kaybettiğinin belirlenmesidir. Bu mukavemet kayıplarının sebepleri arasında -35°C ve 45°C aralığındaki çevrimsel sıcaklık değişiminin olup olmadığı araştırılmıştır.

Deney sıcaklık koşulları ayrı ayrı ele alındığında, 45°C sıcaklığının, A yapıştırıcısının camsı geçiş sıcaklığına (Tablo 5.1) çok yakın olması sebebiyle, bu sıcaklıkta yapıştırıcıdan en iyi performansı vermesi beklenmektedir. Bunun nedeni olarak T_g sıcaklığına yakın sıcaklıklarda birleştirme dayanımı yüksek değerler verirken, özellikle T_g ’den yüksek değerlere doğru uzaklaşıldığında ısıl bozulma (degradation) sebebiyle dayanımı düşmesidir [15, 24].

-35°C gibi düşük sıcaklıkta kullanılabilecek bir yapıştırıcıdan beklenen özelliğin düşük T_g olduğu belirtilmiştir [23]. A yapıştırıcısı 35°C ’lik camsı geçiş sıcaklığı ile yapıştırıcılar arasında düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip bir malzemedir.

Bir başka çalışmada [25] T_g ’si 82°C olan çift komponentli epoksi yapıştırıcısının en yüksek mukavemet değerlerini sıra ile -55°C ve 22°C ’de verdiklerini belirlemişlerdir. Bunun sebebi olarak yapıştırıcısının bu sıcaklıklarda dayanım, süneklik ve direngenlik (stiffness) üçlüsünün en iyi kombinasyona sahip olduğu gösterilmiştir. Aynı çalışmada, aynı yapıştırıcısının 100°C ve 200°C ’lerde çok daha düşük mukavemet değerleri verdiği belirlenmiştir. Çalışma koşulu (-35°C) ve T_g (45°C) göz önüne alınığında A yapıştırıcısı için koşulların daha olumlu olduğu görülmektedir. Tüm bu bilgiler doğrultusunda, deney sıcaklık koşullarının her iki uç değeri de A yapıştırıcısının dayanımında bir etki yaratmayacağı sonucuna varılmıştır.

Isıl çevrim etkisinin birleştirme dayanımında sebep olacağı azalmanın diğer sebebi olarak birleştirilen malzemelerin ve yapıştırıcının sahip oldukları farklı ısı genleşme katsayıları sebebiyle ortaya çıkacak ısıl gerilmeler olduğu bilinmektedir. Bu gerilmelerin birleştirilen malzemelerin benzemeyen malzemeler (dissimilar materials) olması durumunda büyük değerlere ulaşabileceği, aynı tür malzemelerin birleştirmesinde ortaya çıkacak gerilmelerin yapıştırıcı dayanımına etki etmeyeceği birçok kaynakta belirtilmiştir [8, 16, 20].

Da Silva ve Adams çalışmalarında [19], öncesinde Hart-Smith tarafından ortaya konmuş ifadeye yer vermişlerdir. Hart-Smith çalışmasında sıfır gerilme sıcaklığı (stress-free temperature) ifadesini tanımlamıştır. Bu ifadeye göre, sıfır gerilme sıcaklığı (SGS) yapıştırıcının kurlenmeye başladığı sıcaklıktır ve yapıştırıcının T_g altında çalıştığı durumlar değerlendirilirken, değeri kurlenme sıcaklığı olarak kabul edilir. Yapıştırıcının T_g üzerinde çalıştığı koşullarda ise SGS olarak yapıştırıcının T_g değeri kabul edilir. Isıl gerilmeler daha çok yüksek sıfır gerilme sıcaklığı yüksek olan birleştirmeler için sorun yaratmaktadır.

Da Silva ve Adams sıfır gerilme sıcaklığı 230°C olan bir yapıştırıcı kullanarak yaptıkları çalışmalarında [19], esas olarak, SGS'si yüksek olan yapıştırıcı ile oluşturulmuş birleştirmelerde, ısıl gerilmelerin önem arz ettiği sonucuna varmışlardır. da Silva ve Adams'ın diğer çalışmasında [20] elde ettiği sonuçlar aşağıdaki Tablo 6.1'dedir.

Tablo 6.1: da Silva ve Adams'ın çalışmalarında elde ettiği deneysel sonuçlar

SGS Değeri ($^{\circ}\text{C}$)	-55°C 'deki Mukavemet Kaybı
230	% 70
135	%40

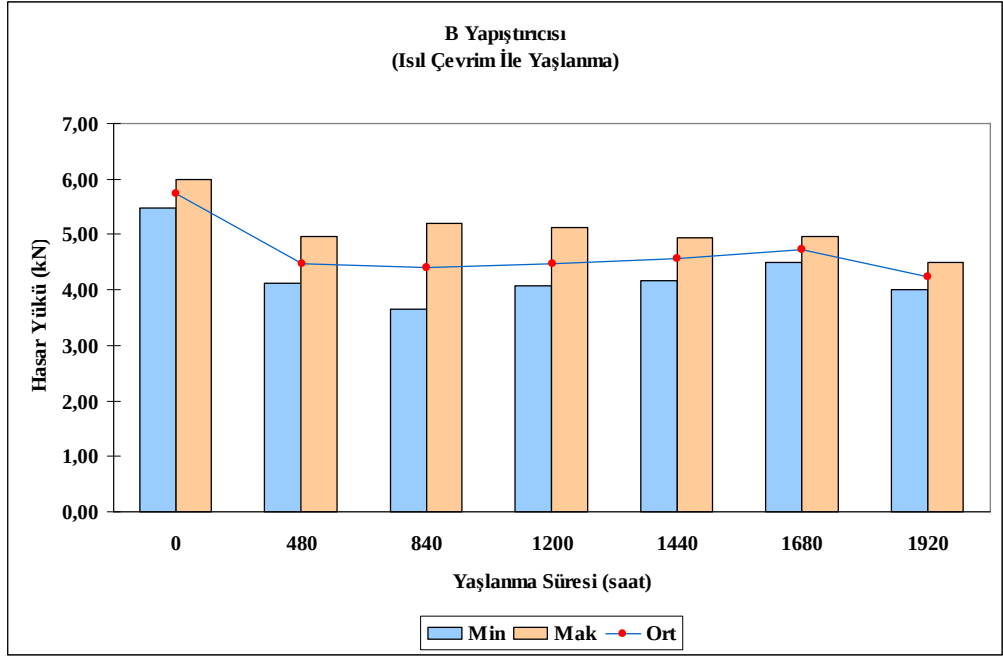
Elde ettikleri bu sonuçlarda SGS ile çalışma sıcaklıkları yaklaştıkça mukavemette meydana gelen kaybın azaldığı görülmektedir. Bu sonuç önceki çalışmalarında [19] ortaya koydukları ifadeyi desteklemektedir. A yapıştırıcısının SGS'si 45°C olduğundan -35°C sıcaklıkta birleştirme mukavemetinde çok önemli bir değişim olmayacağı görülmektedir.

Hızlandırılmış yaşlanma deneylerinde epoksi kullanılarak birleştirilmiş alüminyum-bakır levha çiftinde, sıcaklık değişimi kaynaklı artık ısıl gerilmelerin oluşması

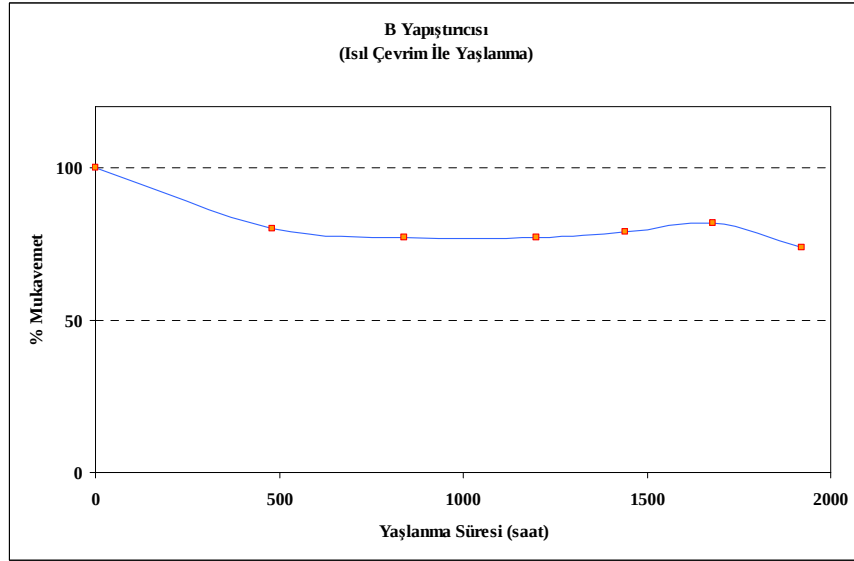
beklenmemektedir. Bunun sebebi birleştirmeyi oluşturan tüm malzemelerin serbetçe şekil değiştirmesinin mümkün olmasıdır [26].

Yapıştırıcıların formülasyonları, kürlenme hızlarının arttırılması amacıyla bir takım katışkılar eklemek suretiyle değiştirilmektedir. Bu değişim yapıştırıcıda bazı olumsuzluklar doğurmaktadır [27]. Bunlardan biri de hızlı kürlenene yapıştırıcıların rijit olmasıdır. Rijit yapıştırıcıların ısı çevrim ile ortaya çıkan ısı gerilmeleri karşılama yetenekleri düşüktür. Yani, genleşme ve daralmalar sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin zorlaması ile yapışan malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyinden kopmayı engelleyememektedir. Bunun sebebi rijit yapıları sebebiyle gerilmeleri uniform olarak dağıtamamalarıdır [3, 27]. A yapıştırıcısı oda sıcaklığında ve hızlı kürlenene bir yapıştırıcıdır. A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısı çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerlerinin zamanla azalmasının sebeplerinden birinin, yapıştırıcının rijit bir yapıya sahip olması olduğu sonucuna varılmıştır.

Zamanla mukavemet değerinde meydana gelen azalmanın bir başka sebebinin, ısı çevrim deneyinin uygulandığı ortamda bulunan %65’lik nem olduğu sonucuna varılmıştır. Ortamda bulunan %55 ve daha fazla miktardaki bağıl nemin yapıştırma performansını olumsuz etkilediği yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir [16]. Birleştirme dayanımındaki azalmanın 70. güne kadar keskin bir şekilde olmaması, nem etkisinin az olduğunun fakat dayanım azalmasında bir etkisinin olduğunun göstergesidir. Nem ya da rutubetin birleştirme dayanımına etkileri bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 6.3: B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.2)

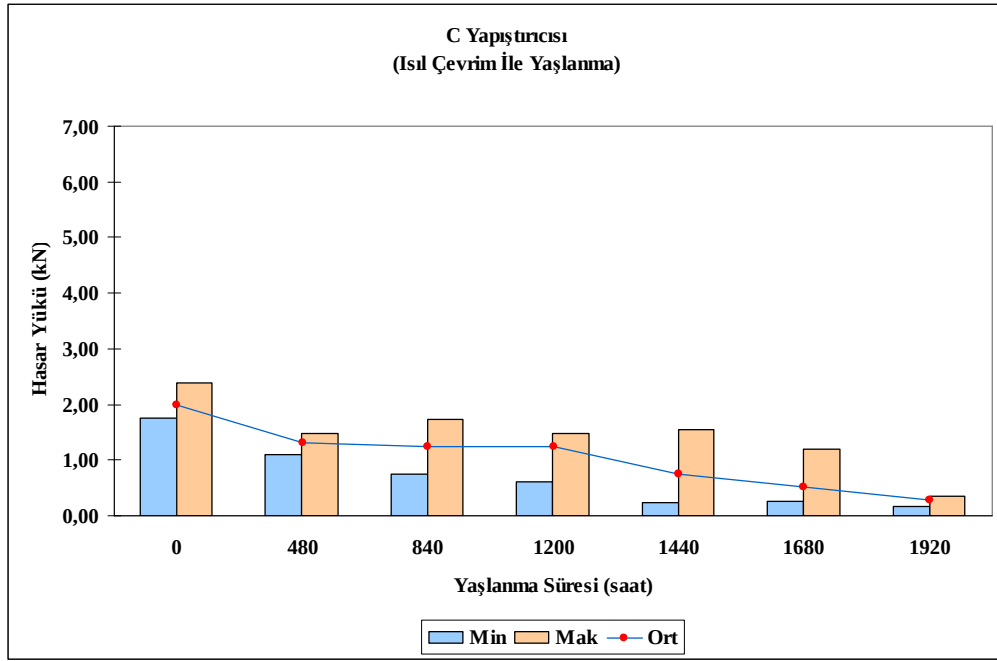


Şekil 6.4: B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

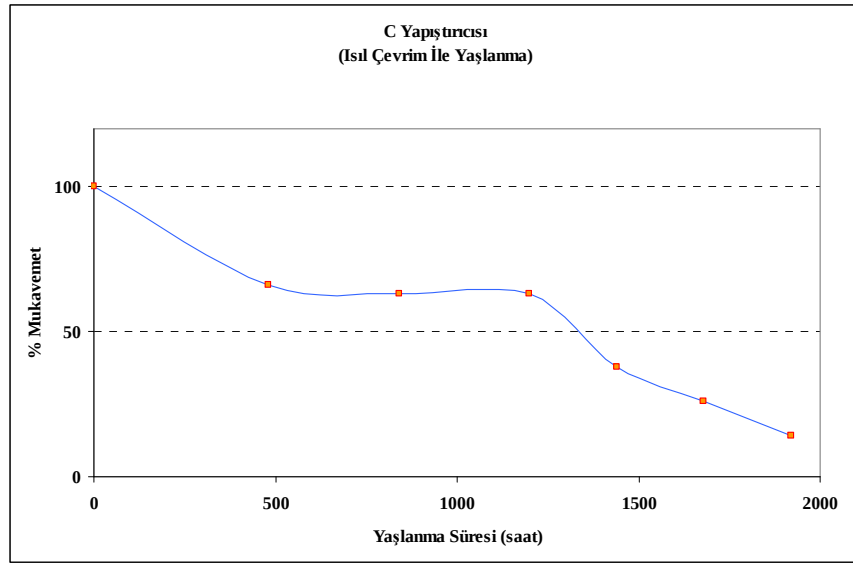
Grafikler incelendiğinde B yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonrasında dayanımında önemli bir kaybın meydana gelmediği görülmektedir (Şekil 6.3 ve Şekil 6.4). Hasarların tamamı karışık kusur (mixed failure)'dir. Buna göre numunede bazı bölgelerde yapışma kusuru, bazı bölgelerde kohezyon kusuru gözlenmiştir. Her iki kusurun birbirine oranının yaşlanma süresi ile değişmediği, yaklaşık olarak sabit kaldığı gözlenmiştir.

B yapıştırıcısı kullanarak hazırlanmış birleştirmelerin ısı çevriminden çok fazla etkilenmemesinin sebebi, hızlı kürlenene bir yapıştırıcı olmaması sebebiyle tipik iki bileşenli epoksi yapıştırıcı özellikleri göstermesidir. Daha esnek yapıda olduğu için ortaya çıkan sıcaklık değişimi kaynaklı gerilmeleri karşılayarak birleştirme dayanımına etki etmesini önlemesidir.

Birleştirme dayanımında bir miktar azalmanın meydana gelmesi nem etkisi ile açıklanmıştır.

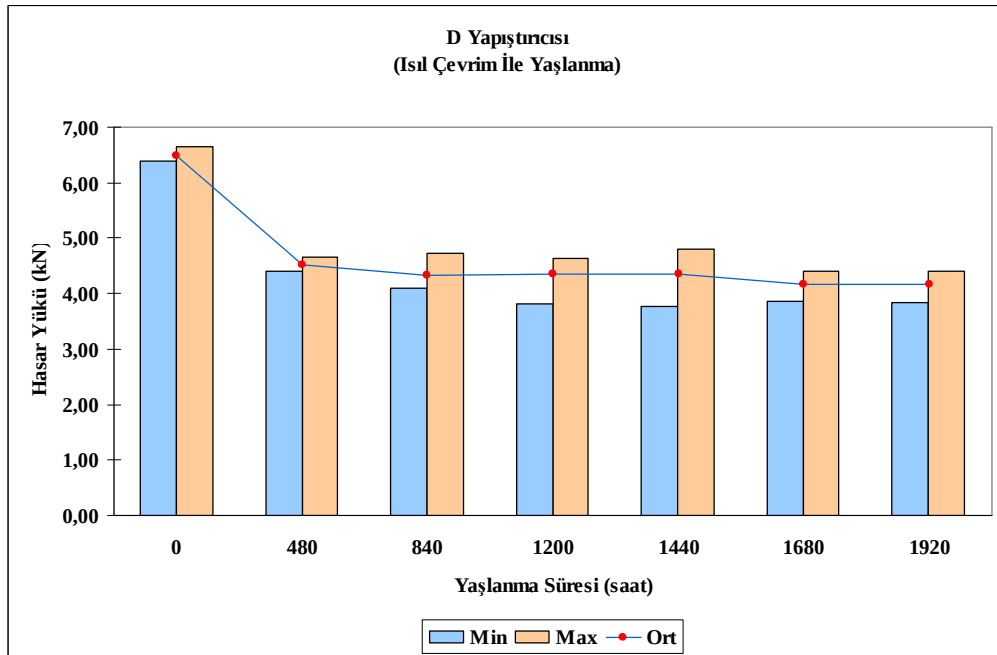


Şekil 6.5: C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısı çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.3)

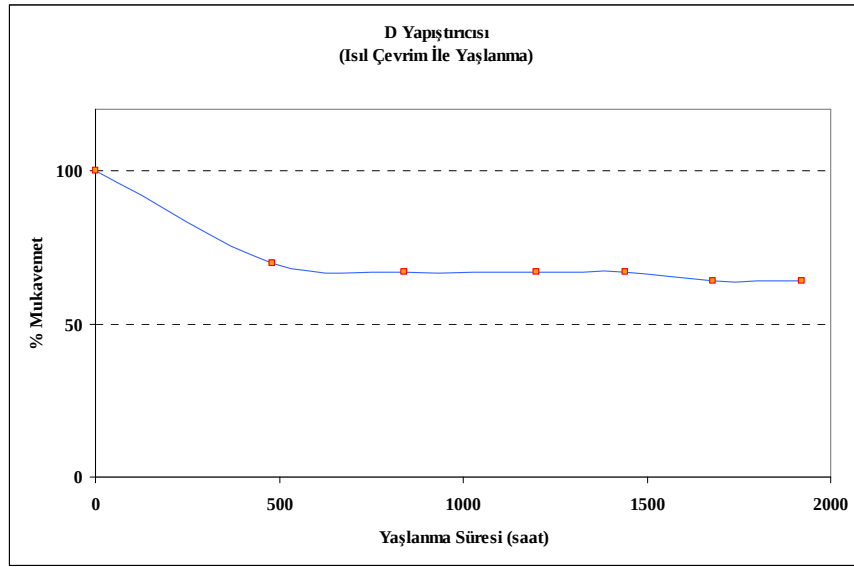


Şekil 6.6: C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

C yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonrasında mukavemetinde önemli azalma tespit edilmiştir (Şekil 6.5 ve Şekil 6.6). Bunun sebebi C yapıştırıcısının hızlı kürlenene yapıştırıcı olması ve A yapıştırıcısı gibi rijit yapısından dolayı genleşmeleri karşılayamamasıdır. Ancak dayanımda meydana gelen önemli düşüşün ana sebebi ortamdaki %65’lik nemdir. C yapıştırıcısının neme karşı çok duyarlı olduğu rutubet ile de yaşlanma deneyleri ile gözlenmiştir.

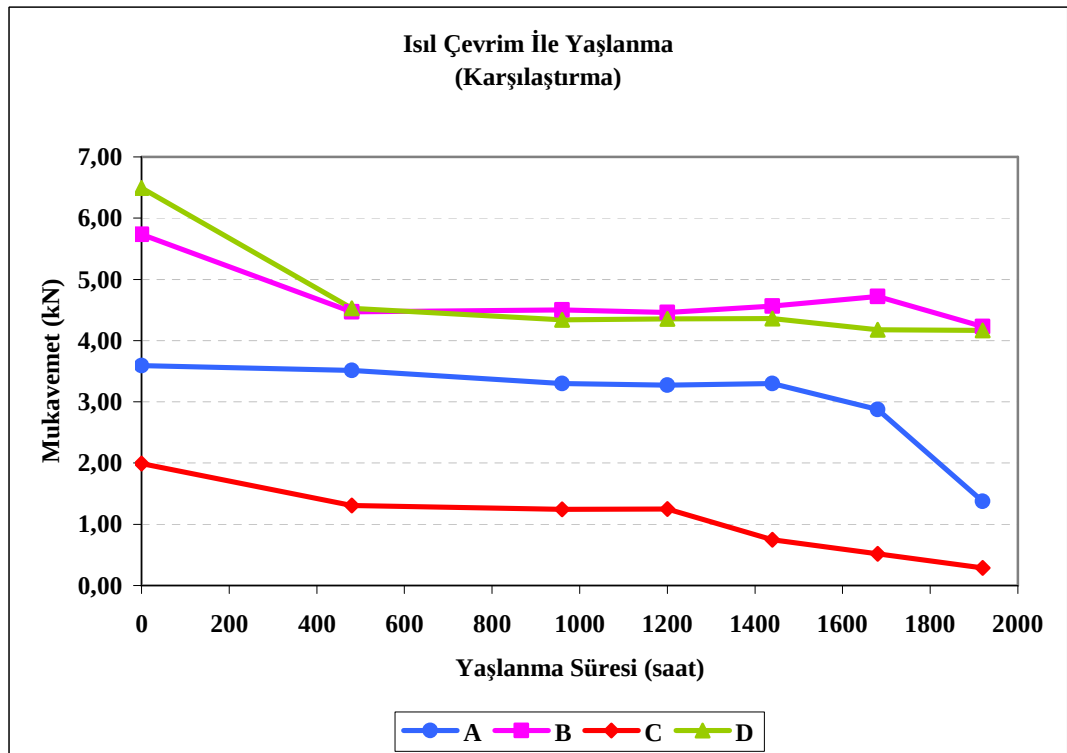


Şekil 6.7: D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.4)



Şekil 6.8: D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde ısıl çevrim ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

D yapıştırıcısı ile elden edilen sonuçlar, bu yapıştırıcının dayanımda 80 gün sonunda %35'lik kayıp olduğunu göstermektedir (Şekil 6.7 ve Şekil 6.8). D yapıştırıcısı rijit yapıda olmadığından, mukavemet kaybının sebebi rutubet etkisiyle açıklanmıştır.



Şekil 6.9: Levha numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar)

Levha numuneleri ile gerçekleştirilen ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonucunda; ısıl çevrime en iyi direnci B yapıştırıcısının gösterdiği, D yapıştırıcısının başlangıç

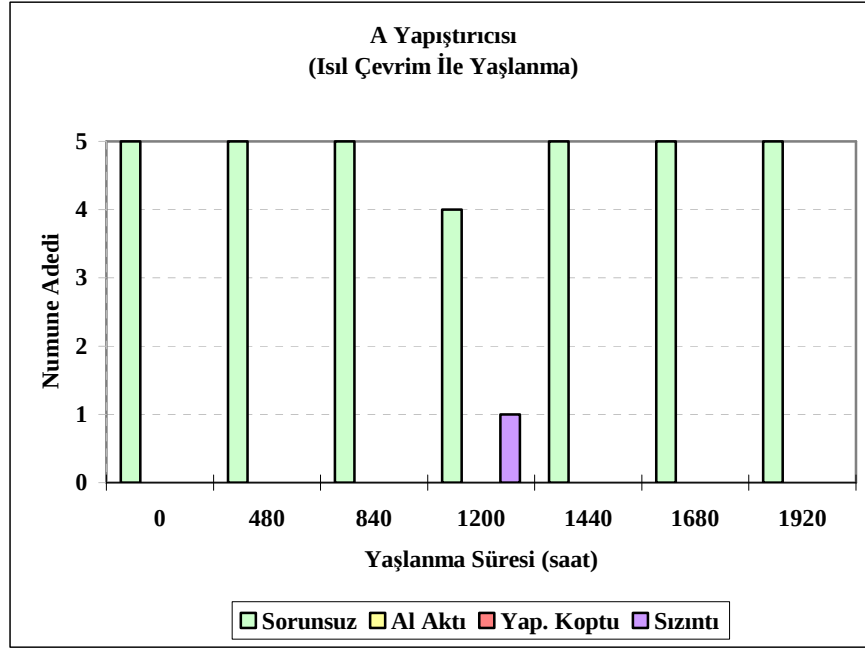
dayanımını yitirmesine rağmen sağladığı mukavemet değerlerinin A ve C yapıştırıcılarından yüksek olduğu, A ve C yapıştırıcılarının 80 günlük deney süresi sonunda mukavemet değerinin çok önemli bir kısmını yitirdiği belirlenmiştir (Şekil 6.9).

6.1.2 Boru Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

Boru numuneleri ile yapılan yaşlanma deneyleri şu ifadelerle değerlendirilmiştir:

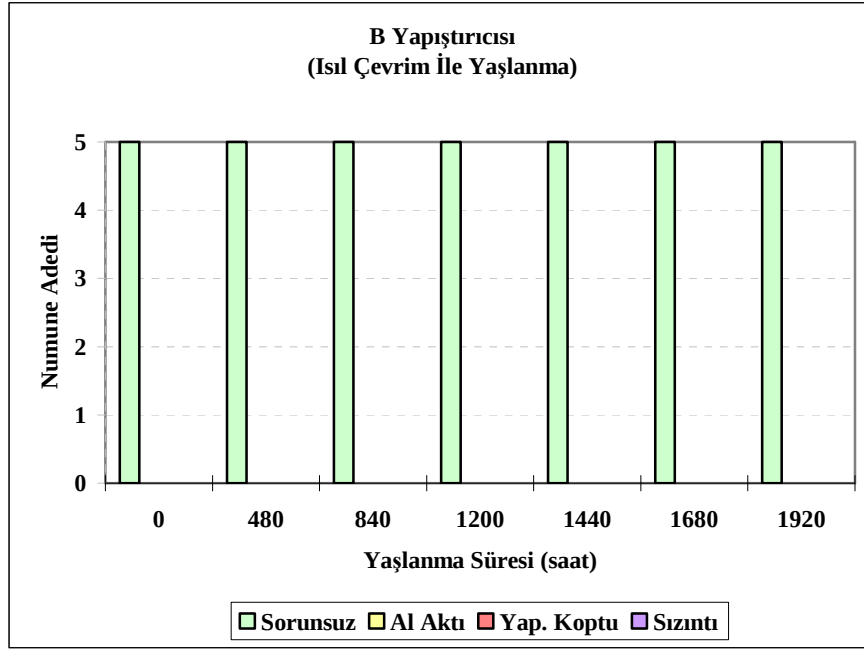
- a. Sorunsuz: Yaşlanma deneyleri sonrasında uygulanan sızıntı deneyinde sızıntıya rastlanmamış, ardından gerçekleştirilen çekme deneylerinde kopma birleştirme bölgesinden gerçekleşmemiştir. Kopma Al borudan gerçekleşmiştir. Bu durum, birleştirme dayanımının Al boru dayanımından yüksek olduğunu gösterir ve istenilen durumdur. Bu bölümde deney sonuçlarını gösteren şekillerde açık yeşil renk ile gösterilmiştir.
- b. Alüminyum Boru Aktı: Yaşlanma deneyleri sonrasında uygulanan sızıntı deneyinde sızıntıya rastlanmamış, ardından gerçekleştirilen çekme deneylerinde kopma gerçekleşmeden Al boru çıplak gözle fark edilebilecek seviyede akma göstermiştir. Daha sonra kopma birleştirme bölgesinden gerçekleşmiştir. Bir başka deyişle yapıştırıcı kopmuştur. Ancak birleştirme Al boruyu akmaya zorlayacak düzeye kadar dayanım göstermiştir. Boru birleştirmesinin çalışacağı sistem göz önüne alındığında birleştirmeye Al boruyu akmaya zorlayacak bir kuvvet etkimeyecektir. Bu sebeple bu durumdaki numuneler uygulama yönünden yeterli görülmüştür. Şekillerde açık sarı renk ile gösterilmiştir.
- c. Yapıştırıcı Koptu: Yaşlanma deneyleri sonrasında uygulanan sızıntı deneyinde sızıntıya rastlanmamış, ardından gerçekleştirilen çekme deneylerinde kopma, boru birleştirmesinde bir direnç gözlenmeden birleştirme bölgesinden gerçekleşmiştir yani yapıştırıcı kopmuştur. Bu sonuç uygulama açısından kabul edilememektedir. Şekillerde açık turuncu renk ile gösterilmiştir.
- d. Sızıntı Var: Yaşlanma deneyleri sonrasında uygulanan sızıntı deneyinde boru birleştirmesinde akışkan sızıntısı tespit edilmiştir. Bu numunelerin çekme deneyleri dikkate alınmamıştır. Birleştirme bölgesinden sızıntı veren bir yapıştırıcının, akışkan taşıyan bir boru sisteminde sağlam bir birleştirme sağlanması mümkün değildir. Şekillerde mor renk ile gösterilmiştir.

A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim deneyleri sonrası sonuçları Şekil 6.10’da verilmiştir.



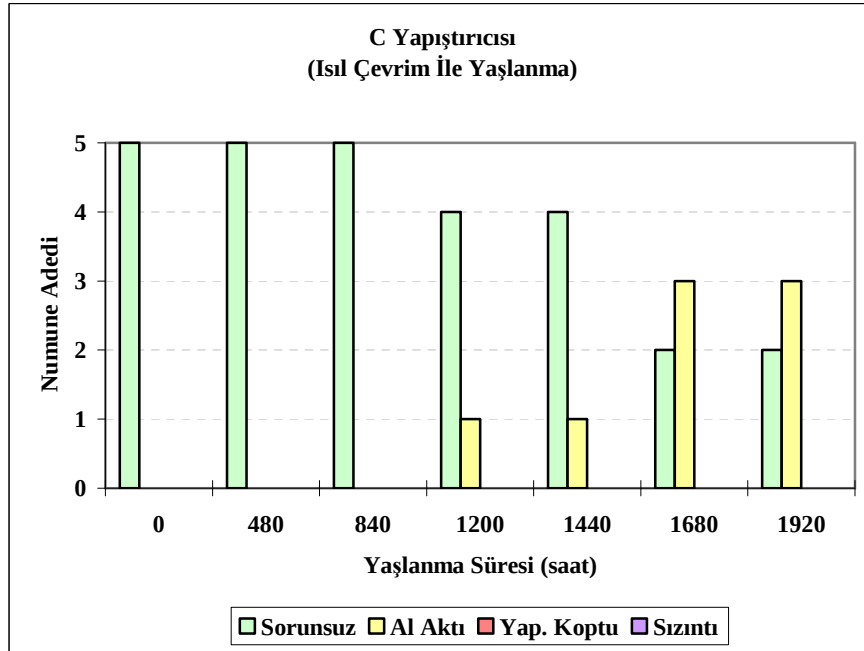
Şekil 6.10: A yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları

Şekil 6.10 incelendiğinde 50. günde bir adet numunede sızıntı tespit edildiği görülmektedir. Diğer deney süreleri ve numunelerinin sonuçları dikkate alındığında, bu numunede uygulama aşamasında ya da başka bir sebeple sorun meydana geldiği yorumu yapılmıştır ve deney sonuçları değerlendirilirken göz ardı edilmiştir. A yapıştırıcısı ile gerçekleştirilen ısıl çevrim deneyleri sonunda boru birleştirmelerinde bir sorunla karşılaşmadığı görülmüştür.



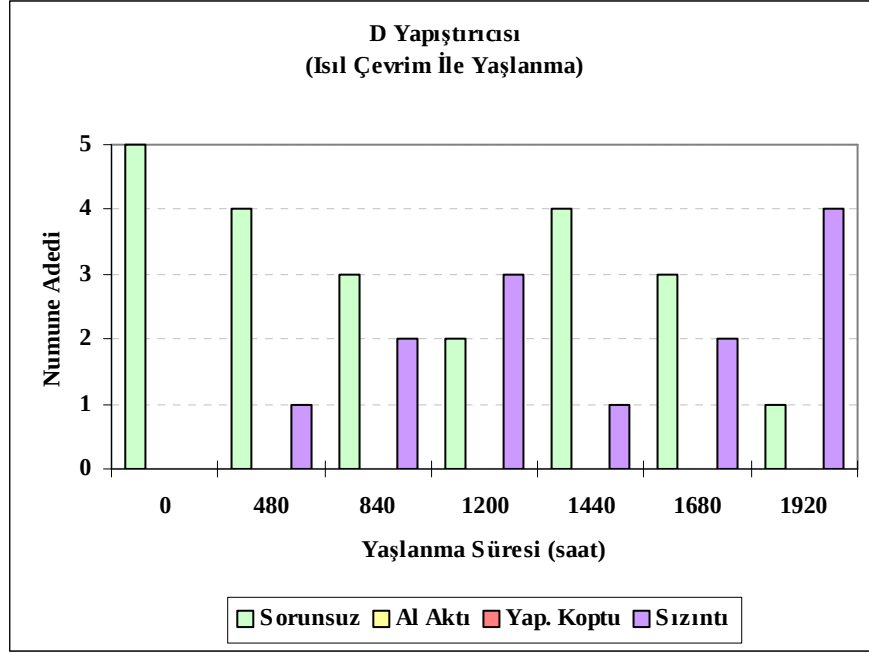
Şekil 6.11: B yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları

Şekil 6.11 incelendiğinde B yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma deneylerinde bir sorunla karşılaşılmadığı görülmüştür. Bu durum levha numuneleri ile gerçekleştirilen deney sonuçları ile örtüşmektedir. Mukavemette birleştirmeyi etkileyecek düzeyde bir kayıp yoktur.



Şekil 6.12: C yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları

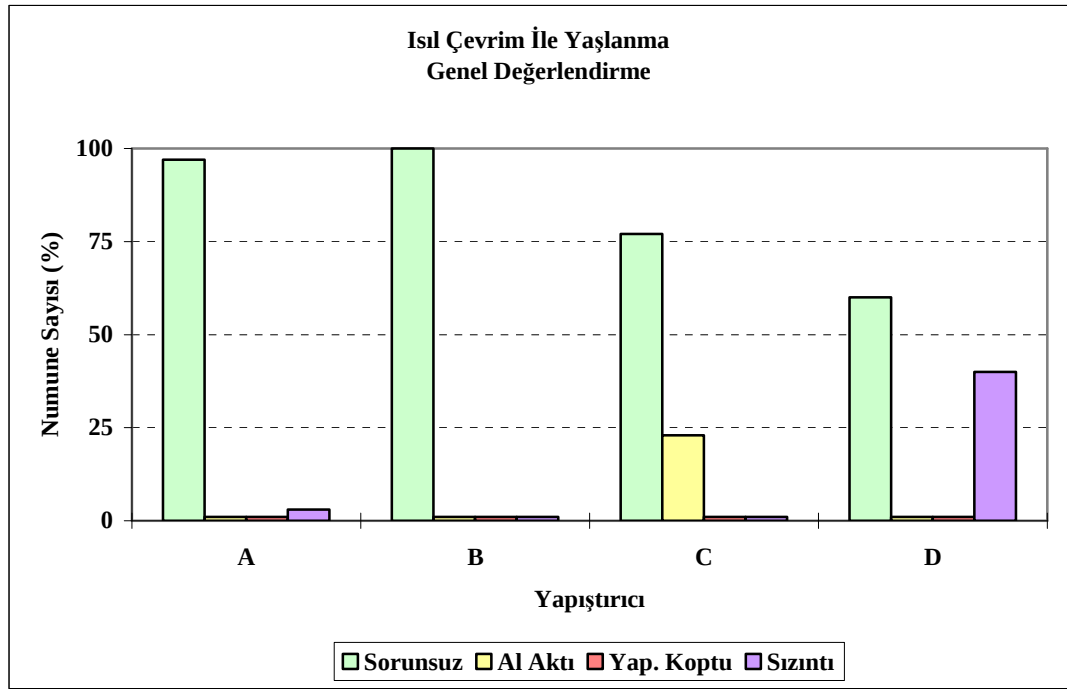
Şekil 6.12 incelendiğinde 50. günden itibaren boru birleştirmelerinin mukavemetinde, bağlantının sürekliliğini sağlamasını engelleyecek bir durum oluşmuştur. Ancak bu numunelerde Al malzemede akma meydana geldikten sonra borularda ayrılma gözlemlendiği için yapıştırıcı uygulanabilir bulunmuştur.



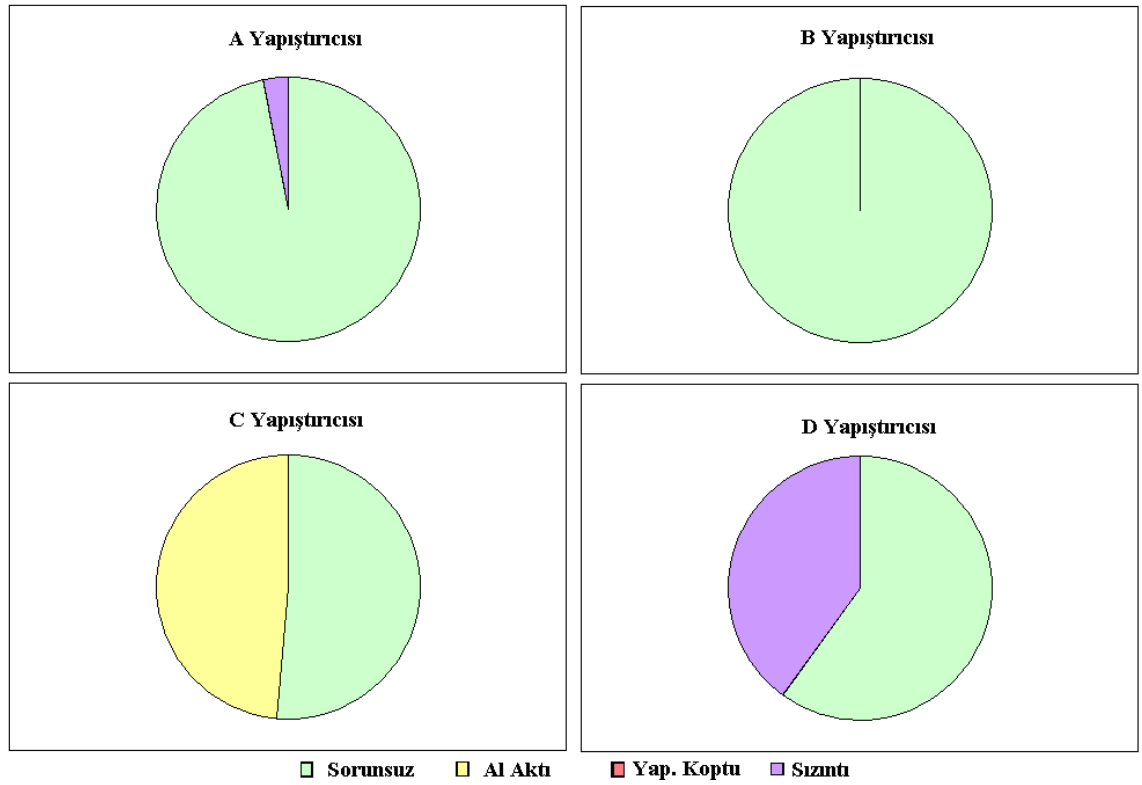
Şekil 6.13: D yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin ısı çevrim ile yaşlanma deneyine ait deney sonuçları

Şekil 6.13 incelendiğinde 20. günden itibaren boru numunelerinde sızıntı tespit edilmiştir. Bu sonuç yapıştırıcının uygulanamayacağını göstermektedir. Sızıntı veren numunelerin çekme deneyleri sonucu kopma Al borudan meydana gelmiştir. Bu durum, birleştirme mukavemetinin bağlantının sürekliliğini sağlayacak seviyede olduğu sonucunu vermektedir. Ancak sızıntıyı engelleyemeyen bir yapıştırıcının akışkan taşıyan boru sisteminde kullanılması söz konusu değildir.

D yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerinin mukavemetlerini kaybetmemelerine rağmen sızıntı vermelerinin sebebi araştırıldığında, D yapıştırıcısının düşük viskozitesi nedeniyle, uygulama ve kürlenmesi sırasında, boru numunelerinin bekleme konumundan dolayı yapıştırıcının önemli miktarının, birleştirme bölgesinden aktığı (damladığı) belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak birleştirme bölgesinde az miktarda yapıştırıcı kalmaktadır, bu miktar birleştirme dayanımını sağlamasına rağmen sızıntıyı önleyememektedir.



Şekil 6.14:. Boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-sütun gösterimi)



Şekil 6.15: Boru numunelerinin ısıl çevrim ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-pasta gösterimi)

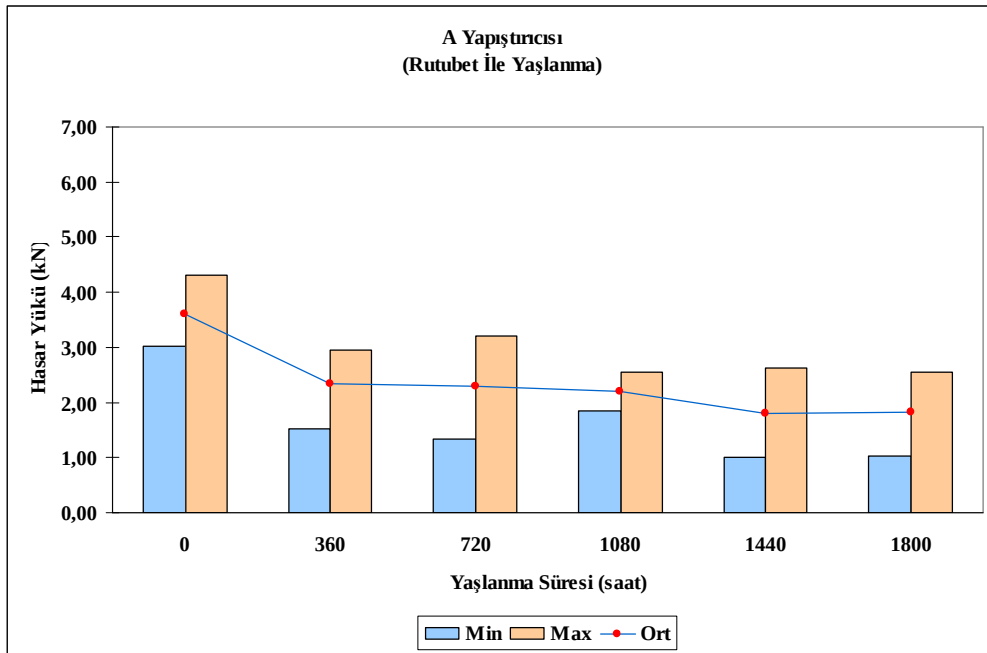
Boru numuneleri ile gerçekleştirilen ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonucunda (Şekil 6.14 ve Şekil 6.15); D yapıştırıcısının sızıntı vererek kullanılamaz durumda olduğu, C yapıştırıcısının levha numuneleri ile paralel olarak dayanımında kayıplar gösterdiği, A yapıştırıcısının boru birleştirmeleri için gerekli dayanımı 80 günlük deney süresince koruduğu ve B yapıştırıcısının boru numuneleri ile gerçekleştirilen deneylerde de en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir.

6.2. Rutubet İle Yaşlanma Deneyleri Sonuçları

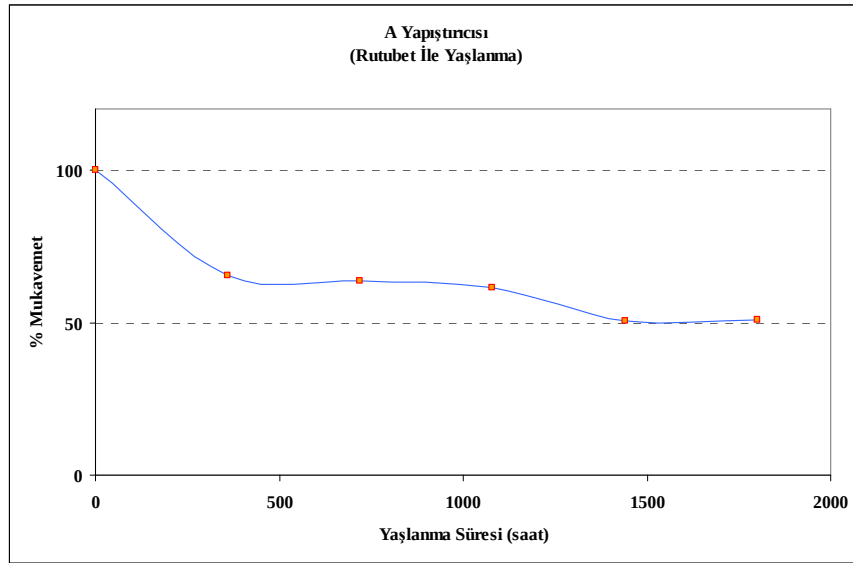
6.2.1 Levha Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi nemin yapıştırma birleştirmesi dayanımını etkilemesi iki mekanizma ile olmaktadır. Bunlardan biri yapıştırıcının bozulması, diğeri yapıştırıcı-yapışan yüzey arasına suyun girmesidir. Yapıştırıcının bozulması sonucu kohenyon kusuru sonucu hasar, ara yüzeye su girmesi ile yapışma kusuru sonucu hasar meydana gelmektedir.

A yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyine ait grafikler Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.16: A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.5)

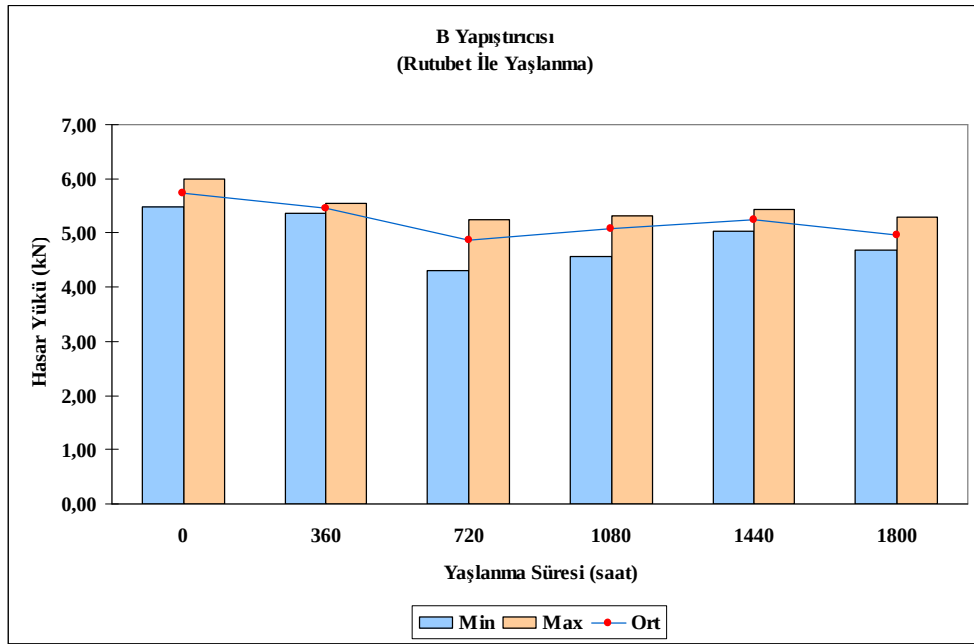


Şekil 6.17: A yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

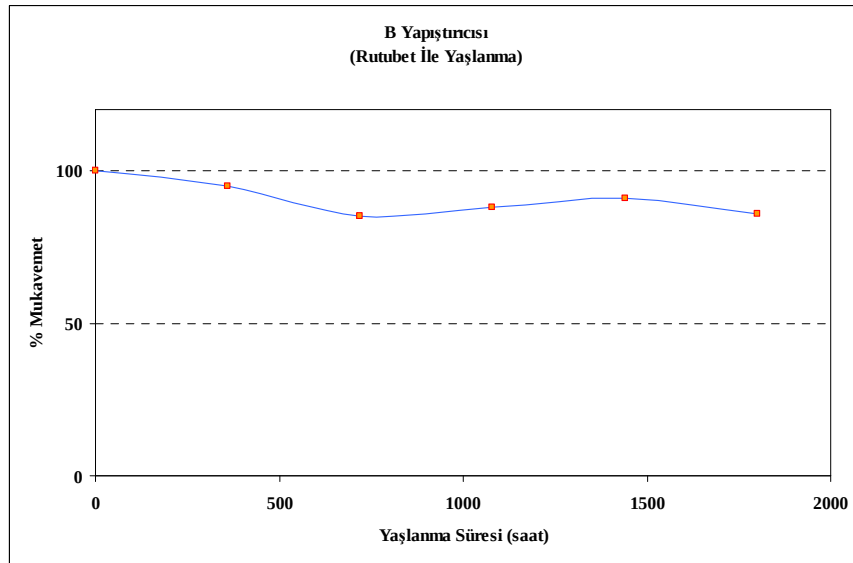
Yapıştırıcı ilk 15 günde başlangıç dayanımının %35'ini kaybetmiştir. 75 günün sonunda ise mukavemet değeri başlangıçtaki %50'si kadardır. Hasarların tümü yapışma kusurudur. Bu durum, suyun ara yüzeye kolaylıkla girebildiğini göstermektedir. Bir başka ifade ile, yapışan yüzeyler ve yapıştırıcı arasında güçlü bir bağ kurulamamıştır. Bunun temel sebebi yetersiz yüzey hazırlığıdır. Yapılan yüzey hazırlığı A yapıştırıcısının bu tür birleştirmede kullanılması için yeterli değildir.

Şekil 6.17 incelendiğinde, mukavemet değerinin ilk 15 günde ani olarak düştüğü, sonrasında daha yumuşak bir azalma gösterdiği görülmektedir. Bu, daha birçok çalışmada rastlanan ve literatürde çokça tekrarlanan bir durumdur [9, 16].

B yapıştırıcısına ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarını gösteren grafik Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'dadır.



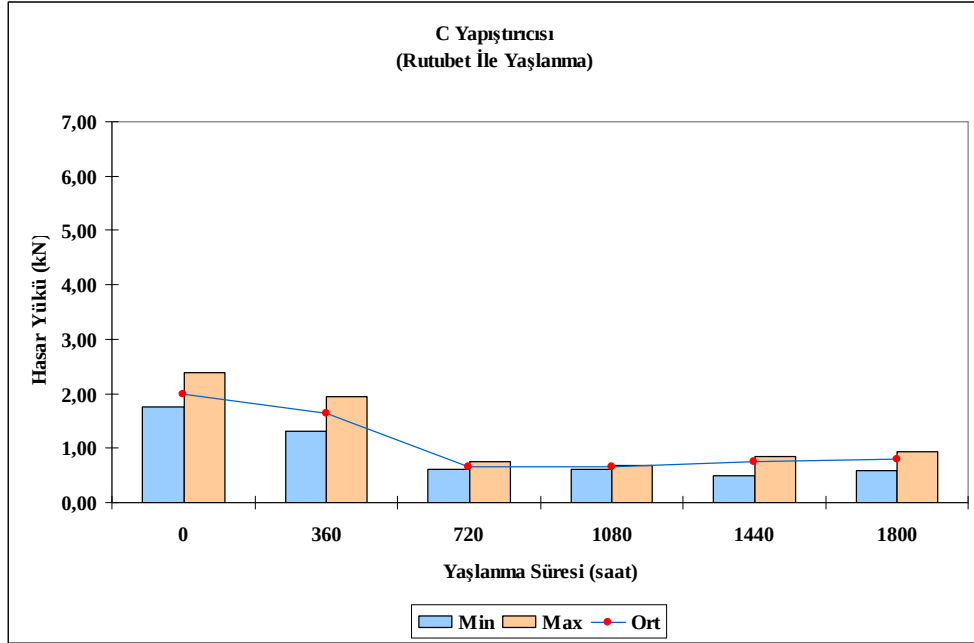
Şekil 6.18: B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.6)



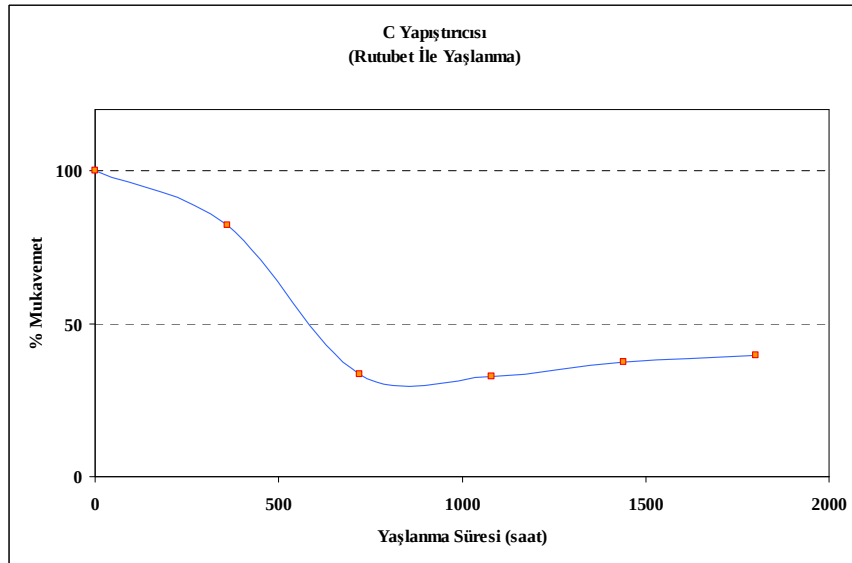
Şekil 6.19: B yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

Sonuçlar incelendiğinde yapıştırıcının ilk 30 günde başlangıç dayanımının %15'ini yitirdiği, 75 gün sonunda ise bu oranı koruduğu görülmektedir. Çekme deneyleri sonrası deney numuneleri incelendiğinde hasarların karışık kusur olduğu gözlenmiştir. Karışık kusurdaki kohezyon kusuru oranının yaşlanma süresi arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu durum, başlangıçta yapıştırıcı-yapışma yüzeyi arasında

güçlü bir bağ kurulduğunu ve suyun etkisi ile zamanla bu kuvvetin azaldığını göstermektedir. Benzer sonuçlar yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir [6, 9].



Şekil 6.20: C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.7)

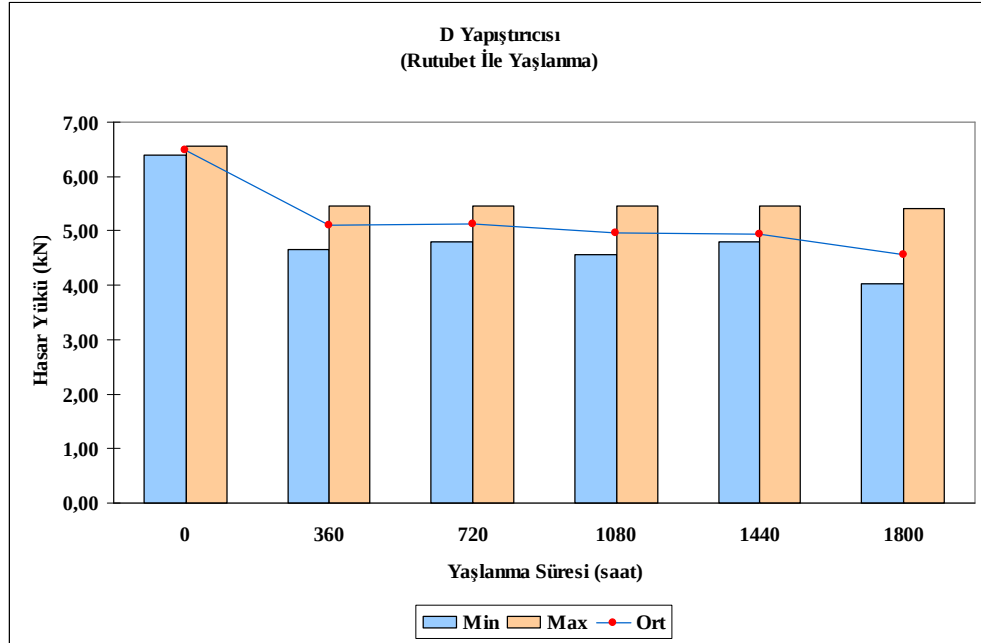


Şekil 6.21: C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

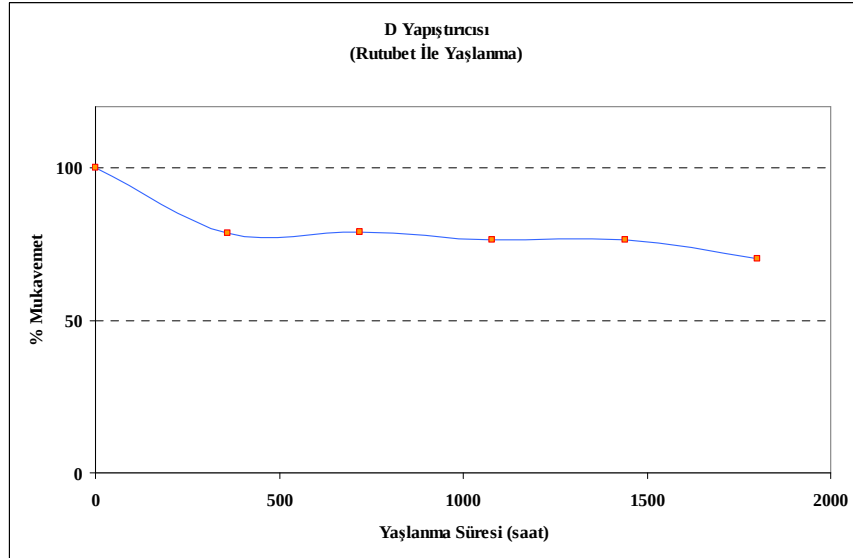
C yapıştırıcısına ait rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'dedir. Yapıştırıcı başlangıç dayanımının %65'ini ilk 30 günde kaybetmiştir. 75 gün sonunda ise başlangıç mukavemetinin %40'ını koruyabilmiştir. Hasarların tamamı yapışma kusurudur. Bu durum, yapıştırıcının yüzeylere iyi tutunamadığının

ispatıdır. C yapıştırıcısı, ısı çevrim ile yaşlanma deneylerinin sonuçlarında da nemden önemli miktarda etkilendiğini göstermiştir.

D yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneylerinin sonuçları Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de gösterilmiştir.

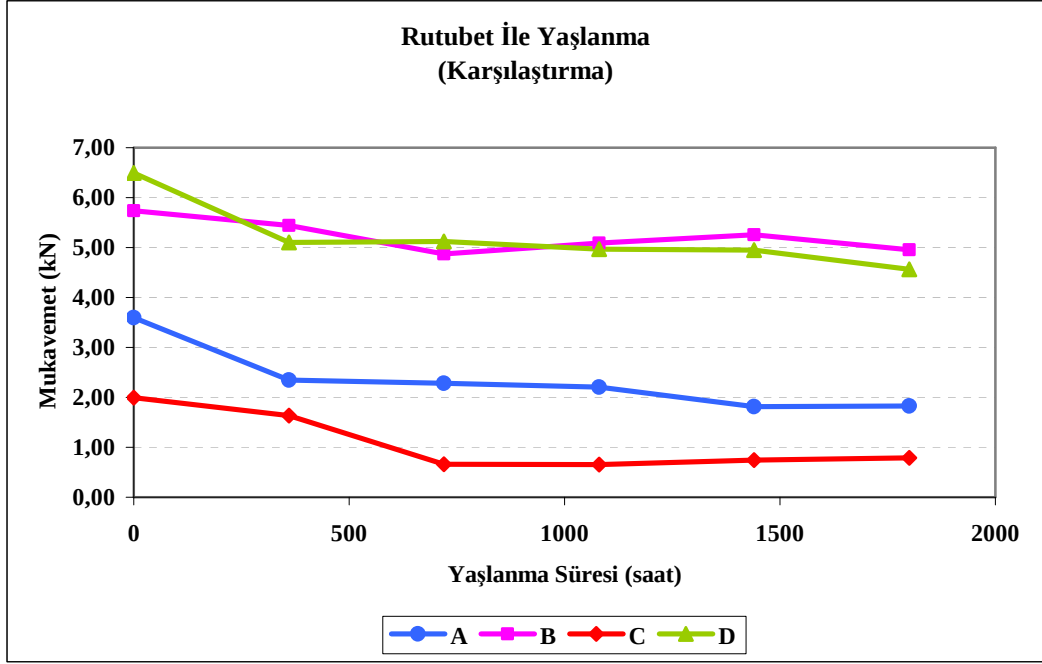


Şekil 6.22: D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde ölçülen dayanım değerleri ve zamanla değişimi (Tablo A.8)



Şekil 6.23: D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan levha numunelerinde rutubet ile yaşlanma deneyinde tespit edilen zamana bağlı dayanım kaybı

D yapıştırıcısının başlangıç mukavemetinin %25'sini ilk 15 günde kaybettiği ve 75 gün sonunda başlangıç dayanımının %70'ini koruduğu belirlenmiştir. Hasarların tamamı karışık kusur olarak nitelenen türdendir. B yapıştırıcısındaki numunelerde görüldüğü gibi, yapıştırma bölgesi hasarı yaşlanma süresi artışıyla yapışma kusuru oranı artacak biçimde değişim göstermektedir. Yine D yapıştırıcısının dayanım değerleri deney süresinin başlarındaki ani bir düşüşün ardından daha kararlı seyrir izlemektedir.



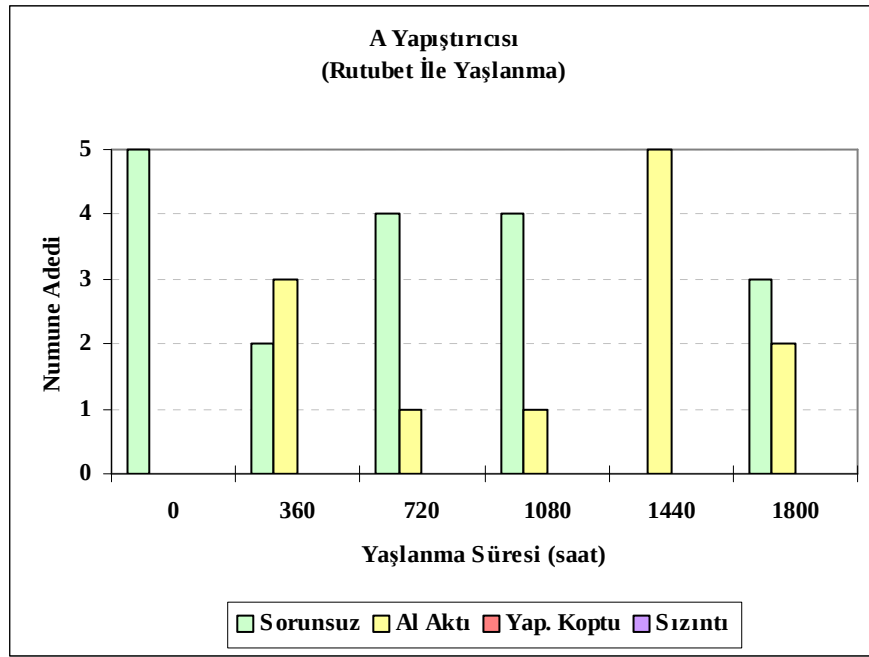
Şekil 6.24: Levha numunelerinin rutubet ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar)

Levha numuneleri ile gerçekleştirilen rutubet ile yaşlanma deney sonuçları incelendiğinde B ve D yapıştırıcılarının hem başlangıçtaki mukavemet değerlerinin büyük kısmını korumaları, hem de verdikleri yüksek mukavemet değerleri sebebiyle neme karşı daha az hassas ve daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki yapıştırıcısının da yapışma kusuru vermemiş olması Al ve Cu yüzeylere iyi tutunduklarını göstermektedir. C yapıştırıcısının, ısı çevrim ile yaşlanma deneylerinde verdiği sonuçların paralelinde sonuçlar verdiği ve neme karşı oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple C yapıştırıcısı nemin etkili olduğu ortamlarda kullanılmaya elverişli değildir. A yapıştırıcısı ise mukavemetinin %50'sini korumasına rağmen yapışma kusuru hasarı meydana getirdiğinden ancak çok daha etkili ve özel yüzey hazırlığı ile nemli ortamlarda kullanılmaya hazır duruma getirilebilir (Şekil 6.24).

6.2.2 Boru Numuneleri İle Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

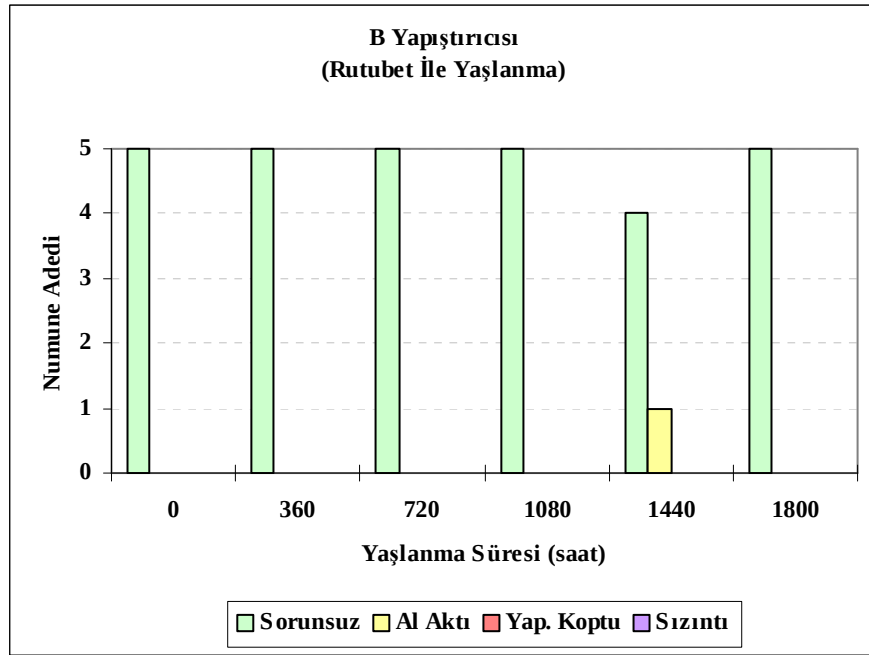
Deney sonuçları, ısıl çevrim ile yaşlanma deneylerinin değerlendirilmesinde kullanılan ifadelerle verilmiştir.

A yapıştırıcısının boru numuneleri ile gerçekleştirilen rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarında levha numuneleri ile tespit edilen dayanım kaybı tekrarlanmıştır (Şekil 6.25). Ancak çekme deneylerinde Al malzemeyi akmaya zorlayacak bir dayanım gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum birleştirmenin koruduğu dayanım değerinin, boru bağlantılarında sürekliliği sağlayacak yeterlilikte olduğu belirlenmiştir.



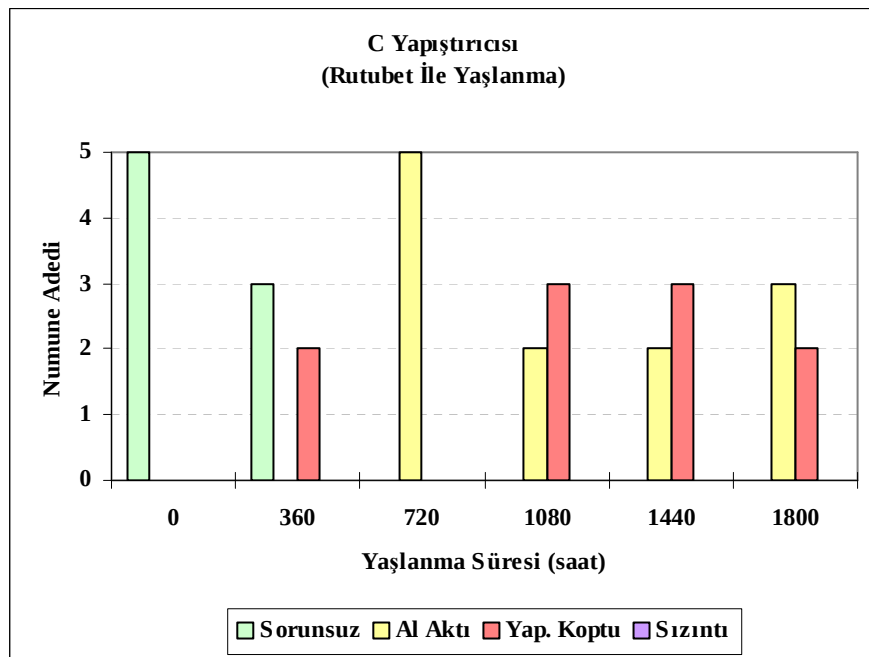
Şekil 6.25: A yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları

Şekil 6.26’da B yapıştırıcısına ait deney sonuçları görülmektedir. Sadece 60. günde bir adet numunede sorun belirlenmiştir. Diğer tüm numuneler sorunsuz olduğundan, bu numunenin sonucu göz ardı edilmiştir.

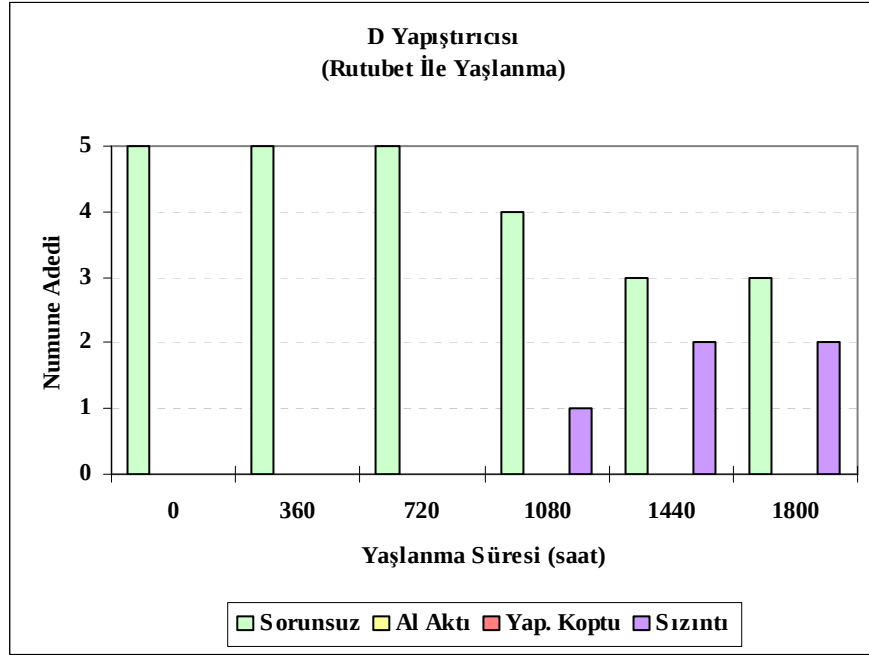


Şekil 6.26: B yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları

Şekil 6.27’de C yapıştırıcısı levha numuneleri ile elde edilen sonuçlar paralelinde sonuçlar vermiştir. C yapıştırıcısı 15. günden itibaren mukavemet kaybına dayalı çeşitli sorunlar ortaya çıkarmıştır. Yapıştırma bölgesinden ayrılmanın çok fazla sayısı numunede meydana gelmiş olması, yapıştırıcının Al ve Cu yüzeylere iyi tutunamadığının bir başka göstergesidir.

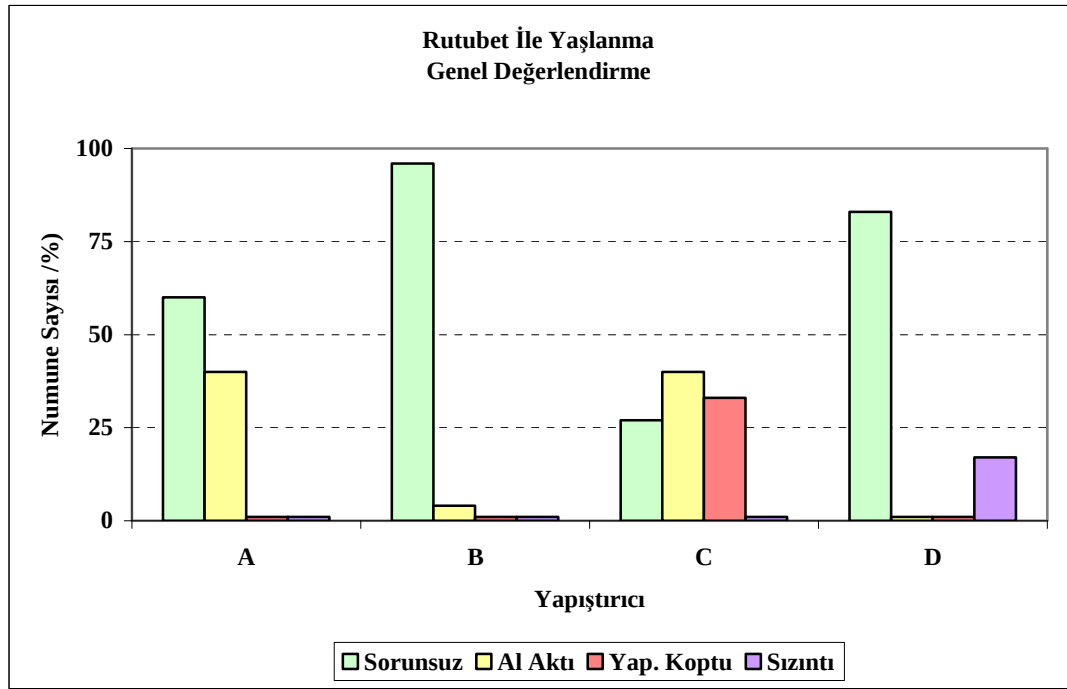


Şekil 6.27: C yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları

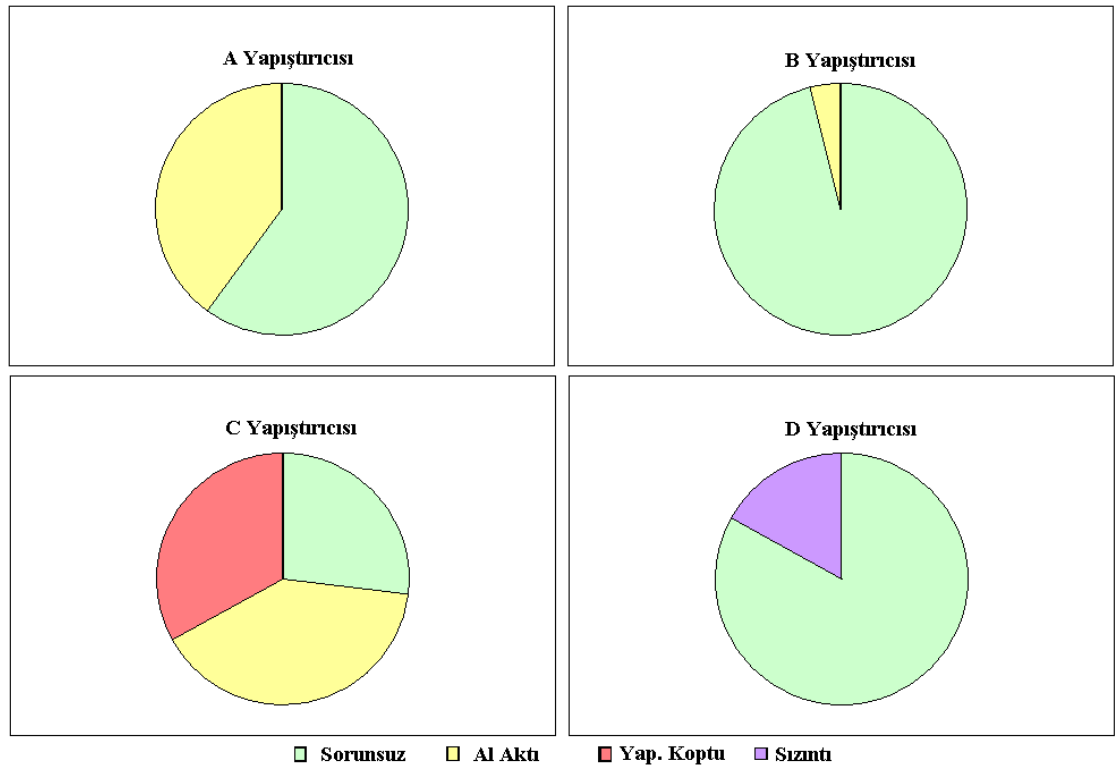


Şekil 6.28: D yapıştırıcısı ile hazırlanan boru numunelerine ait rutubet ile yaşlanma deney sonuçları

Şekil 6.28’de D yapıştırıcısına ait rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları verilmiştir. Boru numuneleri ile gerçekleştirilen deneylerin sonrasında, boruların yapıştırma bölgesinde sızıntı tespit edilmiştir. D yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan numunelerde yaşlanma sonrası mukavemet kaybının çok yüksek olmamasına karşın, numunelerde sızıntı belirlenmesinin sebebi, daha önceden de belirtildiği gibi, yapıştırıcının düşük viskozitesi nedeniyle kürlenme esnasında önemli miktarını birleştirme bölgesinde tutamamasıdır.



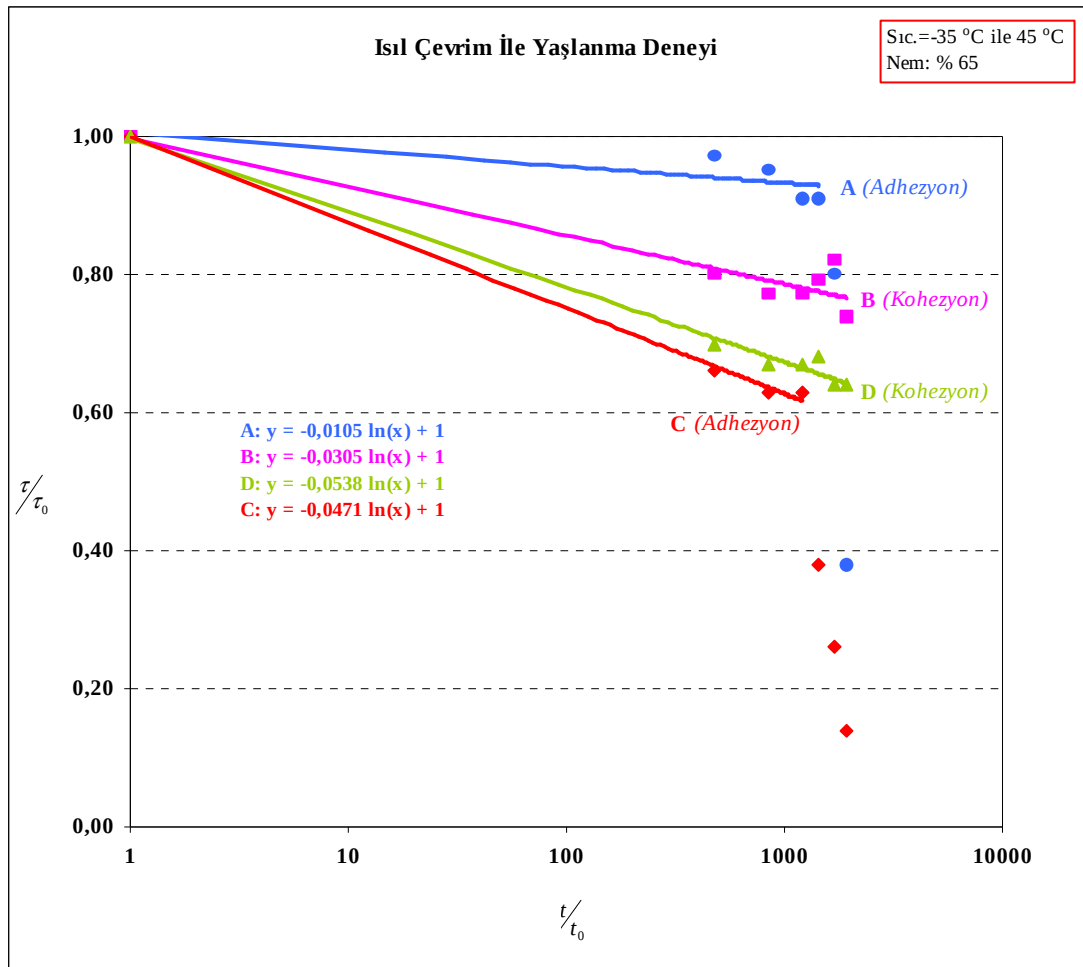
Şekil 6.29: Boru numunelerinin rutubet ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-sütun gösterimi)



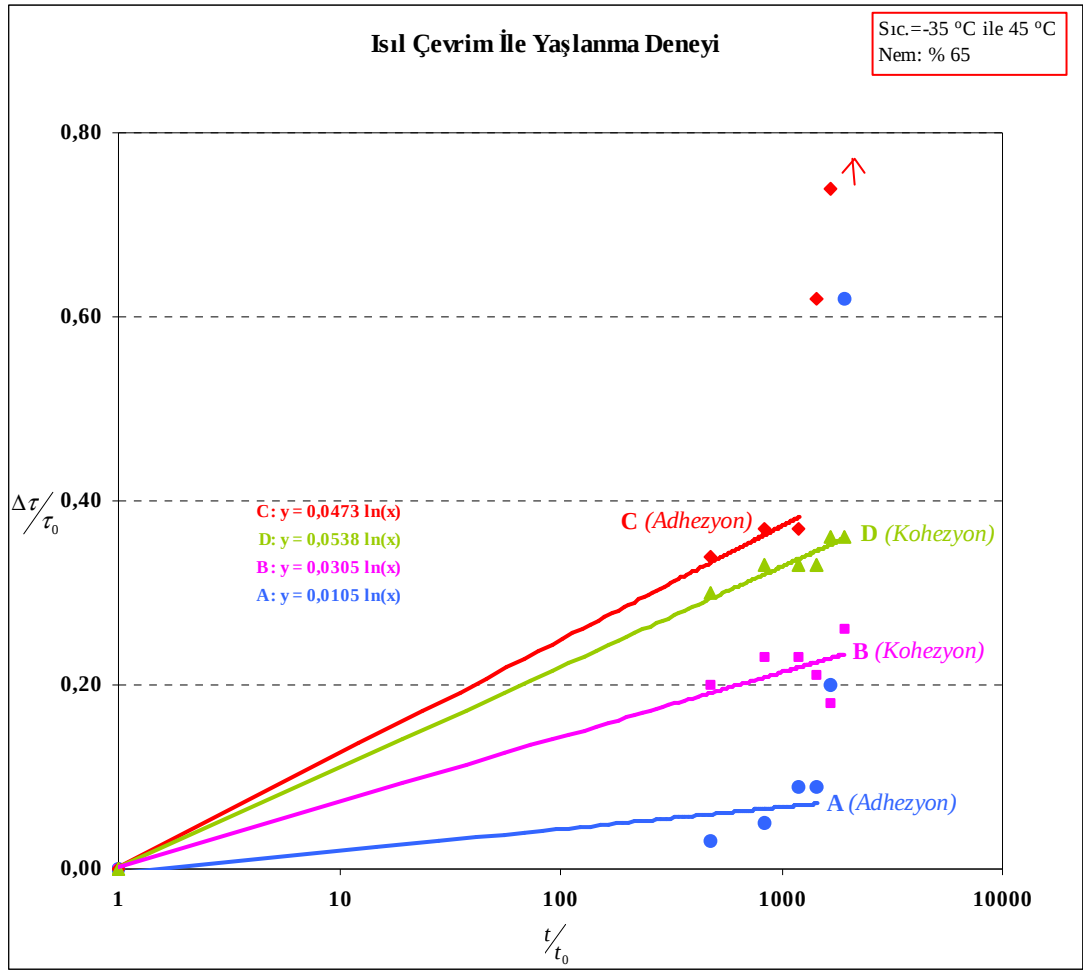
Şekil 6.30: Boru numunelerinin rutubet ile yaşlanma deneyine ait sonuçlar (tüm yapıştırıcılar-pasta gösterimi)

Boru numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen rutubet ile yaşlanma deneyleri sonucunda D yapıştırıcısı sızıntı verdiği için ve C yapıştırıcısı kullanılarak hazırlanan deney numuneleri başlangıç dayanımının büyük kısmını kaybederek birleştirme bölgesinden koptuğundan Al-Cu boru birleştirmelerinde kullanılmaya elverişli değildir. A yapıştırıcısı, rutubet ile yaşlanma deneyleri sonrasında itinalı bir yüzey hazırlığı sonrası kullanılabilir bir yapıştırıcı olarak nitelendirilmiştir. B yapıştırıcısı ise ısıl çevrim ile yaşlanma deneylerinin ardından rutubet ile yaşlanma deneylerinden de sorunsuz geçen tek yapıştırıcıdır (Şekil 6.29 ve Şekil 6.30).

6.3. Deneyel Bulguların Genel Değerlendirmesi

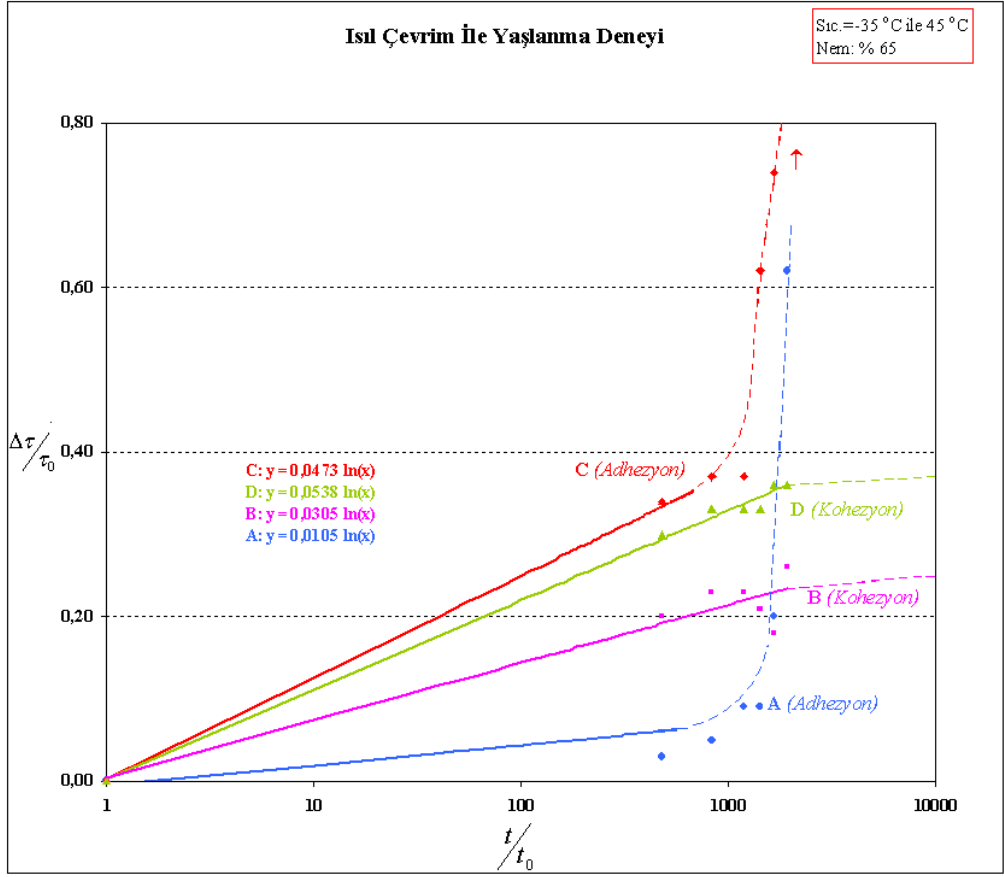


Şekil 6.31: Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonucu yapıştırıcıların mukavemet azalmaları



Şekil 6.32: Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması

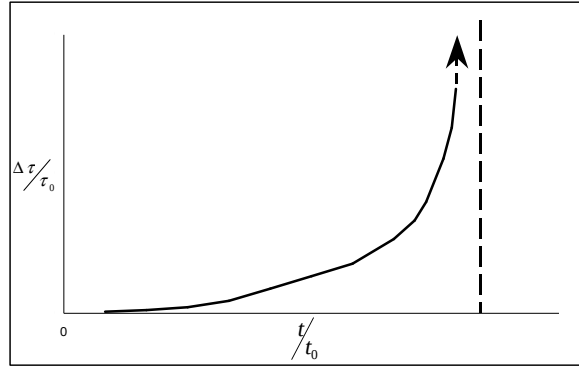
Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonunda Şekil 6.31'deki grafik elde edilmiştir. Şekilde düşey eksen zamanla birleştirme mukavemetinde meydana gelen değişmeyi, yatay eksen yaşlanma süresini vermektedir. Şekil 6.32 incelendiğinde A ve C yapıştırıcılarının, düşey eksende asimptotik formda eğriler oluşturabilecek deney sonuçları verdiği görülmektedir. Şekil 6.32'de düşey eksen birim mukavemet başına mukavemet azalmasını vermektedir.



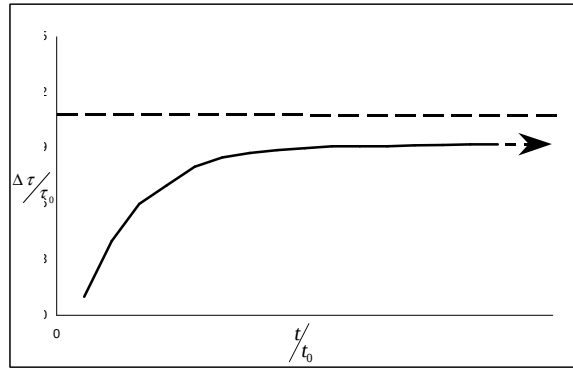
Şekil 6.33: Isıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması eğrilerinin asimptot form yapacak biçimde devam ettirilmesi

Şekil 6.33'te birim mukavemet başına mukavemet değişimini gösteren eğriler asimptotik forma uygun şekilde devam ettirilerek çizilmiştir. Her iki yapıştırıcı da belirli bir yaşlanma süresinden sonra mukavemet değerlerini hızla kaybetmişlerdir (Şekil 6.33 ve Şekil 6.34). İki yapıştırıcının deneylerde gösterdiği ortak davranış adezyon (yapışma) hasarı vermeleridir. Bunun nedeni yapıştırıcıların yüzeye uzun süreli dayanım sağlayacak yeterlikte yapışmamasıdır (tutunmamasıdır). Yüzeye yapışma, yapıştırıcıya göre değişen ıslatma yeteneği ile ilgili bir olaydır. A ve C yapıştırıcılarının her ikisi de kimyasal yapıları değiştirilerek (modifiye edilerek) elde edilmiş hızlı kürlenepoksi yapıştırıcılardır. Yapıştırıcılara hızlı kürlenme özelliği kazandırılırken kimyasal yapıda yapılan değişikliklerin, yapıştırıcı dayanımına bu tür olumsuz etkiler yaptığı bilgisi yapıştırıcı üreticisi firmalardan sağlanmıştır. Bu olumsuz etkilerin başlıcaları kullanım ömründe kısılma, mukavemet azalması, yüzey ıslatma yeteneğinin kötüleşmesi olarak verilmiştir. Ayrıca A ve C yapıştırıcılarının rijit yapıda olmaları, sıcaklık çevrimi ile ortaya çıkan genleşme-daralma sonucu

oluşan gerilmelere yeterli esnekliği gösterememesine yol açmaktadır. Bu durum yapıştırıcının mukavemetinin kısa sürede tükenmesine neden olmaktadır.



Şekil 6.34: A ve C yapıştırıcılarının (adezyon hasarı veren yapıştırıcıların) ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonunda verdiği asimptotik form

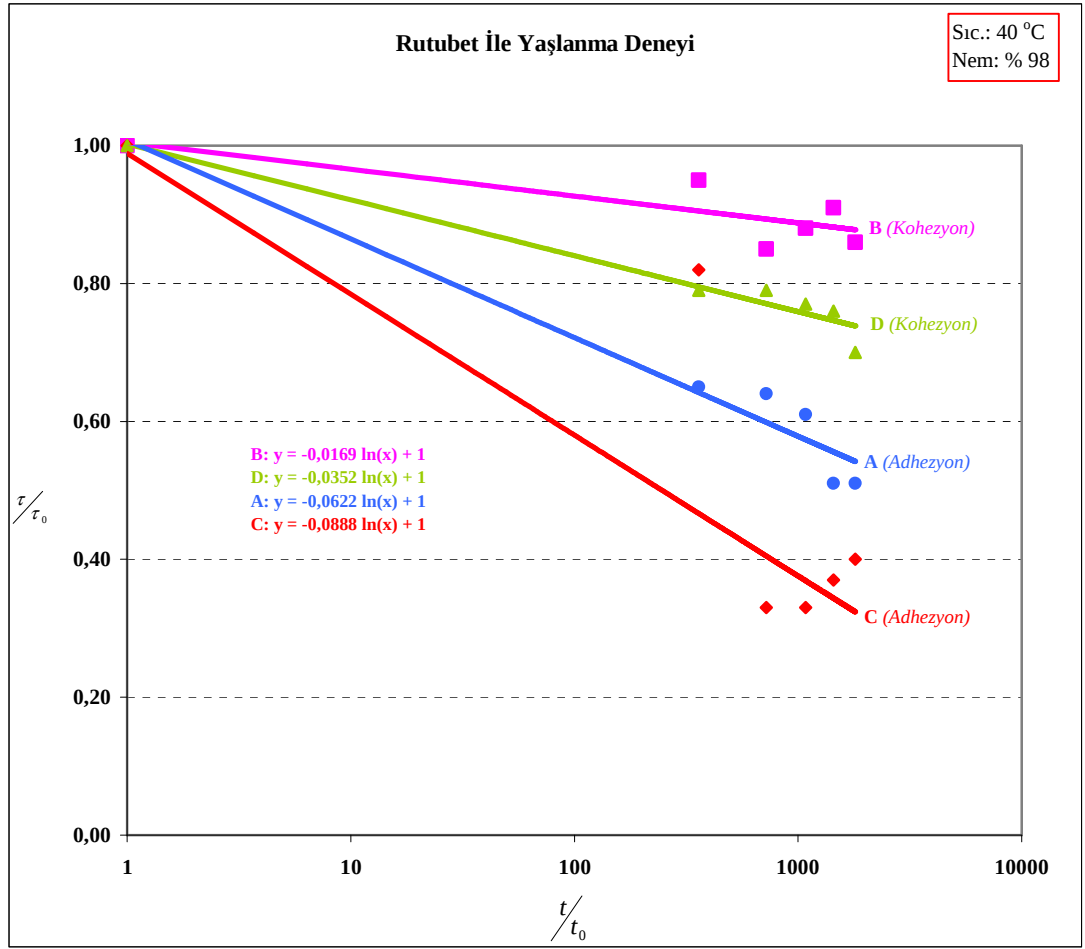


Şekil 6.35: B ve D yapıştırıcılarının (kohezyon hasarı veren yapıştırıcıların) ısıl çevrim ile yaşlanma deneyleri sonunda verdiği asimptotik form

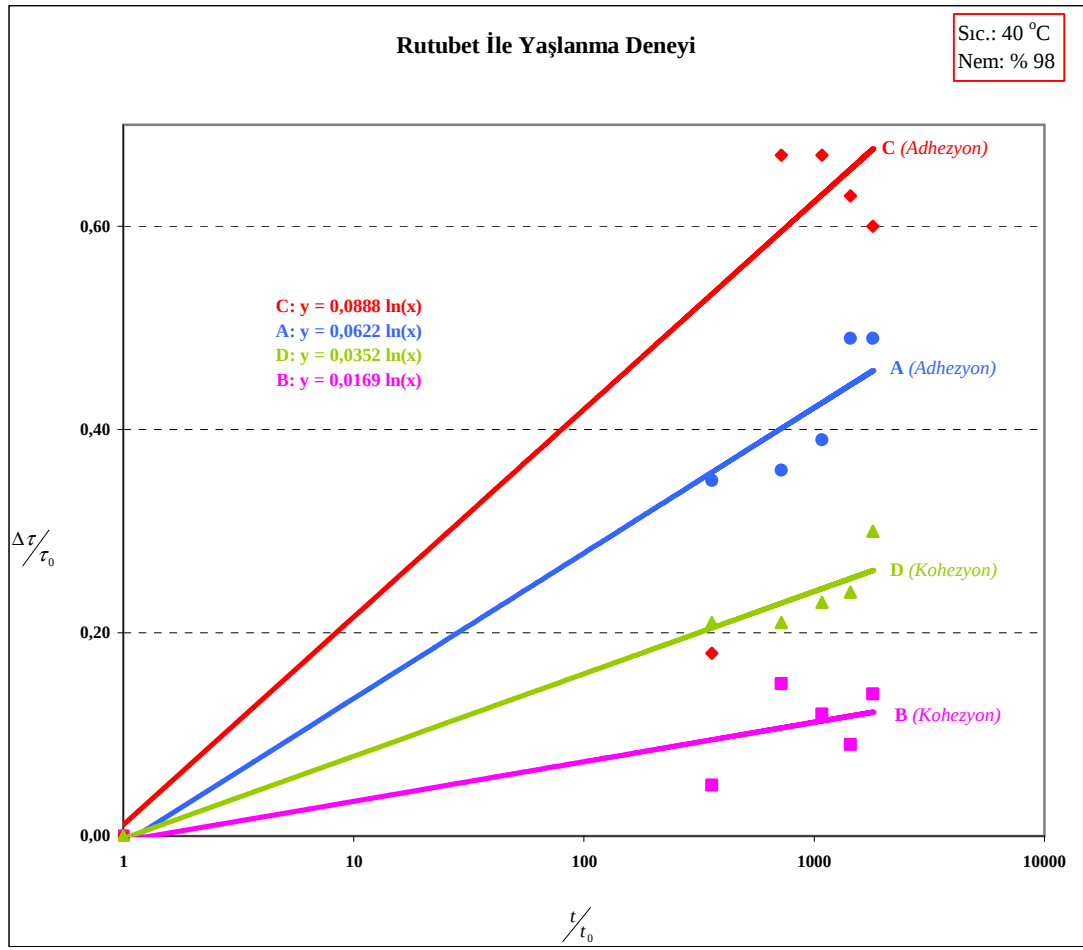
Şekil 6.32’de B ve D yapıştırıcılarının eğrilerinin diğerlerinden farklı bir asimptotik formda deney sonuçları verdikleri görülmektedir. B ve D yapıştırıcıları, mukavemetleri belirli kayıp verdikten sonra sabitlenmektedir. Eğriler sonsuza gittiğinden, sağlanan birleştirmenin ömrü de sonsuz kabul edilmektedir. Bunun sebepleri ise A ve C yapıştırıcıları için bahsedilen olumsuz etkenlerin sonuçlarının B ve D yapıştırıcıları için geçerli olmamasıdır. Yani, B ve D yapıştırıcıları esnek yapıştırıcılardır ve genleşme-daralma sonucu ortaya çıkan artık gerilmelerden etkilenmemektedir. Bunun yanı sıra yapılarında yapıştırıcının sağlayacağı mukavemet değerini düşürecek ya da kullanım ömrünü kısaltacak değişiklikler yapılmamıştır. B ve D yapıştırıcıları en genel epoksi yapıştırıcılardır.

Isıl çevrim ile yaşlanma deneyleri ile elde edilen tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde A ve C yapıştırıcılarının sürekli mukavemet kaybetmeleri

sebebiyle kullanılamaz olduğu, B ve D yapıştırıcılarının sonsuz ömür vermeleri sayesinde tercih edilebilir oldukları belirlenmiştir.

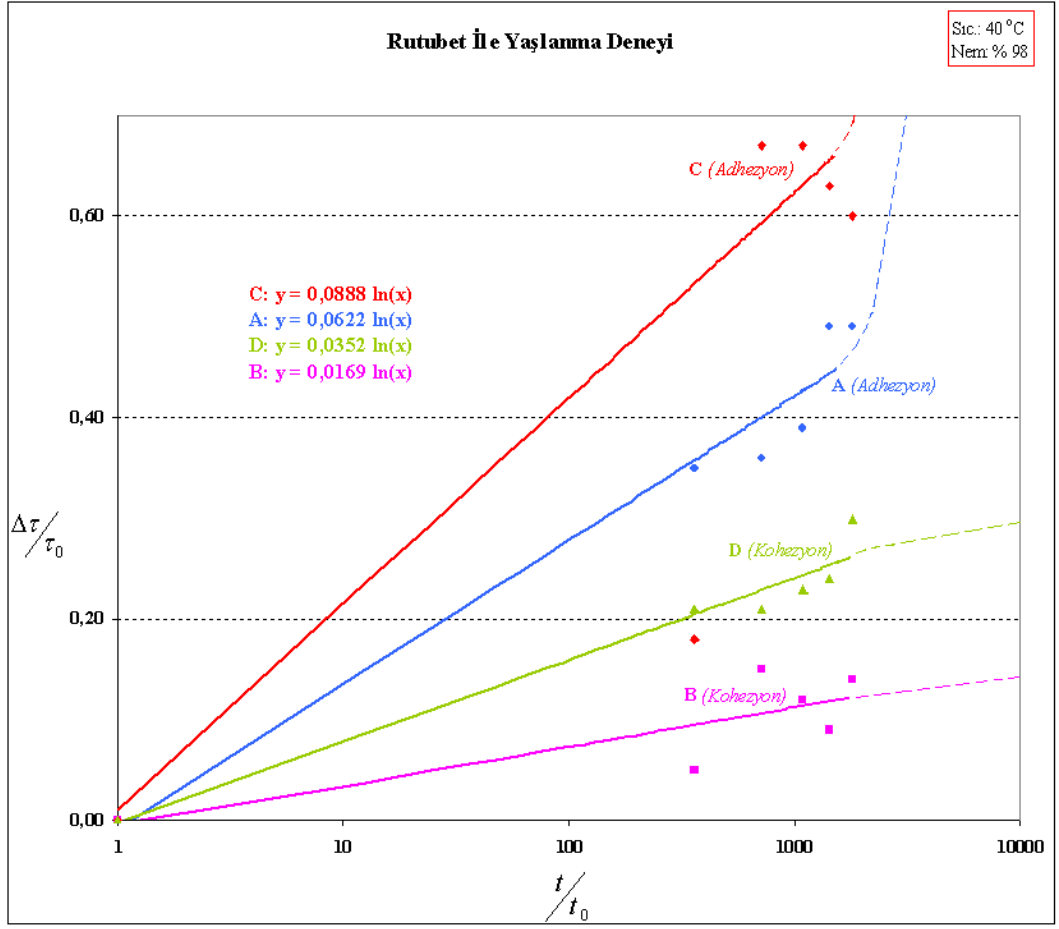


Şekil 6.36: Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucu yapıştırıcıların mukavemet azalmaları



Şekil 6.37: Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması

Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucunda en hızlı mukavemet kaybı gösteren yapıştırıcıların A ve C yapıştırıcıları olduğu belirlenmiştir. Mukavemet kayıplarını gösteren eğriler incelendiğinde ısıl çevim ile yaşlanma deneyine benzer eğrilerin ortaya çıktığı görülmektedir. A ve C yapıştırıcılarının eğrilerinin dikeyde, B ve D yapıştırıcılarının eğrilerinin yatayda asimptotlar oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum B ve D yapıştırıcılarının alüminyum-bakır malzeme çifti ile gerçekleştirilmiş birleştirmeleri için sonsuz sağlandığının göstergesidir.



Şekil 6.38: Rutubet ile yaşlanma deneyi sonucu birim mukavemet başına mukavemet azalması eğrilerinin asimptot form yapacak biçimde devam ettirilmesi

A ve C yapıştırıcılarına ait hasarlar rutubet ile yaşlanma deneylerinin sonucunda da adezyon (yapışma) hasarıdır. Ayrılma yapıştırıcı ile yapışan malzeme ara yüzeyinden gerçekleşmektedir. Hasar yapıştırıcının malzeme yüzeyine iyi tutunamamasından kaynaklanmaktadır. Birleştirme dayanımının azalması, suyun ara yüzeye girmesi sebebiyle zaten az olan ikincil bağları zayıflatmasının sonucudur. Mukavemet değerlerinin belirli bir zaman sonunda birden çok fazla düşmesi ise bu süre sonunda yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasında yapışmayı sağlayan ikincil bağların, artan su miktarı ile ortadan kalmasının sonucudur.

B ve D yapıştırıcıları ile hazırlanan birleştirmelerde kohezyon hasarı meydana gelmiştir. Dolayısıyla deney sonuçlarında elde edilen mukavemet değerleri doğrudan yapıştırıcı dayanımını veren değerlerdir. B ve D yapıştırıcılarının yaşlanma deney sonuçları ile elde edilen mukavemet değişimi eğrileri, yapıştırıcıların yaşlanması ile ilgili olarak literatürde verilen karakteristik eğriler ile örtüşmektedir (Şekil 4.9).

Levhalar ile gerçekleştirilen rutubet ile yaşlanma deneyleri sonucunda A ve C yapıştırıcılarının alüminyuma tutunma yeteneklerinin yetersiz sebebiyle, Al-Cu malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde kullanılmak için elverişsiz olduğu belirlenmiştir.

Öte yandan B ve D yapıştırıcıları rutubet ile yaşlanma deneyleri sonucunda da sonsuz ömür verdikleri belirlenmiştir.

Zamanla mukavemet azalmasını veren grafikler Şekil 6.31 ve Şekil 6.36’da gösterilmiştir. Grafiklerin denklemleri en genel haliyle

$$y = -a \cdot \ln x + 1 \quad (6.6)$$

olarak verilmektedir.

Grafiklerde y eksenini $\frac{\tau}{\tau_0}$ boyutsuz mukavemet değişimini; x eksenini ise $\frac{t}{t_0}$ boyutsuz

yaşlanma süresini göstermektedir. Boyutsuz a sayısı, deneysel çalışmalarla elde edilen ve birden fazla parametreden etkilendiği belirlenen bir katsayıdır. Eğrinin karakteristik denkleminde, eğimin (a) negatif olması, mukavemette yaşlanma süresine bağlı olarak devamlı azalma olduğunu göstergesidir.

$$y = -a \cdot \ln x + 1$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} = -a \cdot \ln \frac{t}{t_0} + 1 \quad (6.7)$$

$$1 - \frac{\tau}{\tau_0} = a \cdot \ln \frac{t}{t_0} \quad (6.8)$$

$$\frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0} = a \cdot \ln \frac{t}{t_0} \quad (6.9)$$

$$\boxed{\frac{\Delta \tau}{\tau_0} = a \cdot \ln \frac{t}{t_0}} \quad (6.10)$$

τ_0 : Yapıştırma birleştirmesinin başlangıçtaki (yaşlanma öncesi veya 1 saatlik yaşlanma sonrası*) mukavemet değeri

τ : Yapıştırma birleştirmesinin herhangi bir zamandaki mukavemet değeri

t : Yaşlanma süresi (saat)

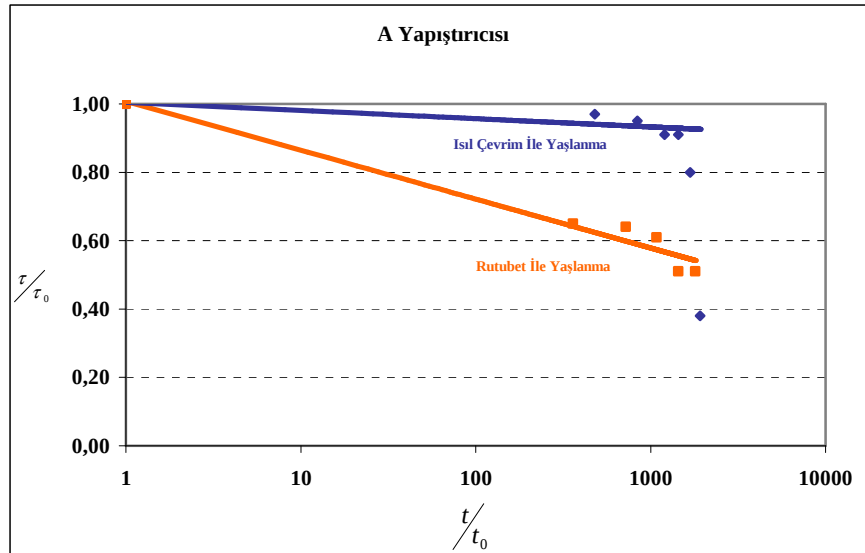
t_0 : 1 saat

a : Deneysel olarak elde edilen katsayısı

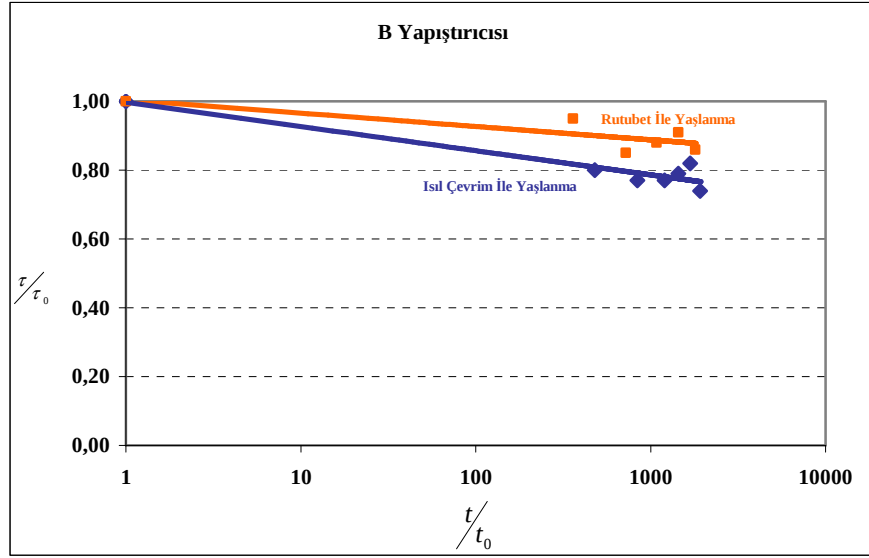
*Yaşlanma deneyleri başladıktan 1 saat sonra yapıştırma birleştirmesinin başlangıç mukavemetinde bir değişim olmadığı kabul edilmiştir.

6.10 eşitliği ile verilen ifade birim mukavemet başına mukavemet azalmasıdır. Eşitlikteki a katsayısı mukavemet azalma eğrisinin eğimini dolayısı ile azalma hızını veren değerdir. a katsayısını etkilediği belirlenen etkenler aşağıda sıralanmıştır:

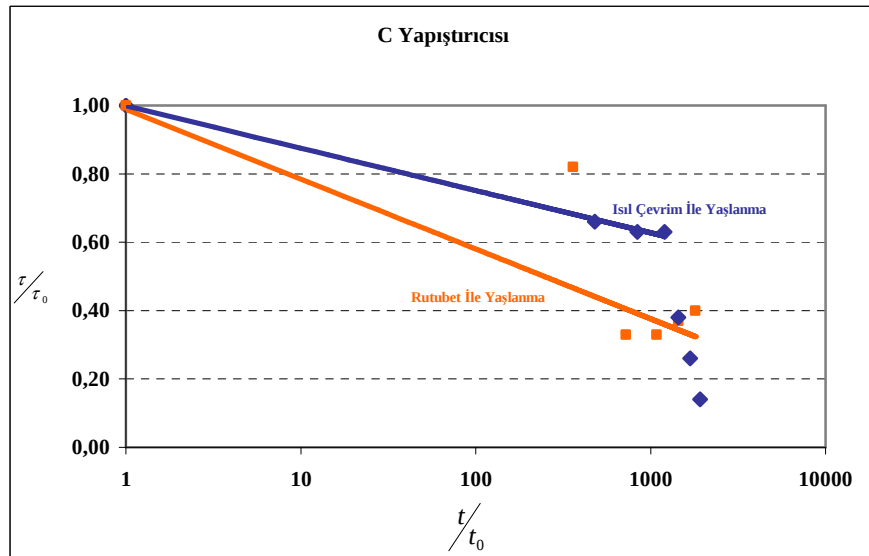
- Birleştirmede kullanılan yapıştırıcının türü
- Birleştirmede kullanılan malzemelerin türü
- Birleştirilen malzeme yüzeylerinin yüzey durumu
- Yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasındaki ilişki (yüzey enerjileri farkı)
- Birleştirmenin çalışma koşulları (sıcaklık, nem, basınç v.b.)



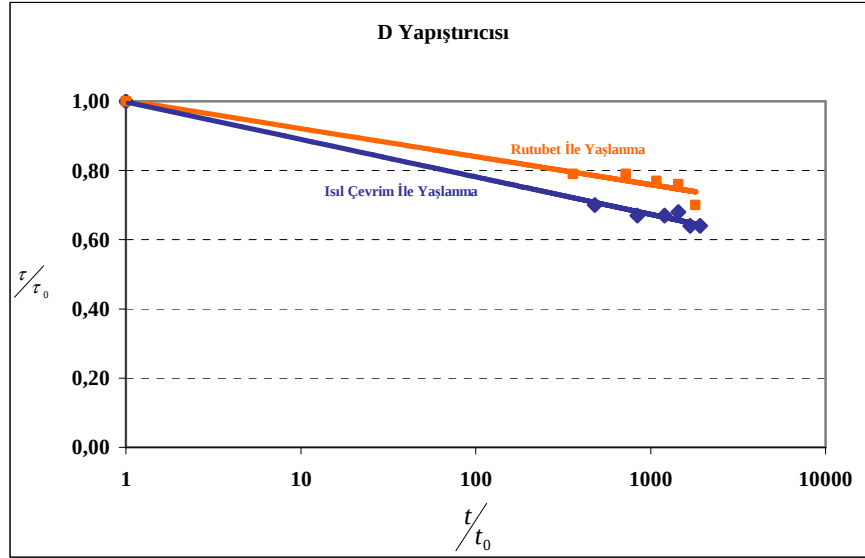
Şekil 6.39: A yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.40: B yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.41: C yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 6.42: D yapıştırıcısının ısı çevrim ile yaşlanma ve rutubet ile yaşlanma deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.39 ve Şekil 6.41 incelendiğinde A ve C yapıştırıcılarının sıcaklık çevrimi ile karşılaştırıldığında nemli ortamdan, daha fazla etkilenecek, mukavemetlerini daha çok kaybettikleri görülmektedir. Rutubetli ortamda bulunan su moleküllerinin zamanla yapıştırıcı-yapışan yüzey arasına yerleşerek, burada var olan ikincil bağları koparmak suretiyle birleştirme dayanımını azalttığı önceki bölümlerde açıklanmıştı. Yapışan yüzey ile iyi temas kuramadığı belirlenen A ve C yapıştırıcılarının, suyun da araya girmesi ile zaten zayıf olan bu kuvvetleri kaybetmesi kaçınılmazdır. Dolayısıyla A ve C yapıştırıcılarının rutubet ortamında mukavemetlerini daha fazla kaybetmeleri beklenir.

B ve D yapıştırıcılarının sıcaklık çevriminden ve rutubetli ortamdan yaklaşık olarak aynı oranlarda etkilendikleri görülmektedir (Şekil 6.40 ve Şekil 6.42). Yaşlanma süresi sonunda kalan mukavemet oranları incelendiğinde ise B yapıştırıcısının her iki ortama karşı daha dirençli olduğu belirlenmiştir. Öte yandan D yapıştırıcısının da her iki ortamda yaşlanması sırasında benzer yaşlanma eğrileri vermesi herhangi bir ortama daha duyarlı olmadığına göstergesidir.

7. SONUÇLAR

Alüminyum-bakır boru birleştirmelerinde yapıştırma yönteminin uygulanabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Boru birleştirmelerinde kullanılacak yapıştırıcıların seçiminde, yapıştırıcıların dayanımlarının saptanması sırasındaki deneysel çalışmalarda levha şeklindeki numunelerin de kullanılmasının gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Levha numuneleri ile dayanım değerleri doğru ve standart olarak belirlenebilmektedir.
- Alüminyum malzeme yüzeyine tutunma yetenekleri yetersiz olan yapıştırıcıların (A ve C Yapıştırıcıları) rutubet ile yaşlanma deneylerinde mukavemet kayıpları daha fazladır. Yapışan yüzeye iyi tutunamayan epoksi yapıştırıcılar için rutubetli ortamın etkisinin sıcaklığın etkisinden daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Geniş sıcaklık aralığında çalışacak bağlantıların birleştirilmesinde hızlı kürlenene yapıştırıcı (A Yapıştırıcısı ve C Yapıştırıcısı) kullanılması uygun değildir. Hızlı kürlenene yapıştırıcıların rijit yapıları, sıcaklık farkından ortaya çıkan ısı gerilmelere karşı yeterli esnekliği gösterememektedir ve bu durum birleştirmenin ara yüzeyden zorlanmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak rijit yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilen bağlantılarda, ayrılmanın ara yüzeyden gerçekleşmesi sonucu adezyon (yapışma) hasarı görülmektedir.
- Esnek yapıdaki yapıştırıcılar (B Yapıştırıcısı ve D Yapıştırıcısı), rijit yapıdaki yapıştırıcılara (A Yapıştırıcısı ve C Yapıştırıcısı) göre sıcaklık çevriminden doğan ısı gerilmeleri daha az etkilenmektedir.
- Sıcaklık çevrimi sonunda esnek yapıdaki yapıştırıcılar ile hazırlanan birleştirmelerin, rijit yapıdaki yapıştırıcılar ile hazırlanan birleştirmelere göre daha yüksek dayanım değerleri vermiştir.

- Çalışma ortamındaki %50-55 bağıl nem oranının üzerindeki bağıl nemin yapıştırma birleştirmesinin dayanımını olumsuz etkilediği belirlenmiştir.
- Çalışma ortamındaki nemin etkisi ile yapıştırma birleştirmesindeki mukavemet, yaşlanma süresinin başlarında ani olarak azalmakta, yaşlanma süresi arttıkça mukavemetteki düşme hızı azalmaktadır.
- Nemli ortamda çalışan yapıştırma birleştirmelerinde zamanla dayanım azalma hızında bir düşüş olmasına rağmen, mukavemetteki kayıp süreklidir.
- Yapıştırıcıların yaşlanma süresine bağlı olarak mukavemet azalmasının $\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = a \cdot \ln \frac{t}{t_0}$ eşitliği ile ifade edilebildiği belirlenmiştir. $\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$, birim mukavemet başına mukavemet azalmasını, $\frac{t}{t_0}$ boyutsuz yaşlanma süresini ifade etmektedir. “a” deneysel olarak elde edilen (amprik), boyutsuz bir katsayıdır. Yapıştırıcı türü (formülasyonu) ve yapıştırıcının çalışma koşullarına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.
- Yüksek nem altında çalışacak yapıştırıcıların, yapışacakları yüzeye iyi tutunmaları gerekmektedir. Aksi durumda su, yapıştırıcı ve yapışan malzeme yüzeyi arasına girmekte ve birleştirme dayanımını önemli düzeyde düşürücü etki yapmaktadır.
- Nem altında yaşlanan esnek yapıştırıcılarda hasar, yaşlanma süresindeki artışla birlikte kohezyon kusurundan, yapışma kusuruna kaymaktadır.
- Boru numuneleri ile gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, zemin ile temas etmeden (asılı durumda) kürlenmenin gerektiği durumlar için viskozitesi düşük yapıştırıcı kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir. Böyle durumlarda, düşük viskoziteli yapıştırıcılar damlama sorunu yaratmaktadır.
- Boru numunelerinde, levha numunelerine kıyasla dayanım kaybı daha az gerçekleşmektedir. Bunun sebebi, yapıştırıcının ortam ile temas alanının daha az olmasıdır. Bu nedenle levha numuneleri ile elde edilen deney sonuçları daha konservatiftir.

8. ÖNERİLER

Alüminyum-bakır boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesinin incelendiği bu çalışmanın ardından aşağıda sıralanan çalışmaların gerçekleştirilmesi önerilmektedir:

- Sıcak-soğuk çevrimlerine maruz kalan birleştirmelerde, birleştirilen yüzey malzemelerinin ve yapıştırıcının ısı genleşme katsayıları farkı sebebiyle oluşan, genleşme-daralma kaynaklı ısı gerilmeleri en aza indirmek amacıyla, yapıştırıcı içine ilave edilen, yapışan malzemenin parçacıklarından oluşan dolguların (tozların) yaşlanma ile kaybedilen dayanıma etkisi ileriki çalışmalarda incelenebilir.
- Yapıştırma yöntemi ile birleştirilecek yüzeylerdeki pürüz miktarının, bağlantının çevresel etkilerle ortaya çıkan yaşlanmaya karşı direncine etkisi araştırılabilir.
- Deney sürelerinin daha uzun tutularak, yapıştırıcıların uzun süredeki davranışlarının daha net olarak belirlenebilmesi sağlanabilir.
- Isıl çevrimin ve rutubetin etkilerinin ayrı ayrı belirlenmesi ve böylece sinerjik etkinin varlığının araştırılması amacıyla rutubet ile yaşlanma deneyleri %65'lik bağıl nem ortamında ya da ısı çevrim ile yaşlanma deneyleri nemsiz ortamda gerçekleştirilmelidir.
- Alüminyum-bakır boru çiftlerinin yapıştırma yöntemi ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ardından alüminyum-alüminyum boruların yapıştırma yöntemi ile birleştirilme olanakları çalışılmalıdır. Akışkan taşıyan borularında alüminyum-bakır boru çifti yerine alüminyum-alüminyum boru çiftinin kullanılması, bakır ve alüminyum malzeme maliyetleri göz önüne alındığında uygulama için maliyet avantajı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Kinloch, A. J.**, 1987. Adhesion and Adhesives: Science and Technology, Chapman and Hill, London
- [2] **ASTM D 907-90**, 1990. Standard terminology of adhesives, *American Society For Testing And Materials*, Philadelphia.
- [3] **Aydın, M. D.**, 2003. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [4] **ASM International**, 1990. ASM Engineering Materials Handbook Vol.3: Adhesives and Sealants, ASM International, ABD.
- [5] **Kaya, F.**, 2004. Ana Hatları ile Yapıştırıcılar, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [6] **Temiz, Ş.**, 2003. Yapıştırıcı bağlantılarının mekanik özellikleri üzerine çevresel faktörlerin etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [7] **Brandy G. S., Clauser H. R., Vaccari J. A.**, 1997. Materials Handbook, McGraw Hill, New York.
- [8] **Loctite Corporation**, 1997. Loctite Worldwide Design Handbook, Loctite Corporation, Hartford.
- [9] **Petrie, E. M.**, 2000. Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw Hill, New York
- [10] **TS EN ISO 10365/Nisan 2001**, 2001. Yapıştırıcılar-Başlıca kusurların gösterilmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [11] **Petrie, E. M.**, 1975. Handbook of Plastics and Elastomers, McGraw Hill, New York
- [12] **Kim J. K. and Lee D. G.**, 2004. Effects of applied pressure and temperature during curing operation on the strength of the tubular single-lap adhesive joints, *Journal Adhesion Science and Technology*, **18**, 87-107
- [13] "To Postcure or Not." Editorial. *Special Chem Adhesives and Sealants*. 2 Mart 2005.18 Şubat 2008.
<<http://www.specialchem4adhesives.com/home/editorial.aspx?id=1071>>
- [14] **Aydın M. D., Temiz Ş. and Özel A.**, 2007. Effect of curing pressure on the strength of adhesively bonded joints, *The Journal of Adhesion*, **83**, 553-571
- [15] Petrie, Edward M. "The Importance of Glass Transition Temperature in Formulating Adhesives and Sealants." *Special Chem Adhesives and Sealants*. 28 Mayıs 2003. 20 Şubat 2008.
<<http://www.specialchem4adhesives.com/resources/articles/article.aspx?id=354>>

- [16] **Adams, R. D.**, 2005. *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*, Woodhead Pub., Cambridge
- [17] **Mays G. C. and Huthcinson A. R.**, 1992. *Adhesives in Civil Engineering*, Cambridge University Press, London.
- [18] **Cognard, P.**, 2006. *Handbook of Adhesives and Sealants*, Elsevier, Amsterdam
- [19] **da Silva L. F. M. and Adams R. D.**, 2007. Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature rates, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **27**, 362-379
- [20] **da Silva L. F. M. and Adams R. D.**, 2007. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **27**, 216-226
- [21] **ASTM D 1002-72** (Reapproved 1983), 1972. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading, *American Society For Testing And Materials*, Philadelphia.
- [22] **ASTM D 1183-03**, 2003. Standard practices for resistance of adhesives to cyclic laboratory aging conditions, *American Society For Testing And Materials* Philadelphia.
- [23] Petrie, Edward M. "Low Temperature Adhesives." *Omnexus Adhesives and Sealants*. 6 Şubat 2008. 14 Mart 2008.
<<http://www.omnexus4adhesives.com/getting-started/articles.aspx?id=1070&page>>
- [24] Petrie, Edward M. "Reducing Internal Stresses" *Special Chem Adhesives and Sealants*. 3 Kasım 2004. 12 Mart 2008.
<<http://www.specialchem4adhesives.com/index.aspx>>
- [25] **da Silva L. F. M. and Adams R. D.**, 2005. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures, *Journal Adhesion Science and Technology*, **19**, 109-141
- [26] **Hearn, E. J.**, 1993. *Mechanics of Materials*, Pergamon Press, Exeter.
- [27] "Problems With Fast Curing Adhesives" Editorial. *Omnexus Adhesives and Sealants*. 27 Haziran 2007. 14 Mart 2008.
<http://www.omnexus4adhesives.com/services/editorials.aspx?id=830&or=s37519107_&q>

EKLER

EK-A

(*) ile işaretlenmiş numuneler ortalamaya alınmamıştır.

A.H. adezyon (yapışma) hasarını, K.H. karışık hasarı ifade etmektedir.

Tablo A.1: A yapıştırıcısının ısıtıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	3,023	9,521	A.H.	12,7
2*	0	2,623	8,261	A.H.	12,7
3	0	4,311	13,578	A.H.	12,7
4	0	3,893	12,261	A.H.	12,7
5	0	3,150	9,921	A.H.	12,7
		ORT	3,594	10,709	
		STD. SAPMA	0,613	1,930	

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	480 saat	3,143	9,899	A.H.	12,7
2	480 saat	4,212	13,266	A.H.	12,7
3	480 saat	3,489	10,989	A.H.	12,7
4	480 saat	3,501	11,027	A.H.	12,7
5	480 saat	3,225	10,157	A.H.	12,7
		ORT	3,514	11,068	
		STD. SAPMA	0,421	1,326	

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	840 saat	4,009	12,627	A.H.	12,7
2	640 saat	3,258	10,261	A.H.	12,7
3	640 saat	3,330	10,488	A.H.	12,7
4	840 saat	3,396	10,696	A.H.	12,7
5	640 saat	3,162	9,959	A.H.	12,7
		ORT	3,431	10,806	
		STD. SAPMA	0,335	1,054	

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1200 saat	3,324	10,469	A.H.	12,7
2	1200 saat	3,330	10,488	A.H.	12,7
3	1200 saat	3,453	10,876	A.H.	12,7
4	1200 saat	3,201	10,082	A.H.	12,7
5	1200 saat	3,041	9,578	A.H.	12,7
		ORT	3,270	10,299	
		STD. SAPMA	0,156	0,491	

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	2,862	9,014	A.H.	12,7
2	1440 saat	3,297	10,384	A.H.	12,7
3*	1440 saat	0,488	1,537	A.H.	12,7
4	1440 saat	3,715	11,701	A.H.	12,7
5	1440 saat	3,097	9,754	A.H.	12,7
	ORT	3,297	8,478		
	STD. SAPMA	0,441	1,388		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1680 saat	2,570	8,094	A.H.	12,7
2*	1680 saat	0,498	1,569	A.H.	12,7
3	1680 saat	3,342	10,526	A.H.	12,7
4	1680 saat	2,818	8,876	A.H.	12,7
5	1680 saat	2,624	8,265	A.H.	12,7
	ORT	2,877	7,466		
	STD. SAPMA	0,352	1,109		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1920 saat	1,422	4,479	A.H.	12,7
2*	1920 saat	0,399	1,257	A.H.	12,7
3	1920 saat	0,947	2,983	A.H.	12,7
4*	1920 saat	3,552	11,187	A.H.	12,7
5	1920 saat	1,785	5,622	A.H.	12,7
	ORT	1,377	5,106		
	STD. SAPMA	0,420	1,324		

Tablo A.2: B yapıştırıcısının ısııl çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	5,836	18,381	K.H.	12,7
2	0	5,633	17,742	K.H.	12,7
3	0	5,986	18,854	K.H.	12,7
4	0	5,469	17,225	K.H.	12,7
5	0	5,752	18,117	K.H.	12,7
	ORT	5,735	18,064		
	STD. SAPMA	0,197	0,619		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	480 saat	4,126	12,995	K.H.	12,7
2	480 saat	4,524	14,249	K.H.	12,7
3	480 saat	4,965	15,638	K.H.	12,7
4	480 saat	4,397	13,849	K.H.	12,7
5	480 saat	4,326	13,625	K.H.	12,7
	ORT	4,468	14,071		
	STD. SAPMA	0,313	0,986		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	840 saat	4,075	12,835	K.H.	12,7
2	640 saat	3,644	11,477	K.H.	12,7
3	640 saat	4,926	15,515	K.H.	12,7
4	840 saat	4,189	13,194	K.H.	12,7
5	640 saat	5,199	16,375	K.H.	12,7
	ORT	4,407	13,879		
	STD. SAPMA	0,640	2,015		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	1200 saat	5,124	16,139	K.H.	12,7
2	1200 saat	4,158	13,096	K.H.	12,7
3	1200 saat	4,281	13,483	K.H.	12,7
4	1200 saat	4,673	14,718	K.H.	12,7
5	1200 saat	4,062	12,794	K.H.	12,7
	ORT	4,460	14,046		
	STD. SAPMA	0,438	1,380		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	4,917	15,487	K.H.	12,7
2	1440 saat	4,587	14,447	K.H.	12,7
3	1440 saat	4,161	13,106	K.H.	12,7
4	1440 saat	4,929	15,524	K.H.	12,7
5	1440 saat	4,234	13,335	K.H.	12,7
	ORT	4,566	14,380		
	STD. SAPMA	0,364	1,146		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	1680 saat	4,917	15,487	K.H.	12,7
2	1680 saat	4,578	14,419	K.H.	12,7
3	1680 saat	4,969	15,650	K.H.	12,7
4	1680 saat	4,496	14,161	K.H.	12,7
5	1680 saat	4,637	14,605	K.H.	12,7
	ORT	4,719	14,864		
	STD. SAPMA	0,211	0,664		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	1920 saat	4,016	12,649	K.H.	12,7
2	1920 saat	4,486	14,129	K.H.	12,7
3*	1920 saat	5,220	16,441	K.H.	12,7
4	1920 saat	4,429	13,950	K.H.	12,7
5	1920 saat	3,993	12,576	K.H.	12,7
	ORT	4,231	13,949		
	STD. SAPMA	0,245	0,828		

Tablo A.3: C yapıştırıcısının ısıl çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	2,007	6,321	A.H.	12,7
2	0	1,993	6,277	A.H.	12,7
3	0	2,385	7,512	A.H.	12,7
4	0	1,755	5,528	A.H.	12,7
5	0	1,815	5,717	A.H.	12,7
ORT		1,991	6,271		
STD. SAPMA		0,246	0,775		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	480 saat	1,313	4,135	A.H.	12,7
2	480 saat	1,106	3,483	A.H.	12,7
3	480 saat	1,225	3,858	A.H.	12,7
4	480 saat	1,467	4,620	A.H.	12,7
5	480 saat	1,419	4,469	A.H.	12,7
ORT		1,306	4,113		
STD. SAPMA		0,146	0,460		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	840 saat	1,182	3,723	A.H.	12,7
2	640 saat	0,747	2,353	A.H.	12,7
3	640 saat	1,096	3,452	A.H.	12,7
4	840 saat	1,721	5,420	A.H.	12,7
5	640 saat	1,472	4,636	A.H.	12,7
ORT		1,244	3,917		
STD. SAPMA		0,372	1,170		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	1200 saat	1,380	4,346	A.H.	12,7
2	1200 saat	0,602	1,896	A.H.	12,7
3	1200 saat	1,478	4,655	A.H.	12,7
4	1200 saat	1,378	4,340	A.H.	12,7
5	1200 saat	1,399	4,406	A.H.	12,7
ORT		1,247	3,929		
STD. SAPMA		0,363	1,144		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BINDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	0,229	0,721	A.H.	12,7
2	1440 saat	0,308	0,970	A.H.	12,7
3	1440 saat	1,554	4,894	A.H.	12,7
4	1440 saat	1,235	3,890	A.H.	12,7
5	1440 saat	0,420	1,323	A.H.	12,7
ORT		0,749	2,360		
STD. SAPMA		0,604	1,901		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1680 saat	0,268	0,844	A.H.	12,7
2	1680 saat	0,281	0,885	A.H.	12,7
3	1680 saat	1,200	3,780	A.H.	12,7
4	1680 saat	0,266	0,838	A.H.	12,7
5	1680 saat	0,577	1,817	A.H.	12,7
ORT		0,518	1,633		
STD. SAPMA		0,403	1,270		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	BEKLEME SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1920 saat	0,348	1,096	A.H.	12,7
2	1920 saat	0,287	0,904	A.H.	12,7
3	1920 saat	0,162	0,510	A.H.	12,7
4	1920 saat	0,311	0,980	A.H.	12,7
5	1920 saat	0,319	1,005	A.H.	12,7
ORT		0,285	0,899		
STD. SAPMA		0,072	0,228		

Tablo A.4: D yapıştırıcısının ısı çevrim ile yaşlanma deneyi sonuçları

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	6,463	20,356	K.H.	12,7
2*	0	4,370	13,764	K.H.	12,7
3	0	6,561	20,665	K.H.	12,7
4	0	6,560	20,661	K.H.	12,7
5	0	6,381	20,098	K.H.	12,7
ORT		6,491	20,445		
STD. SAPMA		0,087	0,273		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	480 saat	4,551	14,334	K.H.	12,7
2	480 saat	4,461	14,050	K.H.	12,7
3	480 saat	4,669	14,706	K.H.	12,7
4	480 saat	4,564	14,375	K.H.	12,7
5	480 saat	4,395	13,843	K.H.	12,7
ORT		4,528	14,261		
STD. SAPMA		0,105	0,330		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	840 saat	4,243	13,364	K.H.	12,7
2	640 saat	4,092	12,888	K.H.	12,7
3	640 saat	4,308	13,569	K.H.	12,7
4	840 saat	4,301	13,546	K.H.	12,7
5	640 saat	4,732	14,904	K.H.	12,7
ORT		4,335	13,654		
STD. SAPMA		0,238	0,750		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1200 saat	4,346	13,688	K.H.	12,7
2	1200 saat	4,447	14,006	K.H.	12,7
3	1200 saat	4,511	14,208	K.H.	12,7
4	1200 saat	4,638	14,608	K.H.	12,7
5	1200 saat	3,825	12,047	K.H.	12,7
ORT		4,353	13,711		
STD. SAPMA		0,314	0,988		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	4,286	13,499	K.H.	12,7
2	1440 saat	3,766	11,861	K.H.	12,7
3	1440 saat	4,804	15,131	K.H.	12,7
4	1440 saat	4,562	14,369	K.H.	12,7
5	1440 saat	4,373	13,773	K.H.	12,7
ORT		4,358	13,727		
STD. SAPMA		0,386	1,216		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1680 saat	4,392	13,833	K.H.	12,7
2	1680 saat	3,854	12,139	K.H.	12,7
3	1680 saat	4,291	13,515	K.H.	12,7
4	1680 saat	4,389	13,824	K.H.	12,7
5	1680 saat	3,964	12,485	K.H.	12,7
ORT		4,178	13,159		
STD. SAPMA		0,252	0,793		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA- ISIL ÇEVİRİM		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1920 saat	3,901	12,287	K.H.	12,7
2	1920 saat	4,362	13,739	K.H.	12,7
3	1920 saat	4,392	13,833	K.H.	12,7
4	1920 saat	4,330	13,638	K.H.	12,7
5	1920 saat	3,835	12,079	K.H.	12,7
ORT		4,164	13,115		
STD. SAPMA		0,272	0,857		

Tablo A.5: A yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	3,023	9,521	A.H.	12,7
2*	0	2,623	8,261	A.H.	12,7
3	0	4,311	13,578	A.H.	12,7
4	0	3,893	12,261	A.H.	12,7
5	0	3,150	9,921	A.H.	12,7
ORT		3,594	11,320		
STD. SAPMA		0,613	1,930		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	360 saat	2,390	7,528	A.H.	12,7
2	360 saat	1,519	4,784	A.H.	12,7
3	360 saat	2,516	7,924	A.H.	12,7
4*	360 saat	0,274	0,863	A.H.	12,7
5	360 saat	2,957	9,313	A.H.	12,7
	ORT	2,346	7,387		
	STD. SAPMA	0,602	1,897		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	720 saat	3,218	10,135	A.H.	12,7
2*	720 saat	0,701	2,208	A.H.	12,7
3	720 saat	1,637	5,156	A.H.	12,7
4	720 saat	1,330	4,189	A.H.	12,7
5	720 saat	2,949	9,288	A.H.	12,7
	ORT	2,284	7,192		
	STD. SAPMA	0,939	2,956		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1080 saat	1,856	5,846	A.H.	12,7
2	1080 saat	2,206	6,948	A.H.	12,7
3	1080 saat	2,547	8,022	A.H.	12,7
4*	1080 saat	0,956	3,011	A.H.	12,7
5	1080 saat	2,208	6,954	A.H.	12,7
	ORT	2,203	6,939		
	STD. SAPMA	0,346	1,088		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	2,632	8,290	A.H.	12,7
2	1440 saat	2,185	6,882	A.H.	12,7
3	1440 saat	1,976	6,224	A.H.	12,7
4	1440 saat	1,011	3,184	A.H.	12,7
5	1440 saat	1,265	3,984	A.H.	12,7
	ORT	1,814	5,713		
	STD. SAPMA	0,667	2,101		

A Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1*	1800 saat	0,404	1,272	A.H.	12,7
2	1800 saat	1,924	6,060	A.H.	12,7
3	1800 saat	2,545	8,016	A.H.	12,7
4	1800 saat	1,019	3,209	A.H.	12,7
5*	1800 saat	3,368	10,608	A.H.	12,7
	ORT	1,829	5,762		
	STD. SAPMA	0,767	2,417		

Tablo A.6: B yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	5,836	18,381	K.H.	12,7
2	0	5,633	17,742	K.H.	12,7
3	0	5,986	18,854	K.H.	12,7
4	0	5,469	17,225	K.H.	12,7
5	0	5,752	18,117	K.H.	12,7
ORT		5,735	18,064		
STD. SAPMA		0,197	0,619		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	360 saat	5,423	17,080	K.H.	12,7
2	360 saat	5,444	17,146	K.H.	12,7
3	360 saat	5,351	16,854	K.H.	12,7
4*	360 saat	3,991	12,570	K.H.	12,7
5	360 saat	5,556	17,499	K.H.	12,7
ORT		5,444	17,145		
STD. SAPMA		0,085	0,267		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	720 saat	5,252	16,542	K.H.	12,7
2	720 saat	4,307	13,565	K.H.	12,7
3	720 saat	5,316	16,743	K.H.	12,7
4	720 saat	5,055	15,921	K.H.	12,7
5	720 saat	4,442	13,991	K.H.	12,7
ORT		4,874	15,352		
STD. SAPMA		0,469	1,477		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1080 saat	5,319	16,753	K.H.	12,7
2	1080 saat	4,571	14,397	K.H.	12,7
3	1080 saat	5,035	15,858	K.H.	12,7
4	1080 saat	5,259	16,564	K.H.	12,7
5	1080 saat	5,261	16,570	K.H.	12,7
ORT		5,089	16,028		
STD. SAPMA		0,309	0,974		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	5,063	15,946	K.H.	12,7
2	1440 saat	5,044	15,887	K.H.	12,7
3	1440 saat	5,425	17,087	K.H.	12,7
4	1440 saat	5,434	17,115	K.H.	12,7
5	1440 saat	5,306	16,712	K.H.	12,7
ORT		5,254	16,549		
STD. SAPMA		0,190	0,600		

B Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1800 saat	5,158	16,246	K.H.	12,7
2	1800 saat	4,886	15,389	K.H.	12,7
3	1800 saat	4,756	14,980	K.H.	12,7
4	1800 saat	5,288	16,655	K.H.	12,7
5	1800 saat	4,693	14,781	K.H.	12,7
	ORT	4,956	15,610		
	STD. SAPMA	0,257	0,811		

Tablo A.7: C yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	2,007	6,321	A.H.	12,7
2	0	1,993	6,277	A.H.	12,7
3	0	2,385	7,512	A.H.	12,7
4	0	1,755	5,528	A.H.	12,7
5	0	1,815	5,717	A.H.	12,7
	ORT	1,991	6,271		
	STD. SAPMA	0,246	0,775		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	360 saat	1,611	5,074	A.H.	12,7
2	360 saat	1,300	4,094	A.H.	12,7
3	360 saat	1,948	6,135	A.H.	12,7
4	360 saat	1,425	4,488	A.H.	12,7
5	360 saat	1,884	5,934	A.H.	12,7
	ORT	1,634	5,145		
	STD. SAPMA	0,281	0,886		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	720 saat	0,667	2,101	A.H.	12,7
2	720 saat	0,660	2,079	A.H.	12,7
3	720 saat	0,750	2,362	A.H.	12,7
4	720 saat	0,624	1,965	A.H.	12,7
5	720 saat	0,613	1,931	A.H.	12,7
	ORT	0,663	2,088		
	STD. SAPMA	0,054	0,170		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1080 saat	0,600	1,890	A.H.	12,7
2	1080 saat	0,668	2,104	A.H.	12,7
3*	1080 saat	2,012	6,337	A.H.	12,7
4	1080 saat	0,683	2,151	A.H.	12,7
5	1080 saat	0,666	2,098	A.H.	12,7
	ORT	0,654	2,916		
	STD. SAPMA	0,037	1,915		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	0,791	2,491	A.H.	12,7
2	1440 saat	0,487	1,534	A.H.	12,7
3	1440 saat	0,755	2,378	A.H.	12,7
4	1440 saat	0,848	2,671	A.H.	12,7
5	1440 saat	0,828	2,608	A.H.	12,7
ORT		0,742	2,336		
STD. SAPMA		0,147	0,462		

C Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1800 saat	0,812	2,557	A.H.	12,7
2	1800 saat	0,942	2,967	A.H.	12,7
3	1800 saat	0,772	2,431	A.H.	12,7
4	1800 saat	0,835	2,630	A.H.	12,7
5	1800 saat	0,595	1,874	A.H.	12,7
ORT		0,791	2,492		
STD. SAPMA		0,126	0,398		

Tablo A.8: D yapıştırıcısının rutubet ile yaşlanma deneyi sonuçları

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	0	6,463	20,356	K.H.	12,7
2*	0	4,370	13,764	K.H.	12,7
3	0	6,561	20,665	K.H.	12,7
4	0	6,560	20,661	K.H.	12,7
5	0	6,381	20,098	K.H.	12,7
ORT		6,491	20,445		
STD. SAPMA		0,087	0,273		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	360 saat	5,462	17,203	K.H.	12,7
2*	360 saat	2,560	8,063	K.H.	12,7
3	360 saat	4,650	14,646	K.H.	12,7
4	360 saat	5,190	16,346	K.H.	12,7
5	360 saat	5,109	16,091	K.H.	12,7
ORT		5,103	16,072		
STD. SAPMA		0,337	1,063		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	720 saat	4,810	15,150	K.H.	12,7
2	720 saat	4,928	15,521	K.H.	12,7
3	720 saat	5,459	17,194	K.H.	12,7
4	720 saat	5,313	16,734	K.H.	12,7
5	720 saat	5,083	16,009	K.H.	12,7
ORT		5,119	16,122		
STD. SAPMA		0,268	0,843		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1080 saat	4,754	14,973	K.H.	12,7
2	1080 saat	4,728	14,891	K.H.	12,7
3	1080 saat	5,323	16,765	K.H.	12,7
4	1080 saat	4,560	14,362	K.H.	12,7
5	1080 saat	5,463	17,206	K.H.	12,7
	ORT	4,966	15,640		
	STD. SAPMA	0,400	1,261		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1440 saat	5,462	17,203	K.H.	12,7
2	1440 saat	4,505	14,189	K.H.	12,7
3	1440 saat	4,807	15,140	K.H.	12,7
4	1440 saat	5,027	15,833	K.H.	12,7
5	1440 saat	4,945	15,575	K.H.	12,7
	ORT	4,949	15,588		
	STD. SAPMA	0,349	1,098		

D Yapıştırıcısı			Al-Cu LEVHA-RUTUBET		
NUMUNE NO.	YAŞLANMA SÜRESİ	MAX. YÜK (kN)	ORT. HASAR GERİLMESİ (MPa)	HASAR TÜRÜ	BİNDİRME MESAFESİ (mm)
1	1800 saat	4,634	14,595	K.H.	12,7
2	1800 saat	5,400	17,008	K.H.	12,7
3	1800 saat	4,519	14,233	K.H.	12,7
4	1800 saat	4,236	13,342	K.H.	12,7
5	1800 saat	4,017	12,652	K.H.	12,7
	ORT	4,561	14,366		
	STD. SAPMA	0,527	1,661		

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Bursa’da doğdu. İlkokulu Gemlik Atatürk İlkokulu, ortaokul ve liseyi Gemlik Celal Bayar Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2002 yılında liseden mezun olup aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde yüksek öğrenimine başladı. 2006 yılı Bahar Dönemi’nde lisans eğitimini tamamladı.

2006-2007 Akademik Yılı Güz Dönemi’nde İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı’nda lisans üstü eğitimine başladı. Halen aynı programda eğitimini sürdürmektedir.

Ekim 2006-Mayıs 2008 tarihleri arasında “Üniversite-Sanayi İşbirliği Programı” kapsamında Arçelik A.Ş. Ar-Ge Direktörlüğü Malzeme Teknolojileri Ailesi’nde Proje Görevlisi olarak çalışmıştır. Mayıs 2008’de Arçelik A.Ş. Çamaşır Makinesi İşletmesi’nde Üretim Mühendisi ünvanı ile başladığı iş yaşamını sürdürmektedir.